Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ С.М. КИРОВА»

ИЗВЕСТИЯ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКОЙ АКАДЕМИИ

Выпуск 256

Издаются с 1886 года

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2025

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Главный редактор
И.А. Мельничук, канд. с.-х. наук, доц., СПбГЛТУ

Заместитель главного редактора
А.А. Добровольский, канд. с.-х. наук, доц., СПбГЛТУ

Ответственный секретарь
И.А. Зверев, канд. техн. наук, СПбГЛТУ

Члены совета
А.В. Жигунов, д-р с.-х. наук, проф., СПбГЛТУ,
А.В. Васильев, д-р хим. наук, проф., СПбГЛТУ, СПбГУ,
А.В. Селиховкин, д-р биол. наук, проф., СПбГЛТУ, СПбГУ,
А.Н. Чубинский, д-р техн. наук, проф., СПбГЛТУ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ
В.А. Александров, д-р техн. наук, проф., СПбГЛТУ, УГТУ,
А.С. Алексеев, д-р геогр. наук, проф., СПбГЛТУ,
М.Н. Белгасем, д-р хим. наук, проф., Гренобльский технологический институт,
Н.В. Беляева, д-р с.-х. наук, проф., СПбГЛТУ,
А.В. Васильев, д-р хим. наук, проф., СПбГЛТУ, СПбГУ,
Н.В.К. Вебер, д-р с.-х. наук, проф., Дрезденский технический университет (Германия),
А.Ю. Виноградов, д-р техн. наук, проф., СПбГЛТУ,
Е.В. Голосова, д-р с.-х. наук, проф., ФГБУН «Ордена трудового красного знамени Никитский ботанический сад – национальный научный центр РАН» (Московское представительство), СПбГЛТУ,
Д.А. Данилов, д-р с.-х. наук, СПбГЛТУ, Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха,
К. Деглиз, проф., Университет Лотарингии,
Д.В. Евтюгин, д-р хим. наук, профессор, Университет Авейру (Португалия),
А.В. Жигунов, д-р с.-х. наук, проф., СПбГЛТУ,
С.В. Залесов, д-р с.-х. наук, проф., УГЛТУ,
М.Е. Игнатьева, канд. с.-х. наук, проф., Университет Западной Австралии (Австралия),
А.А. Леонович, д-р техн. наук, проф., СПбГЛТУ,
С.С. Макаров, д-р с.-х. наук, РГАУ-МСХА им. Тимирязева,
М.Ю. Мандельштам, д-р биол. наук, доц., СПбГЛТУ,
Д.Л. Мусолин, д-р. биол. наук, доц., Европейская и Средиземноморская организации по карантину и защите растений (Франция),
В.Ю. Нешатаев, д-р биол. наук, доц., СПбГЛТУ,
В.Н. Петров, д-р экон. наук, проф., СПбГЛТУ,
Е.К. Потокина, д-р биол. наук, проф., СПбГЛТУ, СПбНИИЛХ,
А.В. Пранович, д-р биол. наук, Академия Або,
В.Г. Санаев, д-р техн. наук, проф., БГТУ им. Н.Э. Баумана,
А.В. Селиховкин, д-р биол. наук, проф., СПбГЛТУ, СПбГУ,
А.П. Соколов, д-р техн. наук, проф., ПетрГУ,
С.А. Угрюмов, д-р техн. наук, проф., СПбГЛТУ,
Л.В. Уткин, д-р техн. наук, проф., СПбПУ, СПбГЛТУ,
Д.М. Черниховский, д-р с.-х. наук, доц., СПбГЛТУ,
А.Н. Чубинский, д-р техн. наук, проф., СПбГЛТУ,
А.П. Смирнов, д-р с.-х. наук, проф., СПбГЛТУ,
Е.Г. Хитров, д-р техн. наук, СПбГЛТУ, СПбПУ,
А.В. Шелоумов, д-р техн. наук, СПбГЛТУ,
Р.В. Щекалев, д-р с.-х. наук, СПбГЛТУ,
В.Т. Ярмишко, д-р биол. наук, проф., СПбГЛТУ, БИН РАН

Адрес редакции, издателя, типографии: 194021, г. Санкт-Петербург, Институтский пер., д. 5, литер У.
Факс: (812) 670-93-90.
Тел.: (812) 670-92-59.
Сайт организации: www.spbftu.ru
Сайт издания: izvestia.spbftu.ru
E-mail: izvestiya.spblta@mail.ru

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия Российской Федерации. Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-23613 от 10.03.2006.

УДК 630

Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии: Вып. 256. Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2025. – 560 с. – ISBN 978-5-9239-1552-5, ISSN-p: 2079-4304, ISSN-e: 2658-5871.

В очередном выпуске сборника научных трудов «Известия СПбЛТА» представлены результаты текущих исследований по лесному хозяйству, лесозаготовкам и механизации лесосечных работ, механической и химической переработке древесины. Сборник предназначен для работников лесного комплекса, преподавателей, аспирантов, студентов и выпускников лесотехнических вузов, сотрудников НИИ лесного профиля.

Темплан 2025 г. Изд. № 228
ISBN 978-5-9239-1552-5
ISSN-p: 2079-4304, ISSN-e: 2658-5871

© Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова (СПбГЛТУ), 2025

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

State Budget Institution of Higher Education
«SAINT PETERSBURG STATE FOREST TECHNICAL UNIVERSITY
NAMED AFTER S.M. KIROV»

IZVESTIA
SANKT-PETERBURGSKOJ LESOTEHNICESKOJ AKADEMII

Issue 256

Published since 1886

SAINT PETERSBURG
2025

EDITORIAL COUNCIL

Editor-in-Chief
I. Melnichuk, PhD (Agriculture), St. Petersburg State Forest Technical University

Deputy Editor-in-Chief
A.A. Dobrovolsky, PhD (Agriculture), St. Petersburg State Forest Technical University

Executive Secretary
I.A. Zverev, PhD (Technical), St. Petersburg State Forest Technical University

Council members
A.V. Zhigunov, DSc (Agriculture), St. Petersburg State Forest Technical University,
A.V. Vasiliev, DSc (Chemical) St. Petersburg State Forest Technical University,
A.V. Selikhovkin, DSc (Biology), St. Petersburg State Forest Technical University,
A.N. Chubinsky, DSc (Technical), St. Petersburg State Forest Technical University

EDITORIAL BOARD
V.A. Aleksandrov, DSc (Technical), St. Petersburg State Forest Technical University,
A.S. Alekseev, DSc (Geografy) St. Petersburg State Forest Technical University,
N. Belgacem, PhD, Grenoble Institute of Engineering (Grenoble),
N.V. Belyaeva, DSc (Agriculture), St. Petersburg State Forest Technical University,
A.V. Vasiliev, St. Petersburg State Forest Technical University,
N. Weber, PhD, Dresden Technical University (Dresden),
A.Yu. Vinogradov, DSc (Technical), St. Petersburg State Forest Technical University,
E.V. Golosova, DSc (Agriculture), Order of the Red Banner of Labor Nikitsky Botanical Garden – National Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Moscow),
D.A. Danilov, DSc (Agriculture), St. Petersburg State Forest Technical University,
X. Deglise, PhD, International Academy of Wood Sciences (Hamburg)
D.V. Evtyugin, PhD, University of Aveiro (Aveiro),
A.V. Zhigunov, DSc (Agriculture), St. Petersburg State Forest Technical University,
S.V. Zalesov, DSc (Agriculture), Ural State Forest Engineering University (Ekaterinburg),
M.E. Ignateva, PhD, University of Western Australia (Perte),
A.A. Leonovich, DSc (Technical), St. Petersburg State Forest Technical University,
S.S. Makarov, DSc (Agriculture), Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural,
M.Yu. Mandelshtam, DSc (Biology), St. Petersburg State Forest Technical University,
D.L. Musolin, DSc (Biology), European and Mediterranean Plant Protection Organization (France),
V.Yu. Neshataev, DSc (Biology), St. Petersburg State Forest Technical University,
V.N. Petrov, DSc (Economics), St. Petersburg State Forest Technical University,
E.K., Potokina, DSc (Biology), St. Petersburg State Forest Technical University,
A.V. Pranovich, PhD, Åbo Akademi University (Turku),
V.G. Sanaev, DSc (Technical), Bauman Moscow State Technical University (Moscow),
A.V. Selikhovkin, DSc (Biology), St. Petersburg State Forest Technical University, St. Petersburg State University,
A.P. Sokolov, DSc (Technical), Petrozavodsk State University (Petrozavodsk),
S.A. Ugryumov, DSc (Technical), St. Petersburg State Forest Technical University,
L.V. Utkin, DSc (Technical), Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
D.M. Chernikhovskii, DSc (Agriculture), St. Petersburg State Forest Technical University,
A.N. Chubinsky, DSc (Technical), St. Petersburg State Forest Technical University,
A.P. Smirnov, DSc (Agriculture), St. Petersburg State Forest Technical University,
E.G. Khitrov, DSc (Technical), St. Petersburg State Forest Technical University, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
A.V. Sheloumov, DSc (Technical), St. Petersburg State Forest Technical University,
R.V. Shchekalev, DSc (Agriculture), St. Petersburg State Forest Technical University,
V.T. Yarmishko, DSc (Biology), Komarov Botanical Institute of RAS

Address of the Editorial Office,
Publisher, Printing House 194021, Russia, St. Petersburg, Institutskiy per., 5, lit. U.
Fax: +7(812)670-93-90.
Tel.: +7(812)670-92-59.
Organization's website: www.spbftu.ru
Serial's website: izvestia.spbftu.ru
E-mail: izvestiya.spblta@mail.ru

The serial is registered by the Federal service on supervision of legislation observance in the sphere of mass communications and protection of cultural heritage of the Russian Federation. The certificate on registration of mass media of PI no. FS77-23613 of 10.03.2006.

UDC 630

Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii: Iss. 256. Saint-Petersburg.: SPbFTU, 2025. – 560 p. – ISBN 978-5-9239-1552-5, ISSN-p: 2079-4304, ISSN-e: 2658-5871.

The next release of «Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii» represents results of the current researches on forestry, logging and mechanization of logging, mechanical and chemical processing of wood. The papers are intended for workers of the forest complex, teachers, scientists and graduate students of forest, agricultural and biological higher education institutions, staff of scientific research institutes in the field of forest sciences.

Templan 2025 г. Izd. N 228
ISBN 978-5-9239-1552-5
ISSN-p: 2079-4304, ISSN-e: 2658-5871

© Saint Petersburg State Forest Technical University (SPbFTU), 2025

ПРЕДИСЛОВИЕ

В сборнике научных трудов «Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии» публикуются оригинальные научные и обзорные статьи, отдельные разделы диссертаций, материалы о патентах и внедрении в производство законченных научных работ, статьи о проблемах высшего лесотехнического образования, об истории становления лесного хозяйства, лесной, деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности. «Известия СПбЛТА» издаются с 1886 года, выходят четыре раза в год и являются научным изданием лесотехнического профиля, включенным ВАК РФ в новый Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук. С 2005 года «Известия СПбЛТА» включены в систему по созданию российского индекса научного цитирования (РИНЦ) – www.elibrary.ru. Издание включено в Каталог «Пресса России» (индекс 11215).

Издание предназначено для работников лесного комплекса, преподавателей, научных сотрудников, аспирантов, студентов лесотехнических вузов, НИИ лесного профиля и выпускников университета. «Известия СПбЛТА» принимают публикации на русском, английском и немецком языках зарубежных и отечественных авторов, поддерживающих развитие международного сотрудничества в области наук о лесе и древесине. Надеемся, что каждый читатель найдет здесь статью по своим интересам.

Все замечания и пожелания будут обязательно рассмотрены и по возможности учтены в последующих изданиях. Просим направлять их по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., д. 5, редакция «Известий СПбЛТА», или izvestiya.spblta@mail.ru.

Редколлегия

1. ХРОНИКА НАУЧНОЙ ЖИЗНИ

УДК 81'276.6: 62

Л.В. Лукьянова

ТЕРМИН «НАСАЖДЕНИЕ» В ИСТОРИИ ФОРМИРОВАНИЯ ЯЗЫКА РУССКОЙ ЛЕСНОЙ НАУКИ

Введение. История отечественного лесоводства восходит к XVIII веку и связана с накоплением преимущественно эмпирического материала о растительности России, породном составе лесов, практическим опыте по выращиванию леса [Мелехов, 2004]. Вместе с тем развитие лесоводства как самостоятельной науки шло крайне медленными темпами. Даже в конце XIX века недавний выпускник Санкт-Петербургского лесного института В. П. Корш на страницах «Лесного журнала» ставил все еще актуальную цель – «доказать, что лесоводство есть самостоятельная отрасль естественных наук и не подчинена анатомии и физиологии растений, как это принято думать» [Корш, 1899, с. 847], имеет особый объект исследования, научные задачи и пути развития.

Изучение жизни леса, его научное познание нуждается в определённом научном языке, базирующемся на научной терминологии. Для российского лесоводства формирование национального научного языка становится остро актуальной проблемой в конце XIX века. Составители первого систематического указателя книг, изданных на русском языке [Литература…, 1878], в аннотациях к представляемым изданиям нередко акцентируют внимание на языковом материале, отмечая неудовлетворительное владение авторами терминологией и научным стилем изложения. Отсутствие единой русской лесоводственной терминологии и ее достоверной фиксации в справочных изданиях становится предметом особого обсуждения на заседании Лесного общества 1879 г., в результате которого создается специальная комиссия по русской лесоводственной терминографии[1],

[1] Протокол обыкновенного собрания Лесного общества 8 декабря 1879 года // Лесной журнал. 1880. №1. С. 16–24.

а позже предпринимаются практические шаги по систематизации научного знания и терминологии [Кайгородов, 1883; Вереха, 1898].

Немногочисленные лингвистические исследования разных лет [Сперанская, 1984; Гриднева, 1987; Гладилина, 2005; Васькина, Шарапова, 2015; Лукьянова, 2024] подтверждают, что сложный процесс формирования языка русской лесной науки все еще является малоизученной и актуальной областью, имеющей значительные лакуны в научном дискурсе.

Специальная лексика как «совокупность слов и словосочетаний, обозначающих специфические понятия и представления профессионального сообщества» [Фельде, 2014, с. 628], прежде всего научная терминологическая лексика, являет собой не только некую систему научного знания (отраженного и закрепленного в языке), но и свидетельствует о своеобразных аналитических процессах, научной рефлексии определенного периода. Таким образом, анализ научной терминологии способствует не только углублению представлений о закономерностях или особенностях развития словарного состава лексики ограниченного употребления, но и выявляет (вскрывает) творческий научный процесс.

В рамках заявленной темы рассматривается термин «насаждение» как один из ключевых, наиболее востребованных и в то же время дискуссионных терминов в истории русской лесной науки. Основная цель исследования – на основе диахронного анализа реконструировать начальный этап формирования и трансформации содержания термина «насаждение» в русском лесоводстве.

Материалы и методика исследования. Для реализации поставленной цели привлечен разножанровый текстовый материал конца XVIII – начала XX вв.: толковые словари русского языка, естественнонаучные терминологические словари и справочники, учебники и учебные пособия по лесоводству, научные лесоводственные и лингвистические статьи. В основу исследования положены описательный метод, методы терминографического (лексикографического) и контекстного анализа.

Результаты исследования. В русском научном языке конца XVIII – начала XIX вв., по мнению лингвистов [Итунина, 2020], действуют две основные тенденции:

1. обогащение словарного запаса с помощью различных способов номинации (нередко приводящее к избыточности);

2. упорядочение, регламентация и дифференциация терминологии.

Эти общеязыковые процессы в полной мере затрагивают, хотя несколько позднее, и лесоводственную сферу. Отражение начальной стадии этих процессов в области лесной терминологии можно усмотреть в сочинении молодого талантливого ученого Петра Андриановича Перелыгина (1802–1840) «Начертание правил лесоводства» [Перелыгин, 1831].

Следует подчеркнуть, что сочинение Перелыгина – это первый систематический учебник по лесоводству на русском языке, составленный на основе лучших для своего времени немецких руководств, по которому в 30-50-е гг. XIX века учились воспитанники Санкт-Петербургского лесного института (Санкт-Петербургского лесного и межевого института). В предисловии к первой части автор, преподаватель и практик, характеризуя «лесознание», пишет о нём как «о весьма малоизвестном у нас как на деле, так и в литературном отношении» предмете, особо подчеркивая и собственную терминологическую работу, вплоть до введения в научный оборот «вновь составленных» и «изобретённых» им терминов [Перелыгин, 1831, ч. I , с. VI].

Спустя десятилетия, на исходе XIX века, известный русский ученый, профессор кафедры лесоводства Санкт-Петербургского лесного института В. Я. Добровлянский в биографической статье о Перелыгине писал, что молодому ученому «пришлось по необходимости создать для перевода немецких технических выражений целый ряд терминов, большая часть которых получила в позднейшее время полное право гражданства в русской лесоводственной литературе» [Добровлянский, 1898]. Первый библиограф отечественной лесоводственной литературы и составитель первого терминологического лесоводственного словаря профессор П. Н. Вереха, оценивая научные заслуги Перелыгина, также подчеркивал, что «основание некоторой части русской лесоводственной терминологии» было положено сочинением Перелыгина «Начертание правил лесоводства» [Вереха, 1902].

Среди терминов, употребляемых (и кратко объясняемых) в этом сочинении, автор использует «насаждение» в синонимическом ряду с «состоянием леса», сопровождая их немецким первоисточником, указанным в скобках (Bestand): «…количество и расположение дерев, покрывающих лесное пространство, или как в лесоводстве называют *насаждение*, *состояние леса* (*Bestand*) бывает весьма различно» [Перелыгин, 1831, II , с. 9-10].

Можно предположить, что таким образом П.А. Перелыгин вводит в научный оборот «насаждение» и дает первичную письменную фиксацию еще не устоявшемуся термину (возможно, бытующему в устной ограниченной практике), который в перспективе исторического развития лесо-

водства закрепится в научном языке. Типичным для этого периода национального языкового развития представляется и способ наименования термина: общеупотребительное слово «насаждение», с XVIII века имеющее 2 значения – «1. Действие по глаголу насадить-насаждать, а также и результат, плод таких действий, нередко относящихся в абстрактной сфере; 2. Посаженное дерево, растение (имеющее словарную помету «чаще множественное»)» [Словарь…, 2004, с. 37]), – получает в профессиональном сообществе семантический сдвиг в традиционном употреблении и в новом качестве используется как термин лесоводства.

Следует заметить, что спустя десятилетие после выхода в свет сочинения Перелыгина в первом русском Лесном словаре (1843–1845) термин «насаждение» еще отсутствует (зафиксировано «древонасаждение» как «способ лесоразведения, в котором вместо семян употребляются молодые деревья с корнями» [Лесной…, 1843, I, с. 342]).

Активно в русский научный лесной дискурс, как представляется, термин «насаждение» входит со второй половины XIX века.

Обратим внимание на некоторые толкования, данные в различных источниках и позволяющие проследить формирование и эволюцию содержания термина. В обнаруженных в Фундаментальной библиотеке Санкт-Петербургского лесотехнического университета рукописных лекциях по лесоводству[2], вероятно, 40–50-хх гг. XIX века, в перечне необходимых «предварительных понятий» зафиксирован и термин «насаждение». На с. 4 дано объяснение: «Для определения состояния леса относительно лесоводства употребляется слово насаждение (Bestand)», – приведена классификация насаждений (полные, неполные, правильно насажденные, неправильно насажденные).

В учебнике известного русского ботаника Н.И. Анненкова, предназначенном в качестве руководства для учеников земледельческих школ, «Лесоводство» (1851) в инструкциях по съемке лесной дачи находим одно из первых определений «насаждения»: «Насаждением называется всякая часть леса, отличная от окружающих ее частей породой деревьев, возрастом их, густотой и качеством или достоинством» [Анненков, 1851, с. 12].Таким образом, у Анненкова основания для выдела насаждения опре-

[2] На корешке переплета тиснением обозначены автор – А. Боде – и название – «Лесоводство». Известно, что А.К. Боде с 1840 по 1855 гг. преподавал (несмотря на плохое знание русского языка) лесную таксацию, лесоводство и др. дисциплины в Лесном институте Санкт-Петербурга.

деляются породой (чистые или смешанные), возрастом (по классам или разрядам возраста, от 1 до 4 возраста), густотой (от излишне густых до очень редких) и достоинством (качеством) деревьев (комплексный показатель на основе степени густоты, равномерности распределения, влияния местонахождения и почвы и др.) [Анненков, 1851, с. 16].

Выдающийся русский ученый и практик Д. М. Кравчинский в 80-е гг. XIX века в книге «Лесовозвращение. Основания лесохозяйственного растениеводства» [Кравчинский, 1883] определил принципы лесохозяйственного растениеводства и восстановления лесов на основе учения о насаждении (специальный отдел «Учение о насаждении»), в котором дал подробную характеристику насаждению, условиям роста и уходу. Основными отличительными особенностями (чертами) насаждения Кравчинский считал «сомкнутость» и «сходство в ходе развития». Среди разнообразных насаждений Кравчинский, с учетом состава, сходства в происхождении и внешних формах, предложил выделить отдельные типы (роды) насаждения; термин «тип насаждения» впоследствии стал широко и неоднозначно использоваться в специальной литературе [Орлов, 1911].

Нельзя обойти вниманием и выдержавший многочисленные переиздания фундаментальный труд классика отечественного лесоводства М.К. Турского «Лесоводство» (первое издание – 1891). Энциклопедический курс, по признанию автора, был адресован не только студентам, но и более широкой аудитории, знакомой с основами сельскохозяйственной практики («образованным землевладельцам»). Это не могло не оказать влияния на характер изложения материала и специальные комментарии. Ключевой объект изучения, «насаждение», получает следующую пространную научно-популярную характеристику: «Участок, занятый лесом, отличающийся чем-либо от соседнего участка, называется насаждением (или лесонасаждением). Насаждение, незначительное по величине, состоящее, например, из нескольких деревьев, называется группою. Несколько разнохарактерных групп, прилегающих одна к другой, если ко всем им применяются одновременно одни и те же хозяйственные мероприятия, составляют одно насаждение. Таким образом, насаждение есть часть квартала (если дача разбита на кварталы), представляющая или особый объект хозяйства или особый объект изучения. Иногда выражению «насаждение» дают тот же смысл, как выражению – «посадка леса», но в этом последнем смысле слово «насаждение» никогда не употребляется лесоводами» [Турский, 1900, с. 5]

Примечательным в контексте рассматриваемой темы является выделение ученым вариативного наименования термина (*насаждение-лесонасаждение*), дифференциация, отграничение содержания термина от других близких понятий (группа, квартал), акцентировка на специальном значении термина, отличии его от обыденного (и, возможно, распространенного) понимания.

С начала 1890-х гг. в специальной литературе обнаруживается тенденция к анализу номинации термина, его истории в русской лесоводственной литературе, предлагаются альтернативные наименования. В частности, в монографии «Народнохозяйственное значение деятелей лесного производства» [Краузе, 1891] известного в свое время профессора Ново-Александрийского института сельского хозяйства и лесоводства А.К. Краузе (также составившего первый немецко-русский лесной словарь[3]) насаждение определяется как «участок леса, который отличается одинаковым характером». Ученый обращает внимание, что «насаждение» (или лесонасаждение) при том, что является «установившимся термином», нуждается в корректировке: «Правильнее было бы употреблять название «древостой», так как слово «насаждение» указывает как бы на искусственное происхождение деревьев» [Краузе, 1891, с. 158].

Неудовлетворенность наименованием позже становится в некотором роде общим местом в анализе «насаждения»: предлагается переименование термина[4], подчеркивается неудачность, но в то же время традиционность и распространенность наименования [Морозов, 1904, 1913].

Актуальным и заслуживающим особого внимания материалом в историческом аспекте интерпретации термина «насаждение» (и словосочетаний с данным термином) стоит признать его определение в первом крупном лесоводственном терминологическом словаре рубежа XIX–XX вв. «Опыт лесоводственного терминологического словаря» [Вереха, 1898]. Словарь профессора Санкт-Петербургского лесного института П. Н. Вере-

[3] Краузе А.К. Немецко-русский словарь. Рига: Н. Киммель, 1889. 413 с.

[4] Например, в уже упомянутой работе «Задачи и пути лесоводства как науки» (1899) автор, В. Корш, считает «необходимым предложить замену термина «насаждение» словом «лес», так как последнее слово входит в состав слова «лесоводство» и, обозначив понятие о насаждении словом «лес», мы тем самым, попутно, введем его в понятие о «лесоводстве», а это хотя и не имеет существенного значения, однако вносит внешний порядок и гармонию в отношение между понятиями о науке и об ее предмете, что во всяком случае только желательно» (с. 850).

хи стал, с одной стороны, попыткой упорядочить и регламентировать русскую лесоводственную терминологию, а с другой – в силу эмоциональных оценок – оказался дискуссионным, местами даже полемическим отражением процесса становления языка (терминологии) русской лесной науки.

В «Опыте лесоводственного терминологического словаря» помещены две словарные статьи, «насаждение» и «лесонасаждение», тексты которых коррелируют друг с другом и позволяют сделать определенные выводы как относительно наименования термина, так и его содержания. В словарной статье о насаждении дано краткое определение термина: «Совокупность на известной площади значительного количества деревьев, которые в общей массе представляют известное однообразие, отличающее их от другого подобного количества деревьев, на другой площади растущих» [Вереха, 1898, с. 306]. В статье о лесонасаждении дано не только определение, но и акцентируется внимание на дифференциации с близким, но не тождественным понятием «участок»: «Группа деревьев, однородная, для приложения хозяйственных мер, в самой себе и вместе с тем отличающаяся от соседних групп. Очень часто понятие Л. смешивают с понятием *участок*[5]. Следовало бы всегда строго различать два эти понятия. Под Л. должно понимать только деревья, на данном пространстве растущие; под понятием *участок* – деревья вместе с почвою, на которой они растут. Таким образом: различные участки могут заключать в себе одинаковые лесонасаждения, но различные лесонасаждения непременно образуют и различные участки. К тому же участок может быть и без лесонасаждения; угодья, неудобные площади. В лесоводственной литературе чаще употребляется выражение «насаждение», вместо Л. (См. насаждение)» [Вереха, 1898, с. 240].

Таким образом, в словаре зафиксирована практика использования обоих терминов, однако более частотным в специальном (письменном) употреблении признается «насаждение»; под термином «насаждение» понимается совокупность (значительная по количеству группа) деревьев и только деревьев, особенностью которых становится однородность/однообразие, отличающее от других главным образом по хозяйственным мерам (рубкам, уходу и т.п.). Настоятельно подчеркивается разграничение объемов понятий «насаждение» и «участок». Отдельные словарные статьи посвящены различным видам насаждений, выделяемым на основе условий местопро-

[5] Слово здесь и далее выделено курсивом в оригинальном тексте словарной статьи.

израстания, древесной породы, возраста, сортимента, полноты (например, «насаждение господствующее», «насаждение одновозрастное», «насаждение чистое» и др.)

Составитель словаря П.Н. Вереха обращает внимание и на альтернативный термин «древостой», который ученым воспринимается крайне негативно, о чем свидетельствует содержание и форма специальной словарной статьи[6]: «**Древостой**. В погоне за новшеством некоторые авторы, без всякой надобности, предлагают свои термины, взамен давно установленных и всеми усвоенных. Следуя этому обычаю и г. Краузе (Народохоз. значение деятелей лесного производства. Варш. 1891) предлагает называть *насаждение – Д.*, считая этот термин более правильным (?) » [Вереха, 1898, с. 131].

Уже в начале XX века основоположник современного лесоведения Г.Ф. Морозов в программной статье «О типах насаждений и их значении в лесоводстве» [Морозов, 1904] проводит определенную ревизию системы общих сведений о насаждении в отечественной (русской) науке о лесе. Признавая термин «насаждение» неудачным переводом[7] немецкого Bestand (Holzbestand) и считая словообразовательную кальку «древостой» более уместной, ученый все же отмечает укорененность термина в лесоводстве, в то же время не исключая возможности употребления синонима, точного эквивалента – «лесное сообщество» («Мы в дальнейшем будем употреблять термины «насаждение» и «лесное сообщество» как однозначащие») [Морозов, 1913, с. 30]. Морозов прослеживает динамику представлений о содержании термина «насаждение»: изначально «эмпирическое определение» (когда под насаждением понимается однородная часть леса, отличающаяся от соседних частей составом, возрастом, полнотой и проч.) осложняется хозяйственным (насаждение как часть леса, которая требует иной хозяйственной меры, чем соседняя) и в итоге завершается «научным определением». Согласно научному видению, как пишет Морозов, «насаждение» – это особое соединение (не простая совокупность) древесных пород, в котором обнаруживается как их взаимное влияние

[6] Словарная статья приведена полностью; выделение жирным шрифтом, курсивом, сокращения и др. соответствуют оригиналу.

[7] Причины неудачности термина объясняются тем, что с таким названием связывается, по Морозову, нечто «насаждённое», следовательно, искусственно явившееся на свет, «тогда как этот технический термин применяется ко всем участкам леса, безразлично, возникли ли они искусственно или представляют собою девственные леса»[Морозов, 1913, с. 30].

друг на друга, так и на занятую почву и атмосферу; ученый подчеркивает, что научное развитие лесоводства тесно связано с развитием учения о насаждении [Морозов, 1904, с. 7]. Вместе с тем, как считает Морозов, частные признаки отличия насаждений друг от друг (форма, состав, возраст, полнота и др.), разработанные ранее в лесоводстве и составляющие его несомненную заслугу в дифференциации, при объединении многих насаждений в более обширные группы оказываются непригодными. Основным признаком, который может быть положен в основу объединения насаждений в обширные группы, являются условия местопроизрастания или почвенно-грунтовые условия: «Тип насаждения есть совокупность насаждений, объединённых в одну обширную группу общностью условий местопроизрастания или почвенно-грунтовых условий» [Морозов, 1904, с. 14].

Таким образом, рассматривая систематическое изложение понятия типа насаждения и его основное значение в контексте достижений русского лесоводства, Морозов открывает новую дискуссионную страницу лесной типологии на пути к «Учению о лесе».

Обсуждение. В проведенном исследовании «насаждения» как одного из ключевых, наиболее востребованных и в то же время дискуссионных до настоящего времени терминов в русской лесной науке внимание было сосредоточено преимущественно на начальном этапе формирования и трансформации его содержания, охватывающем первую треть XIX – начало XX вв. Обращение к разного рода знаковым научным публикациям этого периода позволило выявить как специфические, так и общие тенденции в интерпретации термина и его коллокаций в истории русской лесной науки. Термин «насаждение», как представляется, становится маркером развития теории и практики отечественного лесоводства. Отражая логику развития лесного хозяйства и системных представлений о лесе, Г.Ф. Морозов убедительно заметил: «Наше медленно двигающееся вперед лесное хозяйство и лесоводство, усвоив себе западноевропейские начала, начав с «неметчины», стало в последнее время все более и более обнаруживать черты самостоятельного развития… Один из шагов в этом направлении, определяющий собой основное направление всего дальнейшего пути, – есть …учение о типах насаждений»[8].

Вместе с тем, как свидетельствует дискуссия, развернувшаяся много позже, в 1950-е гг., после выхода в свет «Лесохозяйственного словаря-

[8] Цит. по: Погребняк П.С. Основы лесной типологии. Киев, 1959. С. 155.

справочника» [Лесохозяйственный …, 1948-1950], вновь среди вопросов, касающихся неупорядоченной лесохозяйственной и лесотехнической терминологии, возникают конкретные и показательные иллюстрации с различной интерпретацией значения термина «насаждение» [Иванюта, 1958; Невзоров, 1958]. С учетом сказанного, в дальнейшем, вероятно, «жизнь» рассматриваемого термина было бы целесообразно рассмотреть и в новых научно-исторических условиях, и в новых регламентирующих документах.

Заключение. На основе проведенного анализа в статье высказывается предположение о введении в научный оборот и первичной письменной фиксации термина «насаждение» П.А. Перелыгиным в сочинении «Начертание правил лесоводства» (1831). Предложенное ученым-лесоводом общеупотребительное многозначное слово «насаждение» в качестве перевода немецкого термина лесоводства (Bestand) вплоть до конца XIX века активно используется (нередко наряду с «лесонасаждением») в специальном значении, хотя и не получает оформленного терминологического описания (в первом русском «Лесном словаре» (1843–1845) термин отсутствует).

Номинация термина часто оценивается негативно и служит поводом для языковой рефлексии, поисков альтернативных вариантов, среди которых одним из наиболее распространённых оказывается «древостой»[9].

Содержательный объем термина «насаждение» в этот период широко варьируется и с развитием науки о лесе корректируется, а наметившаяся еще с 1870-х гг. тенденция к упорядочению, регламентации и дифференциации русской лесоводственной терминологии получает частичную реализацию, затрагивая и объект нашего внимания, в «Опыте лесоводственного терминологического словаря» (1898) П.Н. Верехи.

Термин «насаждение» в начале XX века как бесспорно укоренившийся, по мнению исследователей, в русской лесной науке, тем не менее получает синонимы (в том числе «лесное сообщество», а позже «лесной фитоценоз») и становится новым фокусом научного познания в лесной типологии. Дискуссия по различным аспектам лесной типологии в XX веке становится следующим этапом в истории «насаждения» и лесоводства.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

[9] Непризнанный изначально термин «древостой», затем используемый как синоним термина «насаждение», как известно, в дальнейшем окончательно обретет законное право в лесоведении в качестве доминанта, эдификатора и главного продуцента насаждения.

Библиографический список

Анненков Н.И. Лесоводство. М., 1851. 216 с.

Васькина Н.В., *Шарапова С.И.* К вопросу о терминологической основе лесотехнических текстов. // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. № 8–2 (27). С. 75–78.

Вереха П.Н. Опыт лесоводственного терминологического словаря. СПб., 1898. 588 с.

Вереха П.Н. Перелыгин, Петр Андрианович // Русский биографический словарь / изд. под наблюдением пред. Имп. Рус. ист. о-ва А. А. Половцова. СПб.: Имп. Рус. ист. о-во, 1902. Т. 13: Павел, преподобный – Петр (Илейка). С. 524.

Гладилина Г.Л. Лексика лесного сплава в аспекте исторического терминоведения русского языка: автореф. дис. … канд. филол. наук. Томск, 2005. 22 с.

Гриднева В.Н. Глагольная лексика лесохозяйственных текстов: автореф. дис. … канд. филол. наук. Л., 1987.16 с.

Добровлянский В.Я. Перелыгин (Петр Андрианович) // Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона. СПб., 1898. Т. XXIII (45). С. 227.

Иванюта В.М. Нужен словарь-справочник лесовода // Лесное хозяйство. 1958. № 6. С. 22.

Итунина А.Л. Особенности формирования языка русской науки в XVIII – начале XIX века // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. № 10(100). Ч.2. С. 149-151.

Кайгородов Д.Н. Русский толковый лесотоварный словарь. СПб., 1883. 169с.

Корш В.П. Задачи и пути лесоводства как науки // Лесной журнал. 1899. Вып. 5. С. 846-857.

Кравчинский Д.М. Лесовозвращение. Основания лесохозяйственного растениеводства. СПб., 1883. 282 с.

Краузе А.К. Народнохозяйственное значение деятелей лесного производства. Варшава, 1891. 295 с.

Лесной словарь: сост. в Деп. корабельных лесов. СПб., 1843–1845. Ч. 1-3.

Лесохозяйственный словарь-справочник: в 2 т. М.-Л., 1948–1950.

Литература русского лесоводства I. Систематический указатель отдельных книг, изданных на русском языке до 1878 года / сост. П. Вереха и А. Рудзкий. СПб., 1878. 208 с.

Лукьянова Л.В. Собичевский vs Кайгородов: полемика конца XIX века по русской лесной терминографии // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: мат. Всерос. науч.-тех. конф. / под. ред. А.А. Добровольского. СПб., 2024. С. 169-171.

Мелехов И.С. Очерк развития науки о лесе: монография. 2-е изд. М.: МГУЛ, 2004. 209 с.

Морозов Г.Ф. О типах насаждений и их значении в лесоводстве // Лесной журнал. 1904. Вып. 14. С. 6–25.

Морозов Г.Ф. Лес как растительное сообщество. СПб., 1913. 44 с.

Невзоров Н.В. О научной лесохозяйственной терминологии // Лесное хозяйство. 1958. № 2. С. 13–16.

Орлов М.М. Судьба понятия «тип насаждения» в русской лесной литературе // Лесопромышленный вестник. 1911. № 50. С. 553–555.

Перелыгин П.А. Начертание правил лесоводства: в 2 ч. СПб., 1831.

Словарь русского языка XVIII века. СПб., 2024. Вып. 14. 281 с.

Сперанская Н.Н. Лесохозяйственная терминология: автореф. дис. … канд. филол. наук. Л., 1984. 16 с.

Турский М.К. Лесоводство. М., 1900. 735 с.

Фельде О.В. Специальная лексика // Эффективное общение (базовые компетенции). Словарь-справочник / под ред. А.П. Сковородникова. Красноярск, 2014. С. 628–629.

References

Annenkov N.I. Forestry. Moscow, 1851. 216 p. (In Russ.)

Dictionary of the Russian language of the 18th century. St. Petersburg, 2024. Vol. 14. 281 p. (In Russ.)

Dobrovlyansky V.Ya. Perelygin (Petr Andrianovich). *Brockhaus and Efron Encyclopedic Dictionary.* St. Petersburg, 1898, vol. XXIII (45), p. 227. (In Russ.)

Felde O.V. Special terminology. *Effective communication* (*Basic Competencies*)*:* Dictionary-Reference book / ed. by A.P. Skovorodnikov. Krasnoyarsk, 2014, pp. 628–629. (In Russ.)

Forest Dictionary: compiled in the Department of Naval Forests. St. Petersburg, 1843–1845. Parts 1-3. (In Russ.)

Forest Management Dictionary-Reference Book: in 2 vol. Moscow-Leningrad, 1948–1950. (In Russ.)

Gladilina G.L. Lexicon of forest transport in the aspect of historical terminology of the Russian language: author's abstract. Diss. Cand. Philol. Sci. Tomsk, 2005. 22 p. (In Russ.)

Gridneva V.N. Verb lexicon of forest management texts: author's abstract. Diss. Cand. Philol. Sci. Leningrad, 1987. 16 p. (In Russ.)

Itunina A.L. Features of the formation of the language of Russian science in the 18-early 19th century. *International Research Journal*, 2020, no. 10(100), part 2, pp. 149-151. (In Russ.)

Ivanyuta V.M. A dictionary-reference book for foresters is needed. *Forestry Management*, 1958, no. 6, p. 22. (In Russ.)

Kaigorodov D.N. Russian explanatory forest-product dictionary. St. Petersburg, 1883. 169 p. (In Russ.)

Korsh V.P. Tasks and ways of forestry as a science. *Forest Journal*, 1899, no. 5, pp. 846-857. (In Russ.)

Krause A.K. The National economic significance of forest production figures. Warsaw, 1891. 295 p. (In Russ.)

Kravchinsky D.M. Reforestation. Foundations of forest management plant cultivation. St. Petersburg, 1883. 282 p. (In Russ.)

Literature of Russian Forestry I. Systematic index of individual books published in Russian before 1878 / comp. by P. Verekha and A. Rudzky. St. Petersburg, 1878. 208 p. (In Russ.)

Lukianova L.V. Sobichevsky vs. Kaigorodov: The end of XIX century polemic on Russian forest terminography. *Forests of Russia: Politics*, *Industry*, *Science*, *Education*: mat. of the All-Russ. sci.-tech. conf. / ed. by A.A. Dobrovolsky. St. Petersburg, 2024, pp. 169-171. (In Russ.)

Melekhov I.S. Essay on the development of forest science: Monograph. 2nd ed. Moscow: MGUL, 2004. 209 p. (In Russ.)

Morozov G.F. On types of plantations and their significance in forestry. *Forest Journal*, 1904, no. 14, pp. 6-25. (In Russ.)

Morozov G.F. The forest as a plant community. St. Petersburg, 1913. 44 p. (In Russ.)

Nevzorov N.V. On scientific forest management terminology. *Forest Management*, 1958, no. 2, pp. 13-16. (In Russ.)

Orlov M.M. The fate of the concept of «type of stands» in Russian forest literature. *Forest Industry Bulletin*, 1911, no. 50, pp. 553–555. (In Russ.)

Perelygin P.A. Description of forestry rules: in 2 parts. St. Petersburg: 1831. (In Russ.)

Speranskaya N.N. Forest management terminology: author's abstract. Diss. Cand. Philol. Sci. Leningrad, 1984. 16 p. (In Russ.)

Tursky M.K. Forest management. Moscow, 1900. 735 p. (In Russ.)

Vas`kina N.V., *Sharapova S.I.* To the question of the terminological background of the forest technical texts. *International Scientific Research Journal*, 2015, № 8-2 (27), pp. 75-78. (In Russ.)

Verekha P.N. A sketch of forestry terminological dictionary. St. Petersburg, 1898. 588 p. (In Russ.)

Verekha P.N. Perelygin, Petr Andrianovich. *Russian Biographical Dictionary* / ed. under the supervision of the President of the Imperial Russian Historical Society A.A. Polovtsov. St. Petersburg, 1902, vol. 13: Pavel, the Venerable – Petr (Ileika), p. 524. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 03.09.2025

Лукьянова Л.В. Термин «насаждение» в истории формирования языка русской лесной науки // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 6–20. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.6-20

Сложный процесс формирования языка русской лесной науки до настоящего времени все еще является малоизученной и востребованной областью исследования. Актуальность изучения терминологической лексики определяется не только ее ролью в системе научного знания, но и признанным авторитетом в выявлении научной рефлексии определенного периода. В статье рассматривается один из ключевых и в то же время дискуссионных терминов в истории русской лесной науки – «насаждение». На основе ретроспективного анализа разножанрового текстового материала предпринимается попытка реконструировать начальный этап формирования и трансформации содержания термина в русском лесоводстве. Высказывается предположение о введении в научный оборот и первичной письменной фиксации термина в сочинении П.А. Перелыгина «Начертание правил лесоводства» (1831). Общеупотребительное многозначное слово «насаждение» в качестве перевода немецкого термина лесоводства (Bestand) широко используется в профессиональном сообществе, хотя и не получает терминографического оформления. Впервые словарную фиксацию термин «насаждение» получает в конце XIX века в «Опыте лесоводственного терминологического словаря» П.Н. Верехи. В исследовании привлекаются значимые естественнонаучные работы второй половины XIX века (Н. И. Анненкова, Д.М. Кравчинского, М.К. Турского, А. К. Краузе и др.), позволяющие детализировать дискуссионные аспекты интерпретации термина в русском лесном научном дискурсе. К началу XX века термин «насаждение», бесспорно укоренившийся, используется чаще, чем «лесонасаждение». Номинация термина нередко расценивается учеными как неудовлетворительная, предпринимаются попытки поиска альтернативных названий, среди которых наиболее распространенным является «древостой». Усиливается тенденция к упорядочению содержательного объема термина, дифференциации его от других понятий (группа, квартал, участок), выделяются признаки классификации насаждений, а затем и объединения в «типы насаждений». Эти дискуссионные процессы продолжаются в первой половине XX века и связаны с проблемами лесной типологии.

Ключевые слова: история российского лесоводства, лесная терминология XIX века, насаждение, лесонасаждение, древостой, П.А. Перелыгин, П.Н. Вереха.

Lukianova L.V. The term «forest stand» in the historical development of Russian forest science terminology. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 6–20 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.6-20

The complex process of forming the language of Russian forest science remains an understudied and relevant area of research to this day. The relevance of studying terminological vocabulary is determined not only by its role in the system of scientific

knowledge but also by its recognized authority in identifying scientific reflection of a certain period. This article examines one of the keys and at the same time controversial terms in the history of Russian forest science – “forest stand” (nasazhdenie) Based on retrospective analysis of diverse textual material, an attempt is made to reconstruct the initial stage of formation and transformation of the content of the term in Russian forestry. It is suggested that the term was introduced into scientific circulation and initially recorded in writing in P. Perelygin's work “Description of Forestry Rules” (1831) (Nachertanie pravil lesovodstva). The commonly used polysemous word “nasazhdenie” as a translation of the German forestry term “Bestand”, has been widely adopted within professional circles despite lacking formal lexicographic definition. The first dictionary entry for the term “nasazhdenie” appears towards the end of the nineteenth century in P. Verekha’s “A Sketch of Forestry Terminological dictionary” (Opyt lesovodstvennogo terminologicheskogo slovarya). Significant natural science works from the second half of the nineteenth century (by N. Annenkov, D. Kravchinsky, M. Tursky, A. Krauze et al.) are utilized to detail the debated aspects of interpreting the term within the Russian forest scientific discourse. By the beginning of the twentieth century, the term “nasazhdenie”, which had undoubtedly taken root, was more frequently employed than “lesonasazhdenie’. Scientists often regarded the nomination of the term as unsatisfactory, leading to attempts to find alternative names, among which the most common was “drevostoy”. There emerged a tendency toward ordering the semantic scope of the term, differentiating it from other concepts (group, quarter, plot), classifying characteristics of stands were highlighted, followed by their grouping into ‘types of stands”. These debates continued during the first half of the twentieth century and were linked with issues of forest typology.

K e y w o r d s : history of Russian forestry, forest terminology of the 19th century, plantation, forest, forest stand, P.A. Perelygin, P.N. Verekha.

ЛУКЬЯНОВА Людмила Владимировна – заведующий кафедрой русского языка Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доцент, кандидат филологических наук. SPIN-код: 6845-0656.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: ruslang@spbftu.ru

LUKIANOVA Ludmila V. – PhD (Philology), Head of the Russian Language Department of St.Petersburg State Forest Technical University, Associate Professor. SPIN-code: 6845-0656.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: ruslang@spbftu.ru

2. ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

УДК 378.14.015.62

А.М. Нацкий

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ ДЛЯ БОРЬБЫ С ЛЕСНЫМИ ПОЖАРАМИ НА ПРИМЕРЕ ХАНТЫ-МАНСИЙСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА – ЮГРА

Введение. Лесной фонд России является одним из крупнейших в мире. Площадь земель лесного фонда страны в 2023 г. составляла 1188,3 млн га, в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре (далее ХМАО) – 50,4 млн га или 4,2% от российского показателя, что является одним из самых высоких показателей обеспеченности регионов лесным фондом. Данное обстоятельство стало решающим в выборе региона для целей обоснования необходимости дополнительного образования специалистов лесной охраны и добровольцев. Лесной фонд играет важную роль в экономике страны, обеспечивая ее древесными ресурсами, выполняя водоохранные, водорегулирующие, санитарно-гигиенические, рекреационные и другие функции. С другой стороны, он сам нуждается в охране, защите и воспроизводстве ресурсов. Одной из самых явных угроз перспективам воспроизводства лесного фонда и развития лесохозяйственного комплекса являются лесные пожары. Они ежегодно наносят огромный материальный ущерб экономике, уничтожая имущество граждан и организаций, объекты социальной инфраструктуры, угрожают жизни и здоровью людей, способствуют ухудшению климата на планете и исчезновению видов животных и растений. Аудиторы Счетной палаты РФ оценили величину экономического ущерба от лесных пожаров в 2022 г. в 14 млрд руб. [Счетная…, 2022]. В него включаются потери древесины на корню (табл. 1), молодняков и лесной продукции[1].

[1] Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 30.07.2021 г. № 616 «Об утверждении методики расчета показателя «ущерб лесным насаждениям от лесных пожаров» федерального проекта «Сохранение лесов» национального проекта «Экология» и признании утратившими силу приказов Федерального агентства лесного хозяйства от 28.03.2019 г. № 470 и от 25.01.2021 г. № 21.

Таблица 1

Сгорело леса на корню, млн куб. м

Standing forest burned, million cubic meters

Регион	1992 г.	2000 г.	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.
Российская Федерация	11,1	39,6	34,5	16,5	30,1	25,4	93,1	28,7	64,3
Ханты-Мансийский автономный округ – Югра	0,00	1,65	0,51	0,64	0,09	0,25	3,21	1,58	15,6

В ХМАО за период с 1992 по 2012 гг. в среднем сгорало на корню 3,9% от аналогичного показателя для всей России.

В отдельные годы доля сгоревших на корню лесов доходила до 24% [Потери…, 2024]. Самые высокие показатели площади лесных пожаров наблюдались в ХМАО в 2022 г. – 434 тыс. га (или 15,4% от всей площади лесных пожаров в России). В остальные периоды за 2009-2023 гг. в среднем площадь лесных пожаров в регионе достигала 66,8 тыс. га (1,7% от аналогичного показателя для всей России) [Площадь…, 2024].

В России, как и в большинстве стран, силы пожарной охраны лесов на 78% сформированы за счет добровольцев. Это объясняется экономической нецелесообразностью организации стационарных пожарных подразделений на отдаленных территориях [Маштаков и др., 2019]. В результате развития законодательных основ пожарного дела и волонтерства[2,3,4] с каждым годом растет количество населения, вовлеченного в мероприятия по охране, защите и воспроизводству лесов, тушению лесных пожаров: в 2022 г. – 1,127 млн чел., в 2023 г. – 1,573 млн чел. В научной литературе хорошо освещены вопросы создания и основные принципы организации добровольных пожарных служб в муниципальных образованиях, предложены направления совершенствования их деятельности [Малышев, Чиж, 2020; Гаврюшенко, 2022; Беда и др., 2023], но уделено недостаточно внимания вопросам обучения населения средствам и методам борьбы с пожарами, в т. ч. в системе дополнительного образования.

[2] Федеральный закон «О пожарной безопасности» от 21.12.1994 г. ФЗ-№69.

[3] Федеральный закон «О добровольной пожарной охране» от 6.05.2011 г. ФЗ-№100.

[4] Распоряжение Правительства РФ от 27.12.2018 г. № 2950-р «Об утверждении Концепции развития добровольчества (волонтерства) в Российской Федерации до 2025 года».

Кроме того, переход высшей школы от специалитета к бакалавриату повлиял на снижение качества обучения инженерных кадров за счет сокращения теоретической подготовки, практических занятий и перехода на дистанционные формы обучения в условиях недостаточно высокой мотивации студентов к обучению [Сиваков, Заикин, 2024]. Есть ряд исследований, касающихся методов, технологий и направлений повышения эффективности обучения работников предприятий лесного хозяйства в условиях цифровизации управления, среди которых можно назвать электронные курсы, мультимедийные технологии, применение виртуальных симуляторов [Сиваков, Заикин, 2024], нейронные сети и модели прогнозирования возникновения пожаров [Ямашкин, Ямашкина, 2020; Дивильковский, 2022], беспилотные летательные аппараты [Богданов, 2022] и другие средства обучения.

Как показывают исследования ученых, ускоренные процессы информатизации всех сторон жизни общества приводят к ежегодному обновлению практических знаний на 20%. Усложнение внешних вызовов и угроз предъявляет повышенные требования к уровню профессиональной подготовки и квалификации специалиста. Это значит, что каждый специалист минимум один раз в пять лет должен существенно обновлять свои знания, повышая профпригодность [Костюк, 2022]. Бывает и так, что вузы не успевают своевременно наладить образовательный процесс в отношении новых, недавно возникших на рынке компетенций [Калегина, 2020].

В пользу развития системы обучения населения и специалистов также говорит тот факт, что антропогенная нагрузка считается одним из решающих факторов в оценке лесопожарного риска. Именно поэтому статистика, теоретические исследования, методики оценки пожарного риска ставят во главу человеческий фактор как причину лесных пожаров (74% случаев) [Белов, 2023]. Так, основная причина возгораний лесов кроется в халатном попустительстве отдельных должностных лиц при выполнении контрольных функций, что выражается в приостановке или даже прекращении тушения пожаров по неизвестным причинам; нарушении сроков, указанных в утвержденных инструкциях, по организации сил и средств в тушении пожаров; несвоевременном мониторинге и извещении ответственных лиц и общественности о «горячих точках», площади их распространения и динамике продвижения огня; недостаточной укомплектованности пожарных станций оборудованием, техникой, материалами. Недостаточно оперативно налажены процедуры тушения пожаров в темное время суток. Имеет место формальный подход в оценке готовности пожарных подразделений к очередно-

му сезону [Белов, 2023]. Отметим, что в Лесном плане ХМАО на 2019-2028 гг. по статье затрат на научно-исследовательскую и образовательную деятельность средства не заложены. Соответственно, списочный состав организаций, отвечающих за охрану лесов от пожаров, на территории ХМАО в пожароопасный сезон включает только основного исполнителя – уполномоченное бюджетное учреждение ХМАО, крупнейших товаропроизводителей региона преимущественно из энергетической и коммунальной сфер экономики, а также торговли, учреждение социально-культурного назначения – музей. В списке отсутствуют образовательные центры, центры повышения квалификации работников, которые должны заниматься профилактическими мерами. Следовательно, образовательная деятельность, в т.ч. дополнительное профессиональное образование, не входит в систему противопожарных мероприятий по лесам. Это не помешало в Лесном плане сделать вывод о полной готовности региона к пожароопасному сезону.

Итак, необходимость организации и/или повышения эффективности дополнительного образования специалистов лесной охраны и добровольных лесных пожарных в условиях динамичных изменений в социально-экономической и экологической сферах назрела как никогда.

Целью данного исследования является изучение современного состояния дел в сфере информационного и технического обеспечения дополнительного образования специалистов лесной охраны и добровольных лесных пожарных, разработка рекомендаций по повышению эффективности такого дополнительного образования.

Научная значимость исследования заключается в разработке принципов организации образовательного процесса в системе дополнительного профессионального образования специалистов и добровольцев в сфере пожарной безопасности, обучающих модулей программы подготовки, определении суммы затрат на обучение и их окупаемости. Практическая значимость работы заключается в возможности использования рекомендаций обучающими центрами в непосредственной деятельности и органами власти в планировании работ по пожарной безопасности лесов.

Материалы и методика исследования. В статье приведены основные принципы организации и направления повышения эффективности дополнительного образования работников служб пожарной охраны лесов и добровольцев. Проанализирован ряд работ российских исследователей, касающихся вопросов повышения эффективности обучения, в том числе с применением новых цифровых технологий на примере отношений по

охране лесного фонда региона. Использованы системный подход, монографический, экономико-статистические методы исследования.

Результаты исследования. Представляется, что решать проблемы повышения уровня пожарной безопасности лесов необходимо через развитие сети дополнительного образования в первую очередь в университетах, а основным средством решения проблем являются специальные образовательные программы.

Система дополнительного образования специалистов и добровольных лесных пожарных должна строиться на следующих принципах:

1. Принцип социально-педагогической многомерности должен составлять базу для качественного дополнительного профессионального образования специалиста лесного профиля. Принцип означает возможность формирования профессиональных компетенций специалиста за счет интеграции знаний из разных областей науки и образовательных дисциплин [Дорожкин, Зеер, 2014];

2. Принцип нарастающего развития личности означает, что процесс обучения проходят, как правило, люди с большим опытом, состоявшиеся личности с убеждениями, неоднократно подтвержденными на практике, которые не хотят ограничивать обучение простым прослушиванием лекций, запоминанием материала. Для них важно сформировать навыки и умения применять полученные новые знания в профессиональной деятельности, углублять профессиональные компетенции. Поэтому преподаватели в системе дополнительного образования должны стремиться по максимуму использовать целый ряд апробированных на практике педагогических инструментов. Среди них обязательно должно быть интерактивное общение с аудиторией в форме вопросов-ответов, дискуссий, обсуждений проблемных ситуаций, мозговых штурмов, собеседований, ролевых игр. Такие способы ведения образовательного процесса позволяют слушателям самостоятельно обосновывать свою точку зрения, создавать имитационные модели реальных хозяйственных ситуаций, предлагать неординарные решения проблем, проявлять креативность в мышлении, тренировать навыки оперативной коммуникации;

3. Принцип самостоятельности в обучении должен стать доминирующим. Именно самостоятельная подготовка обучающегося, например, выполнение домашних заданий, становится основным видом учебной работы слушателей. Прошлый профессиональный опыт обучающегося становится одним из источников информации, необходимой для обучения;

4. Принцип учета индивидуальных потребностей обучающихся;

5. Дополнительное образование должно быть непрерывным, включающим все ступени: повышение квалификации, профессиональную переподготовку, стажировку и самообразование;

6. Преподаватели должны быть знакомы с современными методами обучения, а также с особенностями работы лесных пожарных, уметь применять в обучении цифровые тренажеры, которые помогают обучающимся осваивать навыки работы с пожарным оборудованием в безопасной обстановке;

7. Оценка эффективности дополнительного профессионального образования должна осуществляться с учетом результатов практической деятельности работников лесного хозяйства. В ее основе должна быть система экономических показателей;

Автор предлагает следующее основное содержание обучающих блоков в программах дополнительного образования, разработанное с учетом изучения опыта борьбы с лесными пожарами в ХМАО:

1. Блок методологических основ преподавания. Необходим для понимания объективных системных противоречий, сложившихся в практике профессионального образования работников лесного профиля, которые надо учитывать при разработке обучающих модулей. Первое противоречие заключается в разрыве между возросшей потребностью общества в модернизированном дополнительном образовании специалистов, отвечающем современным требованиям рынка труда и обеспечивающем высокий уровень их эффективности и конкурентоспособности, и отсутствием методологически обоснованных научных подходов к организации работы образовательных учреждений, занимающихся повышением квалификации специалистов лесного профиля. Второе противоречие возникает между необходимостью социализации личности, повышения социальной активности и мобильности, адаптации личности к новым условиям жизнедеятельности и выполнению государственных задач по рациональному использованию лесных ресурсов и отсутствием научно обоснованных педагогических средств и технологий, которые способны обеспечить такое развитие личности, повысить самооценку обучающегося в осознании своих ролевых профессиональных функций. Третье противоречие неизбежно возникает между имеющимся в распоряжении преподавателей научно-методическом обеспечении преподавания и недостаточной разработанностью и укомплектованностью учебного процесса дидактическими единицами, позволяющими на высоком уровне

провести процесс повышения квалификации специалистов лесного профиля и добровольцев;

2. Блок правовых основ противопожарной деятельности в лесах. Предполагает изучение: специальных правил, норм и требований в сфере пожарной безопасности лесов, обязательных для всех участников таких общественных отношений, а также эффективное обеспечение их соблюдения; профессиональных стандартов в сфере лесного хозяйства, включая профессиональные стандарты лесопожарного направления; правил охраны труда и безопасности жизнедеятельности при выполнении лесопожарных работ (работа только в составе организованной группы, следование правилам пожарной безопасности, осмотрительное и предупредительное обращение с огнем, осторожное передвижение по лесным массивам, применение средств индивидуальной защиты в соответствии с предполагаемым риском, наблюдение за состоянием лесной подстилки, лесных насаждений и почв); уголовно-правовых, гражданско-имущественных, административных основ вменения юридической ответственности за нарушения требований пожарной безопасности;

3. Блок вопросов по работе с пожарно-техническим оборудованием, моторным инструментом. Предполагает изучение новых технологий в области тушения лесных пожаров, профилактики пожаров, проведения аварийно-спасательных работ, мониторинга пожарной опасности в лесах и лесных пожаров;

4. Организационно-методические основы тушения пожаров. Блок предполагает изучение основ планирования:

- качественного и количественного состава сил подразделений пожарной охраны и аварийно-спасательных расчетов, материальных средств обеспечения их оперативной деятельности, которые могут быть привлечены также и в порядке межведомственного и межрегионального взаимодействия к тушению лесных пожаров;
- резерва пожарной техники и оборудования, противопожарного снаряжения и противопожарного инвентаря, транспортных средств и горюче-смазочных материалов;
- лесопожарных расчетов и их оснащения пожарной техникой и оборудованием, подлежащих включению в межрегиональный план маневрирования сил противопожарной обороны;
- материально-технического обеспечения наблюдательных пунктов и специализированной диспетчерской службы;

• авиационных или наземных маршрутов патрулирования;

• участия в государственных закупках или государственных заданиях на выполнение работ по тушению лесных пожаров;

• методик кратко-, средне-, долгосрочного прогнозирования лесных пожаров;

• моделей поведения человека с учетом имеющегося уровня культуры безопасного поведения жителей населенных пунктов, позволяющих избегать прямого и косвенного столкновения с огнем.

Блок предполагает изучение актуальной статистики, характеризующей динамику показателей по площадям и видам лесных пожаров, задействованных сил пожарных команд, схем функционирования диспетчерских служб, схем оперативного обмена информацией о распространении пожаров, организационно-методических документов и локальных правовых актов (соглашений сторон) о привлечении сил и средств пожаротушения при борьбе с лесными пожарами, порядка формирования единого для всех заинтересованных сторон плана тушения лесных пожаров на период пожароопасного сезона;

5. Блок навыков командной работы. Цифровые игры и упражнения могут помочь обучающимся развить навыки командной работы и коммуникации, которые необходимы для эффективной работы в составе пожарного расчета. Здесь также предполагается отработка технологий информационного и технического взаимодействия с органами местного самоуправления по вопросам пожарной безопасности. Модуль предполагает обучение основам информационного обеспечения и противопожарной пропаганды;

6. Блок технологий продвижения профилактической работы. Включает в себя изучение различных каналов промоушена просветительской деятельности в средствах массовой информации, на транспорте, в сети Интернет, непосредственно в лесных массивах и рекреационных зонах, в буклетах, сувенирах, праздничной полиграфической продукции, на выносных стационарных стендах, в выступлениях политиков и представителей власти, в образовательных учреждениях, на предприятиях.

Например, в четвертом обучающем модуле могла бы быть освещена следующая статистика по ХМАО. Если в 2020 г. в тушении пожаров были задействованы работники авиапожарных команд в количестве 5502 чел., в т.ч. в среднем 8 человек на 1 пожар, включая межрегиональное маневрирование, то в 2023 г. – только 3428 работников авиапожарных команд или 7,1 работника на 1 пожар. 90% пожаров по площади приходится на низовые

пожары. Горели в основном эксплуатационные леса, иногда защитные. Основным способом обнаружения лесного пожара было проведение лесоавиационных работ.

Происходило улучшение показателей результативности в работе пожарных. Так, в 2020 г. в момент обнаружения средняя площадь одного пожара была в размере 23 га, максимальное значение средней площади пожара составляло 294 га. В 2023 г. в момент обнаружения средняя площадь одного пожара составляла всего 4 га, максимальное значение средней площади пожара было 90 га.

Для организации оперативного тушения пожара потребовалось заранее спланировать:

- распределение земель на зоны охраны лесов от пожаров с соответствующими способами охраны (с использованием наземных, авиационных, космических средств) и на зоны контроля средствами авиационного патрулирования, территории лесного фонда с указанием класса природной пожарной опасности (средний класс природной пожарной опасности в ХМАО – 4,1), выделить наиболее подверженные пожарам районы для последующего возможного сосредоточения там противопожарных сил и средств;
- длительность пожароопасного сезона (в ХМАО по среднестатистическим данным он имеет продолжительность от 120 до 140 дней);
- кадровое и материально-техническое обеспечение подразделений охраны, например, специализированной диспетчерской службы «База авиационной и наземной охраны лесов» Департамента недропользования и природных ресурсов ХМАО–Югры: численность летчиков-наблюдателей, парашютистов-пожарных, десантников-пожарных, инструкторов авиапожарных служб, лесных пожарных, количество мотопомп, бензопил, воздуходувок, зажигательных аппаратов, ранцевых огнетушителей, радиостанций и другое обеспечение;
- схему функционирования диспетчерской службы с указанием максимального времени оповещения о пожаре (до 18 минут на территории ХМАО);
- схему оперативного обмена информацией о пожарной опасности и лесных пожарах с указанием максимального времени обмена информацией (в ХМАО до 20 минут).

Расходы на обеспечение охраны, защиты, воспроизводства лесов в России кратно возросли за последние 3-4 года. Например, финансирование

расходов в ХМАО за 4-й квартал 2023 г. составило такую же сумму, что и за весь 2020 г. (6,1 млрд руб., в т.ч. расходы на ликвидацию пожаров 1,4 млрд. руб.). В 2024 г. данные расходы составят 1,591 млрд руб. Если выделять из этих расходов хотя бы по 1% средств ежегодно на развитие дополнительного образования, суммы могли бы быть значимыми – более 14 млн руб. В Лесном плане ХМАО за 2024-2028 гг. спланированы доходы от реализации лесной продукции в сумме 31,6 млрд руб., расходы на лесное хозяйство – 11,6 млрд руб. Прибыль в лесном хозяйстве составит 20,0 млрд руб. Расходы на борьбу с пожарами за этот же период примем в размере 8,0 млрд руб. (табл. 2).

Таблица 2

Обоснование окупаемости затрат на охрану лесов от пожаров

Justification of the payback of expenses for forest fire protection

Наименование показателя	2024 г.	2025 г.	2026 г.	2027 г.	2028 г.	2024–2028 гг.
Рыночная стоимость лесной продукции, тыс. руб.	5839934	6073531	6316473	6569131	6831897	31630966
Расходы на развитие лесного хозяйства в Лесном плане ХМАО, тыс. руб.	2306623	2245259	2283779	2319618	2419556	11574836
Прибыль, тыс. руб.	3533311	3828272	4032693	4249513	4412340	20056129
Расходы на охрану лесов от пожаров, млрд руб.	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	8,0
Окупаемость затрат, год	x	x	x	x	x	0,40

В т. ч. расходы на организацию и/или повышение эффективности дополнительного профессионального образования примем в размере около 1% от расходов на охрану лесов от пожаров – 76 млн руб. Из них значительные суммы следует направить на реализацию как традиционных технологий обучения, так и новых технологий (электронные курсы, контроллеры для взаимодействия пользователя с виртуальными объектами, позволяющие имитировать тактильные и температурные ощущения, нейроинтерфейсы, позволяющие подключаться к нервной системе человека, другие компоненты виртуальной и дополненной реальности).

Изучение работ зарубежных исследователей показало, что особое значение в планировании природоохранных мероприятий отводится пространственным данным – знаниям, нанесенным на карту. Такие данные позволяют дополнить информацию, содержащуюся в лесных кадастрах, информацией об угрозах для сохранения лесов и субъектах-носителях угроз. Пространственные данные необходимо внедрять в институциональные механизмы управления лесным фондом [Somuah et al., 2021]. Другой перспективной цифровой технологией управления является использование искусственного интеллекта в беспилотных летательных аппаратах. Он предназначен для распознавания человеческих криков, других сигналов бедствия, тепла тела. Такие технологии могут применяться для поиска пострадавших от стихийных бедствий, доступ к которым спасательным командам может быть затруднен [Papyan et al., 2024].

Опыт реализации технологии виртуальной и дополненной реальности в других отраслях экономики, например, в строительстве, показывает, что этих средств (76 млн руб.) хватило бы на аренду помещений, инвестиции в оборудование, подготовку методического обеспечения и на текущие эксплуатационные расходы. Окупаемость затрат на обучение за счет прибыли, образуемой в лесном комплексе, составит 0,4 года. Технологии позволяют не только наблюдать, слушать, запоминать, но и взаимодействовать с цифровой средой и объектами в ней. Благодаря этому человек проходит обучение максимально эффективно и в максимально короткие сроки.

Обсуждение. При такой системе обучения, на наш взгляд, исключен разрыв в компетенциях, который возникает у давно работающих специалистов, чьи учебные планы подготовки не включали большую часть вышеизложенных обучающих модулей, и у вновь подготовленных кадров. Внедрение новых образовательных технологий даст работодателям возможность оценить текущую ситуацию и быстро устранить существующие пробелы в квалификации работников в этой области.

Такое обучение позволяет создать модель будущей профессиональной деятельности, где новые знания используются как база для практического применения. При активном и своевременном обучении результативность будет значительно выше. В результате усвоенные знания эффективно внедряются в профессиональную практику.

Заключение. Эффективность дополнительного профессионального образования зависит от его методологической обоснованности, соответствия

содержания и технологий обучения потребностям работников лесного хозяйства, а также от организации учебного процесса. Результаты проведенного исследования могут быть использованы для разработки новых программ дополнительного профессионального образования, повышения квалификации преподавателей дополнительного профессионального образования, а также для оценки эффективности дополнительного профессионального образования.

Такая система обучения в области охраны лесов от пожаров должна быть построена по всей управленческой вертикали, начиная от территориальных отделов лесничеств и заканчивая департаментами недропользования и природных ресурсов в регионах. При отсутствии разъяснительной работы и профподготовки ответственных работников невозможно делать вывод о полной готовности регионов к пожароопасному сезону.

Образовательные мероприятия способствуют созданию и укреплению специализированных служб и добровольной пожарной охраны. Они помогут обучить население основам безопасности жизнедеятельности, повысить интерес к профессиям пожарного и спасателя, а также снизить последствия чрезвычайных ситуаций, количество пожаров и число жертв, сделают жизнь в отдаленных населенных пунктах более интересной и насыщенной.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Беда Н.В., *Чистякова А.А.*, *Сидоркин В.А.*, *Сурков А.И.* Некоторые предпосылки совершенствования добровольной пожарной охраны в Российской Федерации // Системы безопасности: мат. межд. науч.-тех. конф. 2023. № 32. С. 473-480.

Белов А.Н. Лесные пожары как угроза пожарной безопасности: современное состояние и предупреждение // Вестник экономики, управления и права. 2023. Т. 16, № 1. С. 62-70.

Богданов А.П. Использование беспилотного воздушного судна для повышения эффективности оценки качества лесных культур при дискретной обработке почв // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2022. № 62. С. 11-14.

Гаврюшенко В.П. Проблемы и перспективы расширения деятельности добровольной пожарной охраны в муниципальных образованиях // Вестник НЦБЖД. 2022. № 3(53). С. 78-85.

Дивильковский М.М. Использование машинного обучения для повышения эффективности реагирования на лесные пожары // Конференциум АСОУ: сб. науч. тр. и мат. науч.-практ. конф. 2022. № 3. С. 340-349.

Дорожкин Е.М., *Зеер Э.Ф.* Методология профессионально-педагогического образования: теория и практика (теоретико-методологические основания профессионально-педагогического образования) // Образование и наука. 2014. № 9(118). С. 4-20.

Калегина Ю.В. Подготовка специалистов к просветительской работе с населением по профилактике лесных пожаров // Евразийский союз ученых. 2020. № 4-8(73). С. 30-33.

Костюк А.В. Повышение эффективности обучения в системе дополнительного профессионального образования // Вестник Санкт-Петербургского военного института войск национальной гвардии. 2022. № 1(18). С. 115-120.

Малышев Д.А., *Чиж И.П.* Обеспечение пожарной безопасности силами добровольной пожарной охраны (на примере Республики Коми) // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. 2020. № 3(7). С. 296-299.

Маштаков В.А., *Бобринев Е.В.*, *Удавцова Е.Ю.*, *Маторина О.С.* Исследование деятельности добровольной пожарной охраны в Российской Федерации и зарубежных странах // Современные проблемы гражданской защиты. 2019. № 3(32). С. 5-13.

Площадь лесных пожаров на землях лесного фонда // Росстат. URL: https://fedstat.ru/indicator/38496 (дата обращения: 20.08.2024 г.)

Потери лесного хозяйства вследствие лесных пожаров // Росстат. URL: https://fedstat.ru/indicator/31434 (дата обращения: 20.08.2024 г.).

Сиваков В.В., *Заикин А.Н.* Повышение эффективности обучения сотрудников предприятий лесного комплекса в условиях цифровизации // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 248. С. 243-256.

Счетная палата назвала сумму ущерба от лесных пожаров // Парламентская газета. 2022. URL: https://www.pnp.ru/social/schetnaya-palata-nazvala-summu-ushherba-ot-lesnykh-pozharov.html?ysclid=m4ny9eu91544637 868 (дата обращения: 03.08.2025)

Ямашкин С.А., *Ямашкина Е.О.* Повышение эффективности алгоритмов глубокого машинного обучения для раннего обнаружения и прогнозирования развития лесных пожаров // Перспективы науки. 2020. № 9(132). С. 58-60.

Papyan N., *Kulhandjian M.*, *Kulhandjian H.*, *Aslanyan L.* Ai-based drone assisted human rescue in disaster environments: challenges and opportunities // Pattern Recognition and Image Analysis. Advances in Mathematical Theory and Applications. 2024. Vol. 34, iss. 1. P. 169-186.

Somuah D.P., *Ros-Tonen M.A.F.*, *Baud I.* Local Spatialized Knowledge of Threats to Forest Conservation in Ghana's High Forest Zone // Environmental Management. 2021. Vol. 68, iss. 5. P. 738-754. DOI: 10.1007/s00267-021-01455-0.

References

Accounts Chamber named the amount of damage from forest fires// Парламентская газета. 2022. URL: https://www.pnp.ru/social/schetnaya-palata-nazvala-summu-ushherba-ot-lesnykh-pozharov.html?ysclid=m4ny9eu91544637 868 (date of access: 03.08.2025)

Beda N.V., *Chistyakova A.A*., *Sidorkin V.A*., *Surkov A.I.* Some prerequisites for improving voluntary fire protection in the Russian Federation. *Security Systems: mat. of the int. sci.-tech. conf*., 2023, vol. 32, pp. 473-480. (In Russ.)

Belov A.N. Forest fires as a threat to fire safety: co-temporary condition and warning. *Bulletin of Economics*, *Management and Law*, 2023, vol. 16, iss. 1, pp. 62-70. (In Russ.)

Bogdanov A.P. The use of unmanned aircraft to increase the efficiency of assessing the quality of forest crops in the discreet treatment of soils. *Current problems of the forest complex*, 2022, vol. 62, pp. 11-14. (In Russ.)

Divilkovsky M.M. The use of machine learning to improve the effectiveness of response to forest fires. *ASOU Conference: a collection of scientific works and mat. of sci.-pract. conf*., 2022, vol. 3, pp. 340-349. (In Russ.)

Dorozhkin E.M., *Zeer E.F.* Methodology of vocational education: theory and practice (theoretical and methodological foundations of vocational education). *Education and science*, 2014, vol. 9(118), pp. 4-20. (In Russ.)

Forest fires square on the forest fund lands // Rosstat. URL: https://fedstat.ru/indicator/38496 (accessed: 20.08.2024). (In Russ.)

Forestry losses due to forest // Rosstat. URL: https://fedstat.ru/indicator/38496 (accessed: 20.08.2024). (In Russ.)

Gavryushenko V.P. Problems and prospects for expanding the activities of voluntary fire protection in municipalities. *Bulletin of the NCBZhD*, 2022, vol. 3(53), pp. 78-85. (In Russ.)

Kalegina Yu.V. Training of specialists for educational work with the population on forest fire prevention. *Eurasian Union of Scientists*, 2020, vol. 4-8(73), pp. 30-33. (In Russ.)

Kostyuk A.V. Increasing the effectiveness of training in the system of additional vocational education. *Bulletin of the St. Petersburg Military Institute of the National Guard*, 2022, vol. 1(18), pp. 115-120. (In Russ.)

Malyshev D.A., *Chizh I.P.* Ensuring fire safety by voluntary fire protection (using the example of the Komi Republic). *Hot and technosphere safety: problems and ways to improve*, 2020, vol. 3(7), pp. 296-299. (In Russ.)

Mashtakov V.A., *Bobrinev E.V*., *Udavtsova E.Yu*., *Matorina O.S.* Follow the activities of voluntary fire protection in the Russian Federation and foreign countries. *Modern problems of civil protection*, 2019, vol. 3(32), pp. 5-13. (In Russ.)

Papyan N., *Kulhandjian M*., *Kulhandjian H*., *Aslanyan L*. Ai-based drone assisted human rescue in disaster environments: challenges and opportunities. *Pattern*

Recognition and Image Analysis. Advances in Mathematical Theory and Applications, 2024, vol. 34, iss. 1, pp. 169-186.

Sivakov V.V., *Zaikin A.N.* Improving the effectiveness of training co-workers of forestry enterprises in the context of digitalization. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2024, iss. 248, pp. 243-256. (In Russ.)

Somuah D.P., *Ros-Tonen M.A.F.*, *Baud I.* Local Spatialized Knowledge of Threats to Forest Conservation in Ghana's High Forest Zone. *Environmental Management*, 2021, vol. 68, iss. 5, pp. 738-754. DOI: 10.1007/s00267-021-01455-0.

Yamashkin S.A., *Yamashkina E.O.* Improving the efficiency of deep machine learning algorithms for early detection and forecasting of forest fire development. *Prospects for science*, 2020, vol. 9(132), pp. 58-60. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 03.09.2024

Нацкий А.М. Усовершенствование системы подготовки кадров для борьбы с лесными пожарами на примере Ханты-Мансийского автономного округа – Югра // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 21–37. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.21-37

Повышение эффективности дополнительного профессионального образования работников служб пожарной охраны лесов и добровольцев является весьма актуальным направлением исследования не только для Ханты-Мансийского автономного округа – Югры, но и для всех регионов России, в которых есть лесной фонд. Целью исследования является изучение современного состояния дел в сфере дополнительного образования специалистов лесной охраны и добровольных лесных пожарных, разработка рекомендаций по повышению эффективности такого дополнительного образования. Задачами исследования стали: анализ сумм экономического ущерба, причиненного лесными пожарами в автономном округе, количества добровольцев, вовлеченных в дело охраны, защиты, воспроизводства лесов, состояния дел по дополнительному обучению специалистов и добровольцев, экономическое обоснование затрат по развитию системы дополнительного образования работников пожарных служб. Сформулированы принципы организации дополнительного образования, изложено содержание обучающих модулей, определены суммы затрат на организацию обучения. Подробно раскрыто содержание четвертого обучающего модуля, связанного с освещением достигнутых результатов в работе пожарных служб с помощью статистических показателей. Основными показателями результативности работы пожарных являются: среднее количество работников, задействованных на одном пожаре, средняя площадь одного пожара в момент обнаружения. Приведены фактические значения данных показателей, свидетельствующие о повышении

результативности работы пожарных. Обосновано внедрение новых образовательных технологий в обучающий процесс и окупаемость затрат. Предложенные в данном исследовании мероприятия могли бы логически дополнить сложившуюся систему мероприятий по охране лесов, утвержденную в документе стратегического планирования развития лесного комплекса – Лесном плане ХМАО за 2019-2028 гг., способствовать повышению эффективности работы пожарных.

Ключевые слова: лесной план, дополнительное профессиональное образование, лесные пожары, лес, эффективность.

Natskiy A.M. Improvement of the personnel training system for fighting forest fires: a case study of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Ugra. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 21–37 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.21-37

Improving the effectiveness of additional professional education of employees of forest fire protection services and volunteers is a very relevant area of research not only for the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Ugra, but also for all regions of Russia that have a forest fund. The purpose of the study is to examine the current state of affairs in the field of additional education of forest protection specialists and voluntary forest firefighters, to develop recommendations for improving the effectiveness of such additional education. The objectives of the study were: analysis of the amount of economic damage caused by forest fires in the autonomous region, the number of volunteers involved in the conservation, protection, reproduction of forests, the state of affairs for additional training of specialists and volunteers, the economic justification of the costs of developing a system of additional education for fire service workers. The principles of organization of additional education are formulated, the content of training modules is outlined, the amount of costs for organizing training is determined. The content of the fourth training module related to highlighting the results achieved in the work of fire services using statistical indicators is disclosed in detail. The main performance indicators of firefighters are: the average number of workers involved in one fire, the average area of one fire at the time of detection. The actual values of these indicators are given, which indicated an increase in the performance of firefighters. The introduction of new educational technologies into the educational process and the return on costs are justified. The measures proposed in this study could logically supplement the existing system of forest protection measures approved in the strategic planning document for the development of the forestry complex – the Forest Plan of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug for 2019-2028, and contribute to improving the efficiency of firefighters.

Keywords: forest plan, additional professional education, forest fire, forest, efficiency.

НАЦКИЙ Александр Михайлович – аспирант кафедры ЛТ-1 Мытищинского филиала Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана. SPIN-код: 7428-4996. ORCID: 0009-0000-2867-1103 ResearcherID: LEN-1212-2024.

141005, ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, Московская область, Россия. E-mail: alex.natsky@mail.ru

NATSKIY Aleksandr Mikhailovich – PhD student, Department of LT-1, Bauman Moscow State Technical University (Mytishchi Branch). SPIN-code: 7428-4996. ORCID: 0009-0000-2867-1103 ResearcherID: LEN-1212-2024.

141005. 1st Institutskaya str. 1. Mytishchi. Moscow region. Russia. E-mail: alex.natsky@mail.ru

УДК 630*532

В.А. Усольцев, В.П. Часовских

МУЛЬТИКОЛЛИНЕАРНОСТЬ ПЕРЕМЕННЫХ В ЕВРАЗИЙСКОЙ БАЗЕ ДАННЫХ О ФИТОМАССЕ ДЕРЕВЬЕВ И ВСЕОБЩАЯ АЛЛОМЕТРИЯ

Введение. В связи с изменением климата лесная фитомасса обретает исключительное экологическое значение планетарного уровня. Для ее оценки необходимы легко реализуемые методы, одним из которых является метод аллометрических моделей [Zianis, Mencuccini, 2004]. Его история восходит к концу XIX века, когда было установлено, что связи между массой отдельных частей и целого организма у различных видов можно описать степенной (аллометрической) функцией (1) [Snell,1892]:

$$Y = a\,X^{b}, \qquad (1)$$

где X может обозначать массу особи данного вида или её размер, а Y – массу того или иного органа особи; a и b – аллометрические коэффициенты, определяемые по эмпирическим данным [Zianis, Mencuccini, 2004].

Помимо аппроксимирующей роли, аллометрическую модель (1) в качестве всеобщей стали использовать в теоретическом аспекте: в частности, она была положена в основу теории метаболического масштабирования [West et al., 1997], фрактальной модели [West et al., 1999], теории адаптивного распределения масс [Poorter et al., 2015], в которых параметрам модели стали придавать определенные биологические смыслы. Тем не менее, было показано, что чисто эмпирическая «всеобщая» аллометрическая модель (generic, generalized, common model) «фитомасса – диаметр ствола», полученная аппроксимацией мировых баз данных для нескольких древесных видов, даёт более высокую точность оценки фитомассы по сравнению с теоретическими моделями, имеющими стабильные значения аллометрических коэффициентов [Усольцев и др., 2006; Zianis, Mencuccini, 2004]. Ценность аллометрических моделей заключается в том, что они позволяют оценивать фитомассу без трудоемкого деструктивного выборочного учета, т.е. без рубки деревьев, фракционирования, взвешивания и сушки компонентов фитомассы. На сегодня подобные аллометрические модели разного уровня обобщения для многих древесных и кустарниковых видов исчисляются десятками тысяч [Ter-Mikaelian, Korzukhin, 1997; Jenkins et al.,

2004; Muukkonen, Mäkipää, 2006; Falster et al., 2015; Luo et al., 2020; Jucker et al., 2022]. Тем не менее известно, что фитомасса дерева определяется не только диаметром ствола (простая аллометрия), но также высотой и возрастом дерева, густотой древостоя как характеристикой конкурентных отношений и т. д. (многофакторная аллометрия), и результаты подобных исследований довольно многочисленны [Усольцев, 1988; Sawadogo et al., 2010; Zeng, 2017; Dutcă et al., 2018; Lin et al., 2023].

Однако при расчете многофакторных моделей обычно не учитывалась мультиколлинеарность независимых переменных, существенно снижающая устойчивость моделей. Известно, что для проверки переменных на мультиколлинеарность используется коэффициент инфляции дисперсии (Variance Inflation Factor, VIF) [Marcoulides, Raykov, 2019], но далеко не всегда. В то же время, допускаемое значение VIF не является статистически обусловленным: оно предлагалось, с одной стороны, равным менее 10 [Chatterjee et al., 2000], а с другой – менее 2 [Graham, 2003]. Исходя из статистической неопределенности VIF, согласно предложенному «эмпирическому правилу» [Chatterjee, Simonoff, 2013] или по молчаливому согласию стали считать допустимым значение VIF, равное 5,0 [Репина и др., 2019]. В связи с этим исследователю приходится обеспечивать, с одной стороны, учет максимального числа действующих факторов, но, с другой стороны, минимизировать их количество по условию приемлемого уровня мультиколлинеарности.

В 2023 г. была опубликована последняя, дополненная версия базы данных о фитомассе и таксационных показателях около 16 тысяч модельных деревьев основных лесообразующих видов Евразии [Усольцев, 2023]. Поскольку это наиболее полная на сегодня база данных, представляет интерес выяснить ее возможности в плане построения всеобщих моделей фитомассы, корректных по условию мультиколлинеарности независимых переменных.

В нашем исследовании предпринята попытка на основе наиболее полной на сегодня базы данных о фитомассе деревьев оптимизировать структуру многофакторной модели фитомассы по условию приемлемой мультиколлинеарности независимых переменных.

Объекты и методы исследования. Для достижения поставленной цели из авторской базы данных [Усольцев, 2023] отобрано 11170 модельных деревьев с измеренными таксационными показателями, а также надземной и подземной фитомассой. Надземная фитомасса определена у всех 11170 модельных деревьев, фитомасса корней – только у 1514 деревьев (13% от

общего количества). Характеристика исходных данных фитомассы и определяющих ее основных дендрометрических показателей – возраста, диаметра ствола и его высоты – дана в табл. 1. Поскольку исследование имеет континентальный уровень, анализ проводится на уровне родов (подродов) как совокупностей викарирующих видов, имея в виду, что ни один вид не произрастает на территории всей Евразии.

Таблица 1

Характеристика исходных данных фитомассы и основных дендрометрических показателей

Characteristics of the initial biomass data and the main dendrometric indices

Виды	Диапазоны изменения и количество исходных данных								
	A, лет	*D*, см	*H*, м	*Pa*		*Pr*		*Pt*	
				кг	n	кг	n	кг	n
Подрод *Pinus* L. (двухвойные сосны)									
P. sylvestris L., *P. tabuliformis* Carrière, *P. densiflora* Siebold & Zucc., *P. nigra* (Lamb.) Holmboe, *P. halepensis* Mill., *P. contorta* Douglas ex Loudon, *P. taeda* L.	5÷430	1÷66	1,4÷36,6	0,5÷2045	4127	0,1÷259	623	0,6÷1481	668
Род *Picea* A. Dietr. (ели)									
P. abies (L.) H. Karst., *P. obovata* Ledeb., *P. schrenkiana* Fisch. & C.A. Mey., *P. ajanensis* Fisch. ex Carrière, *P. koraiensis* Nakai	10÷250	1÷ 70	1,4÷44,2	0,4÷3370	1155	0,1÷445	256	0,6÷1951	256
Род *Abies* Mill. (пихты)									
A. sibirica Ledeb., *A. alba* Mill., *A. holophylla* Maxim., *A. sachalinensis* (F. Schmidt) Mast., *A. nephrolepis* (Trautv.) Maxim.	6÷95	2÷ 42	3,1÷27,8	2,0÷740	287	0,5÷76	18	2,5÷350	18
Род *Larix* Mill. (лиственницы)									
L. decidua Mill., *L. sibirica* Ledeb., *L. cajanderi* Mayr, *L. gmelinii* (Rupr.) Rupr., *L. leptolepis* (Siebold & Zucc.) Gordon	6÷424	1÷ 73	1,4÷34,0	1,5÷3877	730	0,4÷768	167	2,0÷3967	167
Род *Betula* L. (березы)									
B. pubescens Ehrh., *B. pendula* Roth, *B. dahurica* Pall., *B. maximowicziana* Regel, *B. ermanii* Cham., *B. costata* Trautv., *B. platyphylla* Sukaczev	5÷195	1÷ 48	1,5÷34,5	1,4÷1031	1900	0,3÷193	216	2,0÷1056	217
Род *Populus* L. (осины и тополя)									
P. tremula L., *P. nigra* L., *P. davidiana* Dode	3÷103	1÷ 46	2,1÷28,8	1,1÷1091	707	0,2÷51	34	1,5÷388	34

Окончание табл. 1

Виды	Диапазоны изменения и количество исходных данных								
	A, лет	*D*, см	*H*, м	*Pa*		*Pr*		*Pt*	
				кг	n	кг	n	кг	n
Род *Quercus* L. (дубы)									
Q. robur L., *Q. rubra* L., *Q. phillyreoides* A. Gray, *Q. serrata* Murray, *Q. amamiana* Hatus., *Q. acutissima* Carruth., *Q. crispula* Blume, *Q. pyrenaica* Willd., *Q. mongolica* Fisch. ex Ledeb.	4÷183	1÷ 72	1,6÷33,6	1,2÷4291	760	0,7÷843	58	3,8÷5135	58
Род *Tilia* L. (липы)									
T. cordata Mill., *T. amurensis* Rupr., *T. mandshurica* Rupr. & Maxim., *T. parvifolia* Ehrh.	10÷141	2÷ 39	3,4÷24,8	1,0÷572	400	0,4÷88	11	0,8÷356	11
Род *Fagus* L. (буки)									
F. sylvatica L., *F. crenata* Blume	8÷233	1÷ 75	1,9÷39,3	1,4÷4741	365	0,1÷452	52	0,2÷4419	54
Род *Fraxinus* L. (ясени)									
F. excelsior L., *F. mandshurica* Rupr.	5÷119	2÷ 58	2,5÷36,0	1,0÷2917	97	50,5÷408	6	266÷3325	6
Род *Alnus* Mill. (ольхи)									
A. incana (L.) Moench., *A. glutinosa* (L.) Gaertn., *A. hirsuta* (Spach) Turcz. ex. Rupr.	4÷95	2÷ 42	2,4÷27,8	1,0÷740	568	0,5÷76	17	2,3÷350	17
Род *Salix* L. (ивы)									
S. caprea L., *S. borealis* Fr., *S.. triandra* L.	3÷79	1÷ 24	1,6÷17,7	0,5÷102	74	0,1÷5,9	8	0,6÷21	8

Примечание. *A* – возраст дерева; *D* – диаметр ствола на высоте груди; *H* – высота дерева; *Pa*, *Pr* и *Pt* – соответственно, надземная, подземная (корни) и общая фитомасса дерева в абсолютно сухом состоянии, кг; n – количество наблюдений.

Результаты исследований и их обсуждение. Выполнена последовательная проверка независимых переменных на мультиколлинеарность в многофакторных аллометрических моделях структур (2)–(5):

$$\ln Y = a_0 + a_1 \ln A + a_2 \ln D + a_3 \ln H, \quad (2)$$

$$\ln Y = a_0 + a_1 \ln A + a_2 \ln D, \quad (3)$$

$$\ln Y = a_0 + a_1 \ln A + a_2 \ln H, \quad (4)$$

$$\ln Y = a_0 + a_1 \ln D + a_2 \ln H, \quad (5)$$

где Y – один из показателей фитомассы (*Pa*, *Pr* и *Pt*). Используя программное обеспечение Python (Bedre, 2025), получили показатели VIF (табл. 2).

Таблица 2

Показатели VIF для прогностических переменных моделей (2)-(5)

VIF values for predictive variable of models (2)–(5)

Род (подрод)	Модель	Прогностические переменные		
		A	*D*	*H*
Pinus	(2)	4,1	6,4	7,5
	(3)	3,3	3,3	
	(4)	3,7	–	3,7
	(5)	6,1	6,1	–
Picea	(2)	1,0	33,5	33,5
	(3)	1,0	1,0	
	(4)	1,0	–	1,0
	(5)	–	33,5	33,5
Larix	(2)	3,5	24,4	23,2
	(3)	3,4	3,4	
	(4)	3,3	–	3,3
	(5)	–	23,0	23,0
Betula	(2)	7,8	26,8	18,2
	(3)	7,8	7,8	
	(4)	5,1	–	5,1
	(5)	–	18,1	18,1
Populus	(2)	5,6	18,1	16,7
	(3)	5,4	5,4	
	(4)	5,0	–	5,0
	(5)	–	16,1	16,1
Quercus	(2)	1,0	13,8	13,8
	(3)	1,0	1,0	
	(4)	1,0	–	1,0
	(5)	–	13,8	13,8

Расчет показателей VIF для трех прогностических переменных по модели (2) показал, что у всей совокупности видов мультиколлинеарность превышает предельное значение, т. е. VIF > 5. Это означает, что модель (2)

не является корректной по условию мультиколлинеарности ни для одного из 12 родов. Поэтому дальнейший анализ мультиколлинеарности выполняется лишь по двум прогностическим переменным в разных сочетаниях (модели (3)-(5)).

В табл. 2 приведены результаты анализа переменных по условию мультиколлинеарности для 6 родов, наиболее представленных в базе данных по количеству измерений. По остальным 6 родам значения VIF для прогностических переменных моделей (3)-(5) существенно выше 5,0, и в табл. 2 они не показаны. Из 6 родов с наименьшими показателями VIF для переменных в моделях (3) и (4) (табл. 2) лишь для 4 родов (подродов) (*Pinus*, *Picea*, *Larix* и *Quercus*) показатели VIF существенно ниже 5,0, а для *Betula* и *Populus* они или равны 5,0, или незначительно превышают 5,0.

Необходимо отметить довольно неожиданный результат, полученный при оценке VIF для переменных D и H в модели (5). В имеющихся базах данных по аллометрическим моделям наибольшую численность имеют модели связи фитомассы с диаметром ствола (простая аллометрия). Несколько меньшую представленность в подобных базах имеют двухфакторные модели связи фитомассы с D и H, т. е. модели (5), получившие распространение еще при составлении объемных таблиц для стволов деревьев [Тюрин и др., 1945; Третьяков и др., 1952]. Согласно табл. 2 из трех двухфакторных моделей именно модель (5), характеризующая связь фитомассы с D и H, отличается наибольшими значениями VIF. Данный показатель для пяти родов имеет значения в диапазоне от 14 до 33 и лишь для сосен, представленных наибольшим объемом исходных данных (4127 деревьев), он меньше и составляет 6,1. Это означает, что модель (5) уже на этом этапе не может считаться корректной по условию минимальной мультиколлинеарности D и H.

В целом просматривается некоторая обратная связь между величиной VIF для переменных модели (5) и объемом исходных данных. Поэтому при локальном использовании структуры модели (5) исследователи стали обнаруживать существенную мультиколлинеарность D и H [Dutcă et al., 2019]. Это может показаться парадоксальным, но, чтобы исключить ее (и, соответственно, повысить устойчивость модели), стали рекомендовать вместо двух отдельных переменных комбинированную переменную, так называемый «видовой цилиндр», или произведение квадрата диаметра на высоту (D^2H) [Dutcă et al., 2017, 2019].

Данная проблема была рассмотрена в нашем специальном исследовании [Усольцев и др., 2020]. Известно, что переменная D^2H достаточно информативна при оценке фитомассы ствола. Она давно применяется в лес-

ной таксации при оценке объема ствола по причине низкой изменчивости его полнодревесности, и получаемые модели имели коэффициенты детерминации, близкие к 1,0 [Satoo, 1970; Picard et al., 2012]. Но при оценке фитомассы листвы, хвои и ветвей агрегированная переменная D^2H оказывается менее информативной по сравнению с диаметром D, поскольку предполагает «насильственную» положительную связь фитомассы кроны с высотой дерева, тогда как при равных диаметрах стволов она отрицательная, и в итоге получаемые результаты имеют смещения [Усольцев и др., 2020]. Правда, при оценке надземной фитомассы с помощью D^2H названные смещения меньше, чем при оценке фитомассы кроны, поскольку крона имеет сравнительно небольшую долю в надземной фитомассе дерева. Тем не менее проблема смещений остается. Таким образом, в стремлении повысить устойчивость модели (5), в которой D и H могут быть сильно коррелированы, авторы [Dutcă et al., 2017, 2019], рекомендуя использовать комбинацию D^2H вместо двух отдельных переменных D и H, заменяют неопределенность, вызванную их мультиколлинеарностью, другой неопределенностью, вызванной некорректной структурой переменной D^2H.

Возвращаясь к оценкам мультиколлинеарности моделей (3) и (4) (табл. 2), можно отметить, что эти две модели имеют практически одинаковые показатели VIF для соответствующих переменных. Например, у лиственниц VIF для переменных A и D в модели (3) равен 3,4, а для переменных A и H в модели (4) равен 3,3. У елей и дубов в обеих моделях VIF равен 1,0. Но это не значит, что при оценке фитомассы две названные модели равноценны по информативности, поскольку переменные A, D и H могут иметь разные вклады в объяснение изменчивости фитомассы. Чтобы выяснить, какая из моделей (3) и (4) предпочтительнее при оценке фитомассы дерева, был выполнен их регрессионный анализ по исходным данным, показанным в табл. 1. Сравнительная характеристика результатов расчета моделей (3) и (4) дана в табл. 3.

Поскольку известно, что диаметр ствола из всех размерных характеристик дерева имеет наибольшую информативность при оценке фитомассы дерева [Усольцев, 1988], следовало ожидать, что он, будучи включенным в модель (3), сыграет превалирующую роль, в сравнении с моделью (4), в объяснении изменчивости фитомассы. Данные табл. 3 подтверждают это предположение, и в целом по всем фракциям коэффициенты детерминации моделей (3) и (4) различаются на 3%. Исключение составляет соотношение информативности двух моделей для фитомассы корней, причем статистически не значимое (-0,183 ± 2,3), возможно, вследствие того, что данных по корням почти на порядок меньше, чем по надземной фитомассе.

Таблица 3

Сравнительная характеристика адекватности моделей (3) и (4)

Comparative characteristic of the adequacy of models (3), and (4)

ln *Y*	Регрессионные коэффициенты модели (3)			Регрессионные коэффициенты модели (4)			$adjR^2$, %		$\Delta\ adjR^2$, %
	a_0**	a_1	a_2	a_0**	a_1	a_2	(3)	(4)	(3)-(4)
Pinus									
ln *Pa*	–2,5221	0,1000	2,3220	–2,2909	–0,3033	2,9493	97,2	88,3	8,9
ln *Pr*	–3,8033	0,0230*	2,2127	–0,7203	–1,0956	2,8813	87,8	91,0	–3,2
ln *Pt*	–2,1860	0,0386	2,3416	–3,5094	–0,1515	3,2949	97,7	96,3	1,4
Picea									
ln *Pa*	–2,0277	0,2108	2,0456	–2,4053	0,2603	2,1938	96,0	92,8	5,2
ln *Pr*	–4,2925	0,5403	1,8987	–4,5548	0,5748	2,0522	95,2	91,6	3,2
ln *Pt*	–2,0013	0,3344	1,9601	–2,2068	0,3141	2,1673	96,7	94,2	2,5
Larix									
ln *Pa*	–2,0460	0,0299	2,2835	–4,2498	0,2620	2,8479	97,2	96,2	1,0
ln *Pr*	–3,8031	0,4938	1,7298	–7,5212	0,9858	2,5853	86,8	97,1	–10,3
ln *Pt*	–2,1673	0,2257	2,1876	–4,7148	0,5122	2,7619	98,0	98,5	–0,5
Betula									
ln *Pa*	–2,7057	0,2268	2,3213	–5,0570	0,5966	2,6184	96,2	91,9	0,1
ln *Pr*	–3,6025	0,0953*	2,0925	–7,1721	0,6048	2,9231	92,4	80,0	4,3
ln *Pt*	–1,8295	0,0220*	2,3115	–5,4110	0,5011	3,0001	99,4	86,4	13,0
Populus									
ln *Pa*	–2,2458	0,0943	2,3022	–5,1941	0,5389	2,7887	98,3	92,5	5,8
ln *Pr*	–3,5402	–0,0726*	2,4148	–4,3150	–0,9788	3,6922	94,8	91,8	3,0
ln *Pt*	–2,4592	0,2486	2,2232	–3,3611	–0,7220	3,6308	98,9	94,2	4,7
Quercus									
ln *Pa*	–1,8457	–0,0217*	2,3698	–3,6560	0,1798	2,9056	98,2	88,5	10,4
ln *Pr*	–0,9410	–1,1660	3,0624	–3,5614	–0,8232	3,7988	92,6	90,7	1,9
ln *Pt*	–1,2298	–0,4406	2,7800	–3,5440	–0,0803*	3,3653	97,4	92,0	5,4
ln *Pa*	Средние значения						97,7±0,4	91,7±1,2	5,23±1,7
ln *Pr*							91,6±1,4	90,4±2,3	-0,183 ± 2,3
ln *Pt*							98,0±0,4	93,6±1,7	4,42±1,9
В целом							95,6±5,2	91,9±2,1	3,16±1,7

Примечания. * Переменная значима на уровне ниже 0,95; ** Константа скорректирована на логарифмическую ретрансформацию по: [Sprugel, 1983]; *** $adjR^2$ – коэффициент детерминации, скорректированный на число переменных, %; $\Delta\ adjR^2$ – разность коэффициентов детерминации моделей (2) и (3), %.

Как уже упоминалось выше, равнозначность двух моделей по приемлемой величине VIF их переменных не означает равнозначности по информативности в объяснении изменчивости фитомассы, поскольку переменные могут иметь разные вклады в это объяснение. Результаты расчета названных вкладов по методу И.Я. Лиепы [1980] показали, насколько велико различие вкладов независимых переменных в объяснение изменчивости фитомассы (табл. 4). В обеих моделях преимущество имеют *D* и *H* (93 и 87%) перед переменной *A* (7 и 17%), а из двух первых – переменная *D* (93%) перед *H* (87%).

Таблица 4

Вклад независимых переменных моделей (3) и (4) в объяснение изменчивости зависимых переменных

Contribution of the independent variables of models (3) and (4) to the explanation of the variability of the dependent variables

ln *Y*	Модель (3)		Модель (4)	
	a_1 ln*A*	a_2 ln*D*	a_1 ln*A*	a_2 ln*H*
Pinus				
ln *Pa*	4	96	8	92
ln *Pr*	1	99	21	79
ln *Pt*	2	98	2	98
Picea				
ln *Pa*	7	93	8	92
ln *Pr*	16	84	17	83
ln *Pt*	10	90	9	91
Larix				
ln *Pa*	1	99	9	91
ln *Pr*	20	80	22	78
ln *Pt*	8	92	12	88
Betula				
ln *Pa*	8	92	18	82
ln *Pr*	3	97	18	82
ln *Pt*	1	99	15	85
Populus				
ln *Pa*	3	97	17	83
ln *Pr*	1	99	19	81
ln *Pt*	6	94	15	85

Окончание табл. 4

ln *Y*	Модель (3)		Модель (4)	
	a_1 ln*A*	a_2 ln*D*	a_1 ln*A*	a_2 ln*H*
Quercus				
ln *Pa*	1	99	7	93
ln *Pr*	20	80	16	84
ln *Pt*	9	91	1	99
Средние значения				
ln *Pa*	4,00±1,2	96,0±1,2	11,2±2,0	88,8±2,0
ln *Pr*	10,2±3,9	89,8±3,9	18,8±0,9	81,2±0,9
ln *Pt*	6,00±1,5	94,0±1,5	9,00±2,5	91,0±2,5
В целом	6,72±1,8	93,2±1,8	13,0±3,0	87,0±3,0

Поскольку наименее информативен в модели (3) возраст дерева, объясняющий менее 7% изменчивости фитомассы, модель (3) модифицирована и рассчитана только в связи с диаметром ствола для всех 12 родов (подродов) (табл. 5). В результате получены всеобщие аллометрические модели фитомассы деревьев, характеризующиеся высокими значениями коэффициента детерминации.

Таблица 5

Характеристика аллометрических моделей зависимости фитомассы деревьев от диаметра ствола на высоте груди для 12 родов (подродов) Евразии, построенных по материалам базы данных [Усольцев, 2023]

Characteristics of allometric models of the dependence of tree biomass on stemdiameter at breast height for 12 genera (subgenera) of Eurasia, based on the materials of the database [Usoltsev, 2023]

ln *Y*	a_0^*	a_1 ln*D*	$adjR^2$	SE	a_0^*	a_1 ln*D*	$adjR^2$	SE
	Pinus				*Quercus*			
ln *Pa*	–2,2900	2,3776	0,973	0,315	–1,8388	2,3374	0,980	0,278
ln *Pr*	–3,5798	2,2481	0,880	0,667	–3,6424	2,4011	0,841	0,735
ln *Pt*	–2,0910	2,3678	0,976	0,303	–2,3434	2,5512	0,970	0,313
	Picea				*Tilia*			
ln *Pa*	–1,4833	2,1508	0,958	0,399	–2,2006	2,3517	0,945	0,319
ln *Pr*	–2,8554	2,1594	0,939	0,559	–1,9652	1,8838	0,919	0,499
ln *Pt*	–1,1176	2,1203	0,962	0,427	–1,7948	2,3415	0,992	0,194

Окончание табл. 5

	Abies				*Fagus*			
ln *Pa*	–1,4578	2,1292	0,968	0,394	–1,7928	2,3710	0,986	0,250
ln *Pr*	–2,9619	2,1843	0,941	0,457	–3,1037	2,2705	0,987	0,282
ln *Pt*	–2,1620	2,4540	0,982	0,212	–1,5994	2,3997	0,994	0,209
	Larix				*Fraxinus*			
ln *Pa*	–1,9350	2,2868	0,971	0,319	–2,0255	2,5050	0,988	0,235
ln *Pr*	–2,4589	2,0069	0,843	0,865	–2,2075	2,0364	0,931	0,230
ln *Pt*	–1,5649	2,3142	0,977	0,365	–1,7194	2,4432	0,969	0,182
	Betula				*Alnus*			
ln *Pa*	–2,2399	2,4658	0,960	0,374	–2,5338	2,5184	0,979	0,213
ln *Pr*	–3,2531	2,1421	0,924	0,519	–3,4460	2,2400	0,879	0,393
ln *Pt*	–1,7758	2,3250	0,994	0,155	–1,9884	2,3367	0,980	0,157
	Populus				*Salix*			
ln *Pa*	–2,0874	2,3629	0,983	0,251	–2,2049	2,3096	0,974	0,192
ln *Pr*	–3,6919	2,3822	0,950	0,464	–3,7121	2,5004	0,965	0,325
ln *Pt*	–1,9125	2,3347	0,984	0,223	–1,9596	2,3252	0,996	0,097

Таким образом, с целью повышения устойчивости аллометрических моделей фитомассы деревьев проанализирована мультиколлинеарность основных трех независимых переменных: диаметра ствола, возраста и высоты дерева. Установлено, что включать все три переменные в модель фитомассы по условию мультиколлинеарности нельзя. Анализ двухфакторных моделей в разных сочетаниях независимых переменных показал, что две модели, одна из которых связана с возрастом и диаметром ствола, а другая – с возрастом и высотой дерева, показали приемлемые уровни мультиколлинеарности, причем одинаковые по величине VIF. Для выбора одной из них в качестве наиболее приемлемой для оценки фитомассы деревьев был выполнен регрессионный анализ, который показал, что наибольшим коэффициентом детерминации характеризуется связь фитомассы с возрастом и диаметром ствола. Однако вклад возраста в объяснение изменчивости фитомассы оказался несущественным по сравнению с вкладом диаметра ствола. Это означает, что отсутствие значительной корреляции двух независимых переменных может не иметь смысла, поскольку при минимальном вкладе одной из независимых переменных в объяснение

изменчивости фитомассы в конечном счете получаем однофакторную зависимость (простую аллометрию). В нашем случае предложены всеобщие аллометрические модели (generic models) зависимости фитомассы лишь от диаметра ствола. Но ранее было показано, что всеобщие аллометрические модели, построенные по всему массиву фактических данных, дают при использовании в локальных условиях неприемлемые смещения обоих знаков (от +315 до -92%), что исключает возможность их применения на региональных уровнях [Усольцев и др., 2017]. Тем не менее в случаях, когда необходимо оценить биопродуктивность древесного вида, информации по которому нет в базах данных, более логично использовать модель для его рода, нежели модель для другого рода или входящего в него вида.

Заключение. Таким образом, начав исследование с анализа мультиколлинеарности независимых переменных и получив предпосылки построения устойчивых моделей по названному показателю, в результате расчета потенциально устойчивых моделей в действительности оказалось, что 93% вклада в объясненную изменчивость фитомассы обеспечивает диаметр ствола. В результате получены всеобщие модели фитомассы в связи с диаметром ствола, при использовании которых в локальных условиях могут быть смещения оценок. Вопрос оптимизации структуры модели фитомассы остается, таким образом, открытым. Он входит в широкий спектр проблем, рассмотренных на Всемирном конгрессе ИЮФРО в октябре 2014 г. по теме «Количественная оценка неопределенности в лесных измерениях и моделях» [Paré et al., 2016].

В настоящем исследовании для оценки коэффициентов a и b моделей использован стандартный метод наименьших квадратов по логарифмически трансформированным исходным данным [Zianis, Mencuccini, 2004]. Расчет VIF выполнен по исходным данным, а расчет моделей (2)-(5) – по их логарифмированным значениям, что обусловливает деформирование остаточной дисперсии, поэтому можно попытаться провести аналогичное исследование на основе других методов подгонки регрессионных коэффициентов, без логарифмирования данных: нелинейного регрессионного анализа [Дрейпер, Смит, 1973; Химмельблау, 1975], метода группового учета аргументов (МГУА) [Ивахненко, 1969, 1977] и др., – но для увязки их с мультиколлинеарностью переменных нужны дополнительные исследования на больших данных с применением методов машинного обучения [Xu et al., 2022]. Кстати, МГУА является наиболее ранним методом глубокого обучения, он был использован для обучения восьмислойной нейронной сети еще в 1971 г. [Schmidhuber, 2015].

Пока что исследователю в каждом случае приходится находить «золотую середину» между отбором независимых переменных с минимальной мультиколлинеарностью с одной стороны и между включением в модель наибольшего количества статистически значимых независимых переменных с другой. Поэтому существующее мнение, что математическое моделирование – это искусство применения логики и математики [Налимов, 1971; Мак-Лоун, 1979], остается актуальным, особенно в экологии, где все действующие факторы априорно взаимосвязаны. Так же актуально утверждение известного статистика А.А. Чупрова: «Знание связей, остающихся без истолкования или неверно истолковываемых, часто хуже полного незнания. Недостаточное внимание к этому обстоятельству является одним из злейших статистических преступлений» (цит. по: [Арманд, 1949, с. 92]).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Арманд Д.Л. Функциональные и корреляционные связи в физической географии // Известия Всесоюзного Географического Общества. 1949. № 1. С. 81-94.

Дрейпер Н., *Смит Г.* Прикладной регрессионный анализ. М.: Статистика, 1973. 392 с.

Ивахненко А.Г. Самообучающиеся системы распознавания и автоматического управления. Киев: «Техніка», 1969. 391 с.

Ивахненко А.Г. Метод группового учета аргументов в задачах прогнозирования (препринт). Киев: Институт кибернетики, 1977. 24 с.

Лиепа И.Я. Динамика древесных запасов: прогнозирование и экология. Рига: Зинатне, 1980. 171 с.

Мак-Лоун Р.Р. Математическое моделирование – искусство применения математики // Математическое моделирование. М., 1979. С. 9-20.

Налимов В.В. Теория эксперимента. М.: Наука, 1971. 208 с.

Репина Е.Г., *Цыпин А.П.*, *Зайчикова Н.А.*, *Ширнаева С.Ю.* Эконометрика в табличном редакторе MS Excel [Электронный ресурс]: практикум. Самара: Изд-во Самар. гос. экон. ун-та, 2019. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

Третьяков Н.В., *Горский П.В.*, *Самойлович Г.Г.* Справочник таксатора. Таблицы для таксации леса. М.-Л.: Гослесбумиздат, 1952. 853 с.

Тюрин А.В., *Науменко И.М.*, *Воропанов П.В.* Лесная вспомогательная книжка. М.: Гослестехиздат, 1945. 405 с.

Усольцев В.А. Рост и структура фитомассы древостоев. Новосибирск: Наука, Сибирское отд-ние, 1988. 253 с.

Усольцев В.А. Фитомасса модельных деревьев для дистанционной и наземной таксации лесов Евразии: электронная база данных: монография. 3-е доп. изд.

Екатеринбург: Ботанический сад УрО РАН, Уральский государственный лесотехнический университет, 2023. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

Усольцев В.А., *Канунникова О.В.*, *Платонов И.В.* Исследование ошибок при оценке углеродного пула лесов посредством аллометрических моделей // Современные проблемы устойчивого управления лесами, инвентаризации и мониторинга лесов: мат. межд. конф. СПб., 2006. С. 363-370.

Усольцев В.А., *Колчин К.В.*, *Норицина Ю.В.*, *Азарёнок М.В.*, *Богословская О.А.* Смещения всеобщих видоспецифичных аллометрических моделей при локальной оценке биомассы деревьев сосны, кедра и пихты // Эко-потенциал. 2017. № 2 (18). С. 47-58.

Усольцев В.А., *Ковязин В.Ф.*, *Цепордей И.С.*, *Часовских В.П.*, *Азаренок В.А.* Биомасса ассимиляционного аппарата лесов Евразии: коррекция методов эмпирического моделирования // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020. Вып. 232. С. 50-78. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.232.50-78.

Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975. 535 с.

Bedre R. Variance Inflation Factor (VIF) // Renesh Bedre's Blog. URL: https://www.reneshbedre.com/blog/variance-inflation-factor.html (дата обращения: 19.02.2025)

Chatterjee S., *Simonoff J.S.* Handbook of regression analysis. N. Y.: Wiley, 2013. 252 p.

Chatterjee S., *Hadi A.S.*, *Price B.* Regression analysis by example. N. Y.: John Wiley and Sons, 2000. 359 p.

Dutcă I., *Mather R.*, *Ioraş F.* Tree biomass allometry during the early growth of Norway spruce (*Picea abies*) varies between pure stands and mixtures with European beech (*Fagus sylvatica*) // Canadian Journal of Forest Research. 2018. Vol. 48. P. 77–84. DOI: 10.1139/cjfr-2017-0177.

Dutcă I., *McRoberts R.E.*, *Naesset E.*, *Blujdea V.* A practical measure for determining if diameter (D) and height (H) should be combined into D^2H in allometric biomass models // Forestry: An International Journal of Forest Research. 2019. Vol. 92, iss. 5. P. 627-634. DOI: 10.1093/forestry/cpz041.

Falster D., *Duursma R.*, *Ishihara M.*, *Barneche D.R.*, *FitzJohn R.G.*, *Varhammar A.*, *Aiba M.*, *Ando M.*, *Anten N.*, *Aspinwall M.J.*, *Baltzer J.L.*, *Baraloto C.*, *Battaglia M.*, *Battles J.J.*, *Bond-Lamberty B.*, *van Breugel M.*, *Claveau Y.*, *Dannoura M.*, *Delagrange S.*, *Domec J.-C.*, *Fatemi F.*, *Feng W.*, *Gargaglione V.*, *Goto Y.*, *Hagihara A.*, *Hall J.S.*, *Hamilton S.*, *Harja D.*, *Hiura T.*, *Holdaway R.*, *Hutley L.S.*, *Ichie T.*, *Jokela E.J.*, *Kantola A.*, *Kelly J.W.G.*, *Kenzo T.*, *King D.*, *Kloeppel B.D.*, *Kohyama T.*, *Komiyama A.*, *Laclau J.-P.*, *Lusk C.H.*, *Maguire D.A.*, *Le Maire G.*, *Makela A.*, *Markesteijn L.*, *Marshall J.*, *McCulloh K.*, *Miyata I.*, *Mokany K.*, *Mori S.*, *Myster R.W.*, *Nagano M.*, *Naidu S.L.*, *Nouvellon Y.*, *O'Grady A.P.*, *O'Hara K.L.*, *Ohtsuka T.*, *Osada N.*, *Osunkoya O.O.*, *Peri P.L.*, *Petritan A.M.*, *Poorter L.*, *Portsmuth A.*, *Potvin C.*, *Ransijn J.*, *Reid D.*, *Ribeiro S.C.*,

Roberts S.D., *Rodriguez R.*, *Saldana-Acosta A.*, *Santa-Regina I.*, *Sasa K.*, *Galia Selaya N.*, *Sillett S.C.*, *Sterck F.*, *Takagi K.*, *Tange T.*, *Tanouchi H.*, *Tissue D.*, *Umehara T.*, *Vadeboncoeur M.A.*, *Valladares F.*, *Vanninen P.*, *Wang J.R.*, *Wenk E.*, *Williams R.*, *de Aquino Ximenes F.*, *Y.Atsushi*, *Yamada T.*, *Yamakura T.*, *Yanai R.D.*, *York R.A.* BAAD: a Biomass And Allometry Database for woody plants // Ecology. 2015. Vol. 96, iss. 5. Art. no. 1445.

Graham M.H. Confronting multicollinearity in ecological multiple regression // Ecology. 2003. Vol. 84. P. 2809–2815. DOI: 10.1890/02-3114.

Jenkins J.C., *Chojnacky D.C.*, *Heath L.S.*, *Birdsey R.A.* Comprehensive database of diameter-based regressions for North American tree species / USDA Forest Service Northeastern Research Station; General Technical Report NE-319. 2004. 45 p.

Jucker T., *Fischer F. J.*, *Chave J.*, *Coomes D.A.*, *Caspersen J.*, *Ali A.*, *Loubota Panzou G.J.*, *Feldpausch T.R.*, *Falster D.*, *Usoltsev V.A.*, *Adu-Bredu S.*, *Alves L.F.*, *Aminpour M.*, *Angoboy I.B.*, *Anten N.P.R.*, *Antin C.*, *Askari Y.*, *Muñoz R.*, *Ayyappan N.*, *Balvanera P.*, *Banin L.*, *Barbier N.*, *Battles J.J.*, *Beeckman H.*, *Bocko Y.E.*, *Bond-Lamberty B.*, *Bongers F.*, *Bowers S.*, *Brade T.*, *van Breugel M.*, *Chantrain A.*, *Chaudhary R.*, *Dai J.*, *Dalponte M.*, *Dimobe K.*, *Domec J.C.*, *Doucet J.L.*, *Duursma R.A.*, *Enríquez M.*, *van Ewijk K.Y.*, *Farfán-Rios W.*, *Fayolle A.*, *Forni E.*, *Forrester D.I.*, *Gilani H.*, *Godlee J.L.*, *Gourlet-Fleury S.*, *Haeni M.*, *Hall J.S.*, *He J.-K.*, *Hemp A.*, *Hernández-Stefanoni J.L.*, *Higgins S.I.*, *Holdaway R.I.*, *Hussain K.*, *Hutley L.B.*, *Ichie T.*, *Iida Y.*, *Jiang H.-S.*, *Joshi P.R.*, *Kaboli H.*, *Kazempour Larsary M.*, *Kenzo T.*, *Kloeppel B.D.*, *Kohyama T.*, *Kunwar S.*, *Kuyah S.*, *Kvasnica J.*, *Lin S.*, *Lines E.R.*, *Liu H.*, *Lorimer C.*, *Loumeto J.-J.*, *Malhi Y.*, *Marshall P.L.*, *Mattsson E.*, *Matula R.*, *Meave J.A.*, *Mensah S.*, *Mi X.*, *Momo S.*, *Moncrieff G.R.*, *Mora F.*, *Nissanka S.P.*, *O'Hara K.L.*, *Pearce S.*, *Pelissier R.*, *Peri P.L.*, *Ploton P.*, *Poorter L.*, *Pour M.J.*, *Pourbabaei H.*, *Dupuy-Rada J.M.*, *Ribeiro S.C.*, *Ryan C.*, *Sanaei A.*, *Sanger J.*, *Schlund M.*, *Sellan G.*, *Shenkin A.*, *Sonké B.*, *Sterck F.J.*, *Svátek M.*, *Takagi K.*, *Trugman A.T.*, *Ullah F.*, *Vadeboncoeur M.A.*, *Valipour A.*, *Vanderwel M.C.*, *Vovides A.G.*, *Wang W.*, *Wang L.-Q.*, *Wirth C.*, *Woods M.*, *Xiang W.*, *de Aquino Ximenes F.*, *Xu Y.*, *Yamada T.*, *Zavala M.A.* Tallo – a global tree allometry and crown architecture database // Global Change Biology. 2022. Vol. 28. P. 5254-5268. DOI: 10.1111/gcb.16302.

Lin J., *Chen D.*, *Yang S.*, *Liao X.* Precise aboveground biomass estimation of plantation forest trees using the novel allometric model and UAV-borne LiDAR // Frontiers in Forests and Global Change. 2023. Vol. 6. Art. no. 1166349. DOI: 10.3389/ffgc.2023.1166349.

Luo Y., *Wang X.*, *Ouyang Z.*, *Lu F.*, *Feng L.*, *Tao J.* A review of biomass equations for China's tree species // Earth System Science Data. 2020. Vol. 12, iss. 1. P. 21-40. DOI: 10.5194/essd-12-21-2020.

Marcoulides K.M., *Raykov T.* Evaluation of variance inflation factors in regression models using latent variable modeling methods // Educational and Psychological Measurement. 2019. Vol. 79, iss. 5. P. 874-882. DOI: 10.1177/0013164418817803.

Muukkonen P., *Mäkipää R.* Biomass equations for European trees: Addendum // Silva Fennica. 2006. Vol. 40, iss. 4. P. 763–773.

Paré D., *Gertner G.Z.*, *Bernier P.Y.*, *Yanai R.D.* Quantifying uncertainty in forest measurements and models: approaches and applications // Canadian Journal of Forest Research. 2016. Vol. 46. P. 5. DOI: 10.1139/cjfr-2016-0029

Picard N., *Saint-André L.*, *Henry M.* Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, and Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Montpellier, 2012. 215 p.

Poorter H., *Jagodzinski A.M.*, *Ruiz-Peinado R.*, *Kuyah S.*, *Luo Y.*, *Oleksyn J.*, *Usoltsev V.A.*, *Buckley T.N.*, *Reich P.B.*, *Sack L.* How does biomass allocation change with size and differ among species? An analysis for 1200 plant species from five continents // New Phytologist. 2015. Vol. 208, iss. 3. P. 736-749. DOI: 10.1111/nph.13571.

Sawadogo L., *Savadogo P.*, *Tiveau D.*, *Dayamba S.D.*, *Zida D.*, *Nouvellet Y.*, *Oden P.C.*, *Guinko S.* Allometric prediction of aboveground biomass of eleven woody tree species in the Sudanian savanna-woodland of West Africa // Journal of Forestry Research. 2010. Vol. 21. P. 475–481. DOI: 10.1007/s11676-010-0101-4.

Satoo T. A synthesis of studies by the harvest method: primary production relations in the temperate deciduous forests of Japan // Ecological Studies: Analysis and synthesis. N.Y., 1970. Vol. 1. P. 55–72.

Schmidhuber J. Deep learning in neural networks: An overview // Neural Networks. 2015. Vol. 61. P. 85–117. DOI: 10.1016/j.neunet.2014.09.003.

Snell O. Die Abhängigkeit des Hirngewichtes von dem Körpergewicht und den geistigen Fähigkeiten // Archiv für Psychiatrie und Nervenkrank-heiten. 1892. H. 23. S. 436-446.

Sprugel D.G. Correcting for bias in log-transformed allometric equations // Ecology. 1983. Vol. 64. P. 208–210.

Ter-Mikaelian M.T., *Korzukhin M.D.* Biomass equations for sixty-five North American tree species // Forest Ecology and Management. 1997. Vol. 97. P. 1–24. DOI: 10.1016/s0378-1127(97)00019-4.

West G.B., *Brown J.H.*, *Enquist B.J.* A general model for the origin of allometric scaling laws in biology // Science. 1997. Vol. 276. P. 122-126.

West G.B., *Brown J.H.*, *Enquist B.J.* A general model for the structure and allometry of plant vascular system // Nature. 1999. Vol. 400. P. 664-667. DOI: 10.1038/23251.

Xu Q., *Lei X.*, *Zhang H.* A novel method for approaching the compatibility of tree biomass estimation by multi-task neural networks // Forest Ecology and Management. 2022. Vol. 508. Art. no. 120011. DOI: 10.1016/j.foreco.2022.120011.

Zeng W. Developing tree biomass models for eight major tree species in China // Biomass Volume Estimation and Valorization for Energy. 2017. Chapter 1. P. 3-21. DOI: 10.5772/65664.

Zianis D., *Mencuccini M*. On simplifying allometric analyses of forest biomass // Forest Ecology and Management. 2004. Vol. 187. P. 311–332. DOI: 10.1016/j.foreco.2003.07.007.

References

Armand D.L. Functional and correlation relations in physical geography. *Proceedings of the All-Union Geographical Society*, 1949, no. 1, pp. 81-94. (In Russ.)

Bedre R. Variance Inflation Factor (VIF) // Renesh Bedre's Blog. URL: https://www.reneshbedre.com/blog/variance-inflation-factor.html (accessed Fabruary 19, 2025).

Chatterjee S., *Simonoff J.S*. Handbook of regression analysis. New York: Wiley, 2013. 252 p.

Chatterjee S., *Hadi A.S*., *Price B*. Regression analysis by example. New York: John Wiley and Sons, 2000. 359 p.

Draper N., *Smith G*. Applied regression analysis. Moscow: Statistics, 1973. 392 p. (In Russ.)

Dutcă I., *Mather R*., *Ioraş F*. Tree biomass allometry during the early growth of Norway spruce (*Picea abies*) varies between pure stands and mixtures with European beech (*Fagus sylvatica*). *Canadian Journal of Forest Research*, 2018, vol. 48, pp. 77–84. DOI: 10.1139/cjfr-2017-0177.

Dutcă I., *McRoberts R.E*., *Naesset E*., *Blujdea V*. A practical measure for determining if diameter (*D*) and height (*H*) should be combined into D^2H in allometric biomass models. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 2019, vol. 92, iss. 5, pp. 627-634. DOI: 10.1093/forestry/cpz041.

Falster D., *Duursma R*., *Ishihara M*., *Barneche D.R*., *FitzJohn R.G*., *Varhammar A*., *Aiba M*., *Ando M*., *Anten N*., *Aspinwall M.J*., *Baltzer J.L*., *Baraloto C*., *Battaglia M*., *Battles J.J*., *Bond-Lamberty B*., *van Breugel M*., *Claveau Y*., *Dannoura M*., *Delagrange S*., *Domec J.-C*., *Fatemi F*., *Feng W*., *Gargaglione V*., *Goto Y*., *Hagihara A*., *Hall J.S*., *Hamilton S*., *Harja D*., *Hiura T*., *Holdaway R*., *Hutley L.S*., *Ichie T*., *Jokela E.J*., *Kantola A*., *Kelly J.W.G*., *Kenzo T*., *King D*., *Kloeppel B.D*., *Kohyama T*., *Komiyama A*., *Laclau J.-P*., *Lusk C.H*., *Maguire D.A*., *Le Maire G*., *Makela A*., *Markesteijn L*., *Marshall J*., *McCulloh K*., *Miyata I*., *Mokany K*., *Mori S*., *Myster R.W*., *Nagano M*., *Naidu S.L*., *Nouvellon Y*., *O'Grady A.P*., *O'Hara K.L*., *Ohtsuka T*., *Osada N*., *Osunkoya O.O*., *Peri P.L*., *Petritan A.M*., *Poorter L*., *Portsmuth A*., *Potvin C*., *Ransijn J*., *Reid D*., *Ribeiro S.C*., *Roberts S.D*., *Rodriguez R*., *Saldana-Acosta A*., *Santa-Regina I*., *Sasa K*., *Galia Selaya N*., *Sillett S.C*., *Sterck F*., *Takagi K*., *Tange T*., *Tanouchi H*., *Tissue D*., *Umehara T*., *Vadeboncoeur M.A*., *Valladares F*., *Vanninen P*., *Wang J.R*., *Wenk E*., *Williams R*., *de Aquino Ximenes F*., *Y.Atsushi*, *Yamada T*., *Yamakura T*., *Yanai R.D*., *York R.A*. BAAD: a Biomass And Allometry Database for woody plants. *Ecology*, 2015, vol. 96, iss. 5, art. no. 1445.

Graham M.H. Confronting multicollinearity in ecological multiple regression. *Ecology*, 2003, vol. 84, pp. 2809–2815. DOI: 10.1890/02-3114.

Himmelblau D. Applied nonlinear programming. Moscow: Mir, 1975. 535 p. (In Russ.)

Ivakhnenko A.G. Self-learning recognition and automatic control systems. Kiev: Technika, 1969. 391 p. (In Russ.)

Ivakhnenko A.G. Method of group consideration of arguments in forecasting problems. Kiev: Institute of Cybernetics, 1977. 24 p. (In Russ.)

Jenkins J.C., *Chojnacky D.C.*, *Heath L.S.*, *Birdsey R.A*. Comprehensive database of diameter-based regressions for North American tree species / USDA Forest Service Northeastern Research Station. General Technical Report NE-319. 2004. 45 p.

Jucker T., *Fischer F. J.*, *Chave J.*, *Coomes D.A.*, *Caspersen J.*, *Ali A.*, *Loubota Panzou G.J.*, *Feldpausch T.R.*, *Falster D.*, *Usoltsev V.A.*, *Adu-Bredu S.*, *Alves L.F.*, *Aminpour M.*, *Angoboy I.B.*, *Anten N.P.R.*, *Antin C.*, *Askari Y.*, *Muñoz R.*, *Ayyappan N.*, *Balvanera P.*, *Banin L.*, *Barbier N.*, *Battles J.J.*, *Beeckman H.*, *Bocko Y.E.*, *Bond-Lamberty B.*, *Bongers F.*, *Bowers S.*, *Brade T.*, *van Breugel M.*, *Chantrain A.*, *Chaudhary R.*, *Dai J.*, *Dalponte M.*, *Dimobe K.*, *Domec J.C.*, *Doucet J.L.*, *Duursma R.A.*, *Enríquez M.*, *van Ewijk K.Y.*, *Farfán-Rios W.*, *Fayolle A.*, *Forni E.*, *Forrester D.I.*, *Gilani H.*, *Godlee J.L.*, *Gourlet-Fleury S.*, *Haeni M.*, *Hall J.S.*, *He J.-K.*, *Hemp A.*, *Hernández-Stefanoni J.L.*, *Higgins S.I.*, *Holdaway R.I.*, *Hussain K.*, *Hutley L.B.*, *Ichie T.*, *Iida Y.*, *Jiang H.-S.*, *Joshi P.R.*, *Kaboli H.*, *Kazempour Larsary M.*, *Kenzo T.*, *Kloeppel B.D.*, *Kohyama T.*, *Kunwar S.*, *Kuyah S.*, *Kvasnica J.*, *Lin S.*, *Lines E.R.*, *Liu H.*, *Lorimer C.*, *Loumeto J.-J.*, *Malhi Y.*, *Marshall P.L.*, *Mattsson E.*, *Matula R.*, *Meave J.A.*, *Mensah S.*, *Mi X.*, *Momo S.*, *Moncrieff G.R.*, *Mora F.*, *Nissanka S.P.*, *O'Hara K.L.*, *Pearce S.*, *Pelissier R.*, *Peri P.L.*, *Ploton P.*, *Poorter L.*, *Pour M.J.*, *Pourbabaei H.*, *Dupuy-Rada J.M.*, *Ribeiro S.C.*, *Ryan C.*, *Sanaei A.*, *Sanger J.*, *Schlund M.*, *Sellan G.*, *Shenkin A.*, *Sonké B.*, *Sterck F.J.*, *Svátek M.*, *Takagi K.*, *Trugman A.T.*, *Ullah F.*, *Vadeboncoeur M.A.*, *Valipour A.*, *Vanderwel M.C.*, *Vovides A.G.*, *Wang W.*, *Wang L.-Q.*, *Wirth C.*, *Woods M.*, *Xiang W.*, *de Aquino Ximenes F.*, *Xu Y.*, *Yamada T.*, *Zavala M.A.* Tallo – a global tree allometry and crown architecture database. *Global Change Biology*, 2022, vol. 28, pp. 5254-5268. DOI: 10.1111/gcb.16302.

Liepa I.Ya. Dynamics of wood stocks: forecasting and ecology. Riga: Zinatne, 1980. 171 p. (In Russ.)

Lin J., *Chen D.*, *Yang S.*, *Liao X.* Precise aboveground biomass estimation of plantation forest trees using the novel allometric model and UAV-borne LiDAR. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2023, vol. 6, art. no. 1166349. DOI: 10.3389/ffgc.2023.1166349.

Luo Y., *Wang X.*, *Ouyang Z.*, *Lu F.*, *Feng L.*, *Tao J.* A review of biomass equations for China's tree species. *Earth System Science Data*, 2020, vol. 12, iss. 1, pp. 21-40. DOI: 10.5194/essd-12-21-2020.

Marcoulides K.M., *Raykov T.* Evaluation of variance inflation factors in regression models using latent variable modeling methods. *Educational and Psychological Measurement*, 2019, vol. 79, iss. 5, pp. 874-882. DOI: 10.1177/0013164418817803.

McLone R.R. Mathematical modeling – the art of applying mathematics. *Mathematical modeling*. Moscow, 1979, pp. 9-20. (In Russ.)

Muukkonen P., *Mäkipää R*. Biomass equations for European trees: Addendum. *Silva Fennica*, 2006, vol. 40, iss. 4, pp. 763–773.

Nalimov V.V. Theory of experiment. Moscow: Nauka, 1971. 208 p. (In Russ.)

Paré D., *Gertner G.Z*., *Bernier P.Y*., *Yanai R.D*. Quantifying uncertainty in forest measurements and models: approaches and applications. *Canadian Journal of Forest Research*, 2016, vol. 46, p. 5. DOI: 10.1139/cjfr-2016-0029.

Picard N., *Saint-André L*., *Henry M*. Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, and Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Montpellier, 2012. 215 p.

Poorter H., *Jagodzinski A.M*., *Ruiz-Peinado R*., *Kuyah S*., *Luo Y*., *Oleksyn J*., *Usoltsev V.A*., *Buckley T.N*., *Reich P.B*., *Sack L*. How does biomass allocation change with size and differ among species? An analysis for 1200 plant species from five continents. *New Phytologist*, 2015, vol. 208, iss. 3, pp. 736-749. DOI: 10.1111/nph.13571.

Repina E.G., *Tsypin A.P*., *Zaichikova N.A*., *Shirnaeva S.Yu*. Econometrics in the MS Excel tabular editor [Electronic resource]: practicum. Samara; Publishing House of the Samara State University of Economy, 2019. 1 CD-ROM. (In Russ.)

Satoo T. A synthesis of studies by the harvest method: primary production relations in the temperate deciduous forests of Japan. *Ecological Studies: Analysis and synthesis*. New York, 1970, vol. 1, pp. 55–72.

Sawadogo L., *Savadogo P*., *Tiveau D*., *Dayamba S.D*., *Zida D*., *Nouvellet Y*., *Oden P.C*., *Guinko S*. Allometric prediction of aboveground biomass of eleven woody tree species in the Sudanian savanna-woodland of West Africa. *Journal of Forestry Research*, 2010, vol. 21, pp. 475–481. DOI: 10.1007/s11676-010-0101-4.

Schmidhuber J. Deep learning in neural networks: An overview. *Neural Networks*, 2015, vol. 61, pp. 85–117. DOI: 10.1016/j.neunet.2014.09.003.

Snell O. Die Abhängigkeit des Hirngewichtes von dem Körpergewicht und den geistigen Fähigkeiten. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten*, 1892, h. 23, ss. 436-446.

Sprugel D.G. Correcting for bias in log-transformed allometric equations. *Ecology*, 1983, vol. 64, pp. 208–210.

Ter-Mikaelian M.T., *Korzukhin M.D*. Biomass equations for sixty-five North American tree species. *Forest Ecology and Management*, 1997, vol. 97, pp. 1–24. DOI: 10.1016/s0378-1127(97)00019-4.

Tretyakov N.V., *Gorsky P.V*., *Samoilovich G.G*. Forest Mensuration Handbook. Tables for forest taxation. Moscow-Leningrad: Goslesbumizdat, 1952. 854 p. (In Russ.)

Tyurin A.V., *Naumenko I.M*., *Voropanov P.V*. Forest auxiliary book. Moscow: Goslestekhizdat, 1945. 405 p. (In Russ.)

Usoltsev V.A. Growth and structure of forest biomass. Novosibirsk: Nauka, Siberian Publishing House, 1988. 253 p. (In Russ.)

Usoltsev V.A. Single-tree biomass data for remote sensing and ground measuring of Eurasian forests: digital version. 3rd ed., enl. Yekaterinburg; Botanical Garden of Ural Branch of RAS, 2023. 1 CD-ROM. (In Russ.)

Usoltsev V.A., *Kanunnikova O.V.*, *Platonov I.V.* Investigation of errors in estimating the carbon pool of forests using allometric models. *Modern problems of sustainable forest management*, *inventory and monitoring of forests:* mat. of int. conf. St. Petersburg, 2006, pp. 363-370. (In Russ.)

Usoltsev V.A., *Kolchin K.V.*, *Noritsina Yu.V.*, *Azarenok M.V.*, *Bogoslovskaya O.A.* Biases of generis species-specific allometric models in the local estimating the biomass of pine, cedar and fir trees. *Eco-potential*, 2017, vol. 18, no. 2, pp. 47-58. (In Russ.)

Usoltsev V.A., *Kovyazin V.F.*, *Tsepordey I.S.*, *Chasovskikh V.P.*, *Azarenok V.A.* Foliage biomass of the forests of Eurasia: correction of empirical modeling methods. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2020, iss. 232, pp. 50–78. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.232.50-78. (In Russ.)

West G.B., *Brown J.H.*, *Enquist B.J.* A general model for the origin of allometric scaling laws in biology. *Science*, 1997, vol. 276, pp. 122-126.

West G.B., *Brown J.H.*, *Enquist B.J.* A general model for the structure and allometry of plant vascular system. *Nature*, 1999, vol. 400, pp. 664-667. DOI: 10.1038/23251.

Xu Q., *Lei X.*, *Zhang H.* A novel method for approaching the compatibility of tree biomass estimation by multi-task neural networks. *Forest Ecology and Management*, 2022, vol. 508, art. no. 120011. DOI: 10.1016/j.foreco.2022.120011.

Zeng W. Developing tree biomass models for eight major tree species in China. *Biomass Volume Estimation and Valorization for Energy*. 2017, chapter 1, pp. 3-21. DOI: 10.5772/65664.

Zianis D., *Mencuccini M.* On simplifying allometric analyses of forest biomass. *Forest Ecology and Management*, 2004, vol. 187, pp. 311–332. DOI: 10.1016/j.foreco.2003.07.007.

Материал поступил в редакцию 05.03.2025

Усольцев В.А., **Часовских В.П**. Мультиколлинеарность переменных в евразийской базе данных о фитомассе деревьев и всеобщая аллометрия // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 38–60. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.38–60

В связи с изменением климата лесная фитомасса обретает исключительное экологическое значение планетарного уровня. Для ее оценки необходимы легко реализуемые методы, одним из которых является метод аллометрических моделей. Поскольку фитомасса связана с несколькими дендрометрическими показателями дерева, стали разрабатывать многофакторные аллометрические

модели, однако проверка их на мультиколлинеарность обычно не проводилась, что приводило к их неустойчивости. В работе предпринята попытка на основе наиболее полной на сегодня авторской базы данных о фитомассе деревьев Евразии оптимизировать структуру многофакторной модели фитомассы по условию мультиколлинеарности независимых переменных. Для этого из базы данных для 12 лесообразующих родов отобраны 11170 модельных деревьев с измеренной надземной фитомассой, из которых только у 1514 деревьев была измерена фитомасса корней. Проанализирована мультиколлинеарность возраста дерева, его диаметра ствола и высоты. По результатам расчета коэффициента инфляции дисперсии (VIF) установлено, что при включении названных трех переменных в модель она не является корректной по условию мультиколлинеарности ни для одного из 12 родов. При анализе VIF по двум прогностическим переменным в разных сочетаниях наименьшие значения VIF (< 5) оказались у переменных возраста и диаметра, но лишь для 6 родов, наиболее представленных по количеству измерений. Казалось бы, модель, включающая совокупность именно этих двух переменных с минимальным VIF, является оптимальной по структуре. Однако низкая мультиколлинеарность переменных еще не обеспечивает оптимальности структуры модели. Регрессионный анализ связи фитомассы с названными двумя переменными показал, что возраст в некоторых случаях статистически не значим, а его вклад в объяснение изменчивости фитомассы составил менее 7%. Это означает, что оптимальная структура модели может быть установлена в результате некого компромисса между низкой мультиколлинеарностью и высоким вкладом переменных в объяснение изменчивости фитомассы. В итоге для 12 родов рассчитаны всеобщие аллометрические модели для оценки надземной, подземной и общей фитомассы лишь по диаметру ствола, которые при локальном использовании могут давать смещения результатов. Вопрос оптимизации структуры модели фитомассы остается, таким образом, открытым, и исследователю в каждом случае приходится находить «золотую середину» между отбором независимых переменных с минимальной мультиколлинеарностью с одной стороны и включением в модель наибольшего количества статистически значимых независимых переменных с другой.

Ключевые слова: лесообразующие роды Евразии, база данных о фитомассе деревьев, мультиколлинеарность независимых переменных, всеобщие модели фитомассы, смещения оценок.

Usoltsev V.A., Chasovskikh V.P. Multicollinearity of variables in the Eurasian tree biomass database and generic allometry. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 38–60 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.38-60

Due to climate change, the forest biomass acquires exceptional ecological significance at the planetary level. To evaluate it, easy-to-implement methods are

needed, one of which is the method of allometric models. Since biomass is related to some dendrometric indices of the tree, multifactorial allometric models began to be developed, however, their verification for multicollinearity was usually not carried out, and the models were often unstable. The paper attempts to optimize the structure of a multifactorial model of biomass under the condition of multicollinearity of independent variables based on the most comprehensive author's database of tree biomass to date. For this purpose, 11,170 model trees with measured aboveground biomass were selected from the database for 12 forest-forming genera, of which only 1,514 trees had their root biomass measured. The multicollinearity of the tree's age, DBH, and height is analyzed. Based on the calculation of the variance inflation coefficient (VIF), it was found that when these three variables being included in the model, give not correct result under the condition of multi-collinearity for 12 genera. When analyzing VIF for two prognostic variables in different combinations, the lowest VIF values (< 5) were found for age and DBH, but only for 6 genera, the most represented by the number of measurements. It would seem that a model that includes a combination of these two variables with a minimum VIF is optimal in its structure. However, the low multicollinearity of variables does not ensure the optimality of the model structure. Regression analysis of the relationship of biomass with these two variables showed that age in some cases is not statistically significant, and its contribution to explaining the biomass variability was less than 7%. This means that the optimal model structure can be established as a result of some compromise between low multicollinearity and high contribution of variables to the explanation of biomass variability. After all, generic allometric models have been calculated to estimate the aboveground, underground, and total biomass by DBH for 12 genera, which, when used locally, can produce biased results. Thus, the issue of optimizing the structure of the biomass model remains open, and in each case the researcher has to find a “golden mean” between selecting independent variables with minimal multicollinearity, on the one hand, and between including the largest number of statistically significant independent variables in the model, on the other.

K e y w o r d s : forest-forming genera of Eurasia, database on biomass of trees, multicollinearity of independent variables, generic models of biomass, biases of estimates.

УСОЛЬЦЕВ Владимир Андреевич – профессор кафедры лесной таксации и лесоустройства Уральского государственного лесотехнического университета, доктор сельскохозяйственных наук

620100, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия;

профессор кафедры информационных технологий и статистики Уральского государственного экономического университета

620144, ул. 8 Марта, д. 62/45, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: Usoltsev50@mail.ru

USOLTSEV Vladimir A. – DSc (Agricultural), Professor of the Department of Forest Taxation and Forest Management, Ural State Forest Engineering University.

620100. Sibirskiy Trakt str. 37. Yekaterinburg. Russia;

professor of the Department of Information Technologies and Statistics of the Ural State University of Economics.

620144. 8 Marta str. 62/45. Yekaterinburg. Russia. E-mail: Usoltsev50@mail.ru

ЧАСОВСКИХ Виктор Петрович – профессор кафедры шахматного искусства и компьютерной математики Уральского государственного экономического университета, доктор технических наук, академик Российской академии военных наук.

620144, ул. 8 Марта, д. 62/45, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: u2007u@ya.ru

CHASOVSKIKH Viktor P. – DSc (Technical), Professor of the Department of Chess Art and Computer Mathematics, Ural State University of Economics, Academician of the Russian Academy of Military Sciences.

620144. 8 Marta str. 62/45. Yekaterinburg. Russia. E-mail: u2007u@ya.ru

УДК 630*2

Н.Ф. Гибадуллин, Д.А. Зайцев, И.В. Бачериков, Х.Г. Мусин, Н.И. Мирсияпов, А.Ф. Галимуллин

МАКРОСТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КСИЛЕМЫ ПО ВЫСОТЕ СТВОЛА В ЕСТЕСТВЕННЫХ И ИСКУССТВЕННЫХ СОСНЯКАХ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН

Введение. Древесина – материал биологического происхождения, для которого характерна вариативность свойств, что связано с особенностями биологического развития дерева в онтогенезе. Формирование годичного прироста древесины связано как с условиями произрастания, так и с возрастом. Показатель плотности древесины является комплексным результирующим параметром её структуры [Полубояринов, 1976, 1991; Усольцев, Цепордей, 2020]. На показатели изменчивости сильно влияют внешние факторы, основным из которых являются условия произрастания [Ваганов, Шашкин, 2000], а также дифференциация деревьев внутри насаждения, выраженная в ряде распределения деревьев по ступеням толщины [Zaytsev et al., 2019]. В стволе плотность дерева распределена неравномерно и уменьшается от комля к вершине и по радиусу ствола [Полубояринов, 1976]. Изменчивость плотности по высоте присутствует в любом стволе дерева, но её значение индивидуально для разных видов. Она может значительно варьировать в пределах ствола дерева [Pretzsch et al., 2018] исходя из анатомического строения ранней и поздней ксилемы у хвойных пород [Антонов и др., 2010; Данилов, Скупченко, 2014; Bjorklund et al., 2017], между сердцевиной и заболонью и по высоте дерева [Swenson, Enquist, 2008].

Быстрое и надёжное определение плотности древесины на растущих деревьях имеет решающее значение для пространственного и крупномасштабного анализа накопления углерода [Domke et al., 2012] и оценки качества древесины [Gao et al., 2017]. Рост числа научных работ, посвященных плотности древесины и анатомическому строению ствола, позволяет создавать прогнозные модели динамики исследуемых показателей [Vaganov et al., 2006].

На текущий момент в России значительны площади бывших сельскохозяйственных земель, на которых происходит облесение как естественным способом, так и высаженными лесными культурами [Люри и др., 2010]. Леса на таких землях имеют значительный потенциал для получения древесины, и интерес представляет изучение их особенностей в сравнении с древостоями

естественного происхождения на лесных землях [Голубева и др., 2016; Грибов и др., 2020; Януш и др., 2023]. Для европейской части России имеется достаточное число публикаций, посвященных изучению плотности и структуры древесины хвойных пород, произрастающих на землях, ранее использовавшихся под пашню [Лохов, 2011; Наквасина, Шумилова, 2021; Корчагов и др., 2023; Danilov et al., 2018]. Однако для условий Республики Татарстан данное направление исследований является малоизученным. Ввиду этого целью данного исследования являлась оценка вариации анатомических показателей и плотности древесины сосны по высоте ствола дерева в искусственных насаждениях на старопахотных землях сравнительно с естественно сформировавшимися сосновыми насаждениями Республики Татарстан.

Объекты и методика исследования. Для решения задач исследования были отобраны два участка сосновых насаждений (*Pinus sylvestris* L.) на территории Республики Татарстан в Лаишевском районе, Пригородное лесничество. Объекты представляли из себя естественно сформировавшийся древостой со средним возрастом 85 лет на лесных почвах и лесные культуры возрастом 55 лет на бывшей пашне. На данных опытных участках были заложены пробные площади, проводилась таксация древостоя (сплошной перечет), были сделаны почвенные прикопки для уточнения почвенно-грунтовых условий (песчаная серая почва, сходные ландшафтные условия). Запас древостоя в естественном насаждении составил 210 $м^3$/га в культурах – 255 $м^3$/га. Ряды распределения по ступеням толщины древостоя и в естественно сформировавшемся древостое, и в лесных культурах близки к нормальному.

На объектах был проведен спил модельных деревьев (по 6 экземпляров на объект), отобранные модельные деревья охватывали представленные ступени толщины, отличались по диаметру и высоте (табл. 1). Возраст дерева определялся по числу годичных приростов спила на уровне пня с поправкой на высоту (3 года) [Ваганов, Шашкин, 2000].

Все модельные деревья раскряжевывались на 10 отрезков (по 10% от длины ствола каждый). С каждого отрезка отбирался диск, на котором были исследована ширина годичного слоя (далее – ШГС), ширина зоны поздней и зоны ранней ксилемы по годам [Ваганов, Шашкин, 2000]. Также было проведено измерение базисной плотности древесины по секторам отобранных дисков [Полубояринов, 1976]. Средние по стволу и медианные значения макроструктурных показателей стволов и базисной плотности древесины по ступеням толщины приведены в табл. 2 (медианные значения приведены для исключения влияния выбросов).

Таблица 1

Высота и диаметр ствола на высоте 1,3 м модельных деревьев по объектам исследования

The height and diameter of the trunk at a height of 1.3 m of the model trees according to the objects of the study

Естественный древостой на лесных почвах, 85 лет						
Диаметр, см	14	16	22	24	26	28
Высота, м	15,0	16,5	23,0	24,0	26,0	24,1
Возраст, лет	70	69	85	85	84	81
Лесные культуры на старопахотных землях, 55 лет						
Диаметр, см	12	14	14	16	20	22
Высота, м	12,5	16,0	16,7	18,0	19,7	20,0
Возраст, лет	54	55	56	57	56	56

Таблица 2

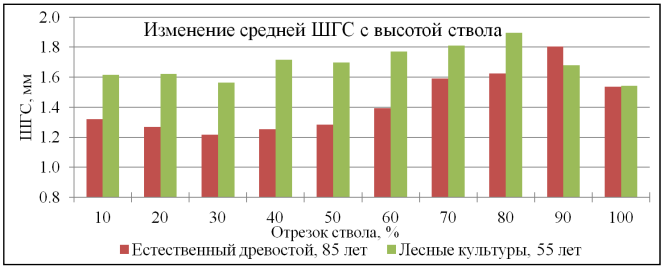
Средние и медианные показатели макроструктуры стволов по ступеням толщины и базисной плотности по объектам исследования

Average and median macrostructural parameters of trunks by diameter classes and basic density by study objects

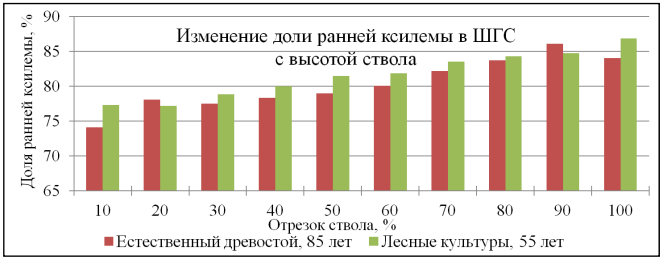
Естественный древостой на лесных почвах, 85 лет						
Ступень толщины, см	14	16	22	24	26	28
Поздняя ксилема, мм	0,24* 0,24	0,23 0,22	0,31 0,29	0,28 0,25	0,34 0,32	0,34 0,34
Ранняя ксилема, мм	0.75 0,76	0.75 0,80	1,09 1,19	1,14 1,13	1,36 1,29	1,29 1,26
ШГС, мм	0,99 1,01	0,98 1,03	1,40 1,47	1,42 1,42	1,69 1,66	1,63 1,60
Базисная плотность, кг/м^3	518,2	490,2	446,1	434,0	429,4	455,2
Лесные культуры на старопахотных землях, 55 лет						
Ступень толщины, см	12	14	16	20	22	
Поздняя ксилема, мм	0,28 0,26	0,30 0,28	0,32 0,27	0,43 0,40	0,42 0,38	
Ранняя ксилема, мм	0,90 0,90	1,22 1,23	1,38 1,39	1,71 1,91	1,63 1,69	
ШГС, мм	1,17 1,15	1,51 1,48	1,69 1,70	2,13 2,33	2,04 2,11	
Базисная плотность, кг/м^3	506,8	466,8	482,4	456,3	383,4	

Примечание: * в числителе – средние по стволу показатели (с учетом «веса» исследуемых образцов в стволе), в знаменателе – медианные

Результаты исследования. Изучение вариации параметров макроструктуры по высоте ствола показало, что в лесных культурах показатели выше, чем в естественно сформировавшемся древостое, но и в тех, и в других изменения идут волнообразно с уменьшением показателя средней ШГС в 10–20% в верхней части ствола (рис. 1a). В целом по объектам исследования с увеличением высоты ствола доля ранней ксилемы увеличивается (а поздней ксилемы, соответственно, уменьшается). В культурах на старопахотных почвах доля ранней ксилемы выше, чем в древостоях естественного происхождения. Интерес представляет тот факт, что в естественно сформировавшемся древостое на самых верхних 10% ствола на большинстве отобранных модельных деревьев доля ранней древесины снижается. Исключением являлось самое высокое модельное дерево (высотой 26 м), что может быть связано с возрастом более крупных ступеней и повышенной чувствительностью более мелких ступеней к колебаниям освещенности, температуры и др. [Vaganov et al., 2006]. В лесных культурах подобной тенденции не наблюдалось. В графическом виде данные закономерности приведены на рис. 1b.



(a)

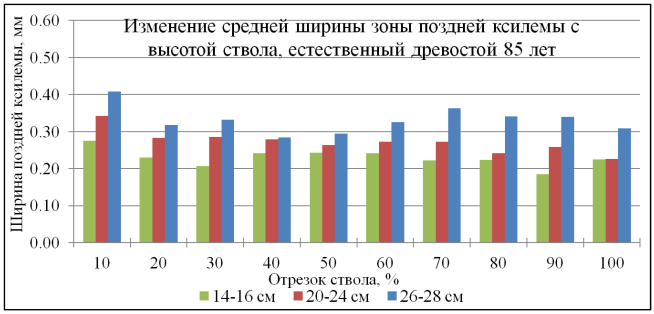


(b)

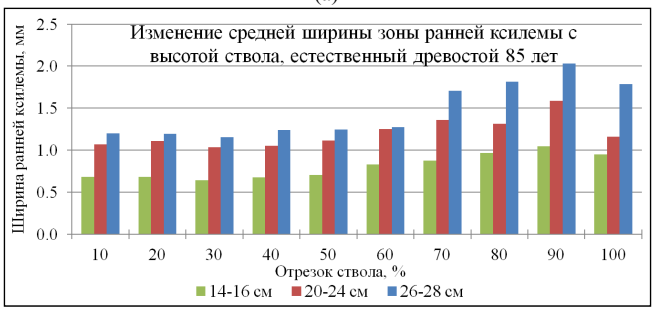
Рис. 1. Изменение макроструктурных показателей древесины по высоте ствола на опытных объектах: (a) изменение средней ШГС; (b) изменение доли ранней ксилемы в ШГС

Fig. 1. Changes in the wood macrostructural parameters of the trunk height at experimental sites: (a) change in the average width of the annual layer; (b) change in the proportion of early xylem in the width of the annual layer

Обработка полученного массива данных показала однородность показателей макроструктуры по близким ступеням толщины в ряде случаев. Данные по двухсантиметровым ступеням толщины (табл. 2) были проанализированы по критерию Уилкоксона (так как показатели не имели нормального распределения и шли в порядковой шкале от нижней взятой шайбы к верхней). Анализ для естественно сформировавшегося древостоя 85 лет показал однородность макроструктурных показателей в соседних ступенях (14-16, 22-24, 26-28 см) на уровне достоверности 95%. Для лесных культур 55 лет отмеченный факт менее выражен, но также прослеживается по медианным значениям (табл. 2). В связи с этим данные по этому объекту также были объединены в совокупности 14-16 и 20-22 см. В графическом виде изменение макроструктурных показателей по отрезкам ствола представлены на рис. 2, 3 (приведены средние значения).



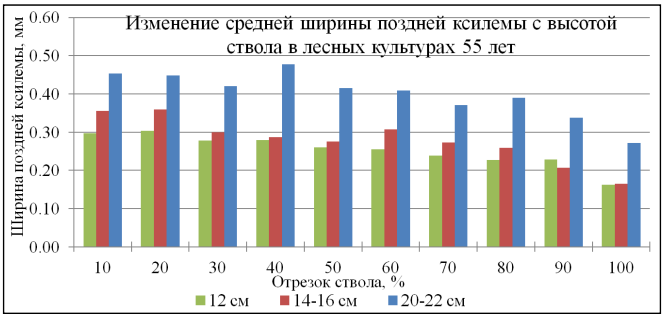
(a)



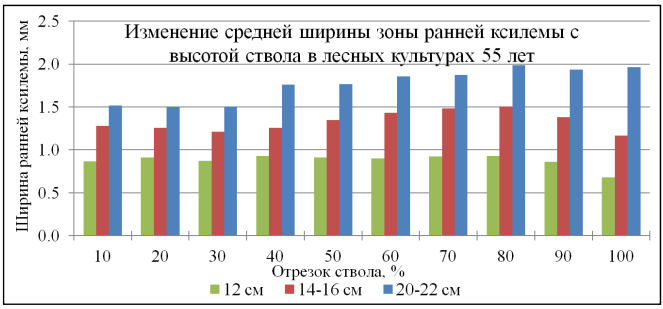
(b)

Рис. 2. Изменение макроструктурных показателей по высоте ствола в естественном древостое 85 лет: (a) по ширине зоны поздней ксилемы; (b) по ширине зоны ранней ксилемы

Fig. 2. Changes in the macrostructural parameters of trunk height in a natural stand of 85 years: (a) in the width of the late xylem zone; (b) in the width of the early xylem zone



(a)



(b)

Рис. 3. Изменение макроструктурных показателей по высоте ствола в лесных культурах 55 лет: (a) по ширине зоны поздней ксилемы; (b) по ширине зоны ранней ксилемы

Fig. 3. Changes in macrostructural parameters of trunk height in forest plantation 55 years old: (a) in the width of the late xylem zone; (b) in the width of the early xylem zone

Тест данных по критерию Уилкоксона показал значимость различий между сходными ступенями толщины в естественно сформировавшемся древостое и в лесных культурах по всем исследуемым показателям за исключением базисной плотности для сравниваемых совокупностей ступеней 22-24 (в естественном древостое) и 20-22 см (в культурах). Таким образом, можно сделать вывод об отсутствии различий в показателях базисной плотности древесины на уровне 95% между искусственно выращенным древостоем и естественным в наиболее представленных ступенях толщины древостоя. В табл. 3 приведены медианные значения со стандартными отклонениями.

Таблица 3

Медианные показатели и стандартные отклонения макроструктурных характеристик и плотности древесины на опытных объектах

Median values and standard deviations of macrostructural characteristics and density of wood at experimental sites

Диаметр, см	Поздняя ксилема, мм	Ранняя ксилема, мм	ШГС, мм	Базисная плотность древесины, кг/м^3
Естественный древостой на лесных почвах, 85 лет				
14-16	0,23±0,02	0,77±0,15	1,01±0,13	503,1±46,7
22-24	0,27±0,03	1,14±0,18	1,4±0,16	445,2±92,9
26-28	0,33±0,04	1,26±0,33	1,6±0,33	446,7±34,9
Лесные культуры на старопахотных землях, 55 лет				
12	0,26±0,04	0,90±0,08	1,15±0,11	506,8±99,2
14-16	0,28±0,06	1,31±0,12	1,58±0,15	476,4±68,5
20-22	0,41±0,06	1,81±0,19	2,22±0,16	416,8±57,3

Помимо стандартного отклонения показателей интерес представляет вариация показателей макроструктуры ксилемы по высоте ствола. В естественном древостое коэффициенты вариации в среднем несколько выше, чем в лесных культурах (табл. 4). В лесных культурах вариация показателей поздней древесины по высоте ствола выше, чем в естественном древостое, при этом в естественном древостое в свою очередь выше вариация показателей ранней ксилемы, причем по всем ступеням толщины. В лесных культурах вслед за показателями ранней ксилемы закономерно низка вариация и показателей ШГС по высоте ствола. Более равномерный годичный прирост по стволу объясняется несколько сглаженными внешними условиями для формирования ствола в исследуемых культурах на старопахотных землях. Разравнивание и постоянное перемешивание верхних горизонтов почвы во время бывшего сельскохозяйственного использования, одинаковый шаг посадки лесных культур оказали более равномерное влияние на развитие отдельных деревьев на этом объекте. В естественном древостое на лесных почвах влияние конкуренции внутри насаждения и особенности занимаемых отдельными деревьями участков микрорельефа привели к большей вариации ШГС.

Таблица 4

Коэффициенты вариации макроструктурных характеристик и плотности древесины по высоте ствола на опытных объектах

Coefficients of variation of macrostructural characteristics and density of wood by trunk height at experimental sites

Диаметр, см	Поздняя ксилема, мм	Ранняя ксилема, мм	ШГС, мм	Базисная плотность древесины, кг/м^3
Естественный древостой на лесных почвах, 85 лет				
14-16	10,4	18,2	13,0	9,1
22-24	11,3	14,5	11,1	22,5
26-28	10,7	22,5	18,5	7,9
Лесные культуры на старопахотных землях, 55 лет				
12	16,4	8,6	9,7	20,8
14-16	21,5	8,7	9,2	14,6
20-22	15,2	10,9	7,2	13,5

Заключение. Подводя итоги исследования особенностей макроструктуры древесины сосновых насаждений в Республике Татарстан, можно сделать некоторые обобщения. Лесные культуры, высаженные на старопахотных почвах, сформировали большую среднюю ширину годичного слоя по стволу с незначительно повышенной долей ранней ксилемы относительно естественных насаждений. При этом повышенная доля ранней ксилемы в ШГС не привела к формированию значимо менее плотной древесины в насаждении. Плотность древесины ствола в наиболее представленных ступенях толщины (20-24 см) в лесных культурах и в естественном древостое сходная на уровне достоверности 95%. Учитывая превосходящую продуктивность исследуемых лесных культур, можно заключить, что на территории Республики Татарстан фитомасса таких насаждений значительно превышает естественные спелые насаждения в сходных ландшафтах уже к возрасту 55 лет. Выравненные условия (старопахотные почвы, рядовая посадка лесных культур) привели к меньшей вариабельности показателей годичного прироста по стволу относительно естественно сформировавшегося древостоя.

Вклад авторов. Все авторы внесли равный вклад на всех этапах исследования.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Антонов А.М., *Коновалов Д.Ю.*, *Чалых Д.Е.*, *Корчагов С.А.* О взаимосвязи влияния топографии анатомических элементов на показатели плотности и прочности древесины // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2010. Вып. 190. С. 24–34.

Ваганов Е.А., *Шашкин А.В.* Рост и структура годичных колец хвойных. Новосибирск: Наука, 2000. 232 с.

Голубева Л.В., *Наквасина Е.Н.*, *Минин Н.С.* Продуктивность и качество древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в постагрогенных насаждениях // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2016. Вып. 215. С. 19–29. DOI: 10.21266/2079-4304.2016.215.19-29.

Грибов С.Е., *Корчагов С.А.*, *Хамитов Р.С.*, *Евдокимов И.В.* Производительность древостоев, сформировавшихся на землях сельскохозяйственного назначения // Лесной вестник. 2020. № 6. С. 19–25. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-6-19-25.

Данилов Д.А., *Скупченко В.Б.* Изменения в строении древесины сосны и ели на анатомическом уровне в древостоях, пройденных рубками ухода и комплексным уходом // ИВУЗ. Лесной журнал. 2014. № 5. С. 70–88.

Корчагов С.А., *Щекалев Р.В.*, *Грибов С.Е.*, *Михайлов К.Л.*, *Чавчавадзе Е.С.* Изменчивость плотности древесины сосны обыкновенной в северо-восточной части ее ареала // Успехи современного естествознания. 2023. № 12. С. 39–44. DOI: 10.17513/use.38168.

Лохов Д.В. Лесоводственная оценка и показатели качества древесины культур сосны на залежных землях // Экологические проблемы Севера: межвуз. сб. науч. тр. 2011. Вып. 14. С. 73–76.

Люри Д.И., *Горячкин С.В.*, *Караваева Н.А.*, *Денисенко Е.А.*, *Нефедова Т.Г.* Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС, 2010. 416 с.

Наквасина Е.Н., *Шумилова Ю.Н.* Динамика запасов углерода при формировании лесов на постагрогенных землях // ИВУЗ. Лесной журнал. 2021. № 1 (379). С. 46–59. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-46-59.

Полубояринов О.И. Плотность древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 160 с.

Полубояринов О.И. Качество древесины культур сосны плантационного типа на Северо-Западе европейской части СССР // Лесоводство, лесные культуры и почвоведение: межвуз. сб. науч. тр. Ленинград, 1991. С. 89–95.

Усольцев В.А., *Цепордей И.С.* Квалиметрия фитомассы лесных деревьев: плотность и содержание сухого вещества: монография. Екатеринбург: УГЛТУ, 2020. 179 с.

Януш С.Ю., *Данилов Д.А.*, *Зайцев Д.А.* Плотность древесины сосны и ели в насаждениях на старопахотных и лесных землях в Ленинградской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. № 243. С. 46–67. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.243.46-67.

Bjorklund J., *Seftigen K.*, *Schweingruber F.*, *Fonti P.*, *von Arx G.*, *Bryukhanova M.V.*, *Cuny H.E.*, *Carrer M.*, *Castagneri D.*, *Frank D.C.* Cell size and wall dimensions drive distinct variability of earlywood and latewood density in Northern Hemisphere conifers // New Phytologist. 2017. Vol. 216. P. 728–740. DOI: 10.1111/nph.14639.

Danilov D., *Belyaeva N.*, *Janusz S.* Structure of mature mixed pine-and-spruce stands on postagrogenic lands in Leningrad region, Russia // Research for Rural Development. 2018. Vol. 1. P. 131–137. DOI: 10.22616/rrd.24.2018.020.

Domke G.M., *Woodall C.W.*, *Smith J.E.*, *Westfall J.A.*, *McRoberts R.E.* Consequences of Alternative Tree-Level Biomass Estimation Procedures on U.S. Forest Carbon Stock Estimates // Forest Ecology and Management. 2012. Vol. 270. P. 108–116. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.01.022.

Gao S., *Wang X.*, *Wiemann M.C.*, *Brashaw B.K.*, *Ross R.J.*, *Wang L.* A critical analysis of methods for rapid and nondestructive determination of wood density in standing trees // Annals of Forest Science. 2017. Vol. 74, iss. 2. Art. no. 27. DOI: 10.1007/s13595-017-0623-4.

Pretzsch H., *Biber P.*, *Schütze G.*, *Kemmerer J.*, *Uhl E.* Wood density reduced while wood volume growth accelerated in central European forests since 1870 // Forest Ecology and Management. 2018. Vol. 429. P. 589–616. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.07.045.

Swenson N.G., *Enquist B.J.* The relationship between stem and branch wood specific gravity and the ability of each measure to predict leaf area // American Journal of Botany. 2008. Vol. 95. P. 516–519. DOI: 10.3732/ajb.95.4.516.

Vaganov E.A., *Hughes M.K.*, *Shashkin A.V.* Growth dynamics of conifer Tree Rings: Images of Past and Future Environments (Ecological Studies. Vol. 183). Berlin-Heidelberg: Springer, 2006. 356 p.

Zaytsev D.A., *Danilov D.A.*, *Navalihin S.V.* Wood density of pine and spruce stands according to trees diameter distribution after thinning // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 226, iss. 1. Art. no. 012065. DOI: 10.1088/1755-1315/226/1/012065.

References

Antonov A.M., *Konovalov D.Yu.*, *Chalykh D.E.*, *Korchagov S.A.* On the interrelation of the influence of the topography of anatomical elements on the density and strength of wood. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2010, iss. 190, pp. 24–34. (In Russ.)

Bjorklund J., *Seftigen K.*, *Schweingruber F.*, *Fonti P.*, *von Arx G.*, *Bryukhanova M.V.*, *Cuny H.E.*, *Carrer M.*, *Castagneri D.*, *Frank D.C.* Cell size and wall dimensions drive distinct variability of earlywood and latewood density in Northern Hemisphere conifers. *New Phytologist*, 2017, vol. 216, pp. 728–740. DOI: 10.1111/nph.14639.

Danilov D.A., *Skupchenko V.B.* Changes in the Structure of Pine and Spruce on the Anatomical Level in the Stands Passed Cutting and Complex Care. *Russian Forestry Journal*, 2014, no. 5, pp. 70–88. (In Russ.)

Danilov D., *Belyaeva N.*, *Janusz S.* Structure of mature mixed pine-and-spruce stands on postagrogenic lands in Leningrad region, Russia. *Research for Rural Development*, 2018, vol. 1, pp. 131–137. DOI: 10.22616/rrd.24.2018.020.

Domke G.M., *Woodall C.W.*, *Smith J.E.*, *Westfall J.A.*, *McRoberts R.E.* Consequences of Alternative Tree-Level Biomass Estimation Procedures on U.S. Forest Carbon Stock Estimates. *Forest Ecology and Management*, 2012, vol. 270, pp. 108–116. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.01.022.

Gao S., *Wang X.*, *Wiemann M.C.*, *Brashaw B.K.*, *Ross R.J.*, *Wang L.* A critical analysis of methods for rapid and nondestructive determination of wood density in standing trees. *Annals of Forest Science*, 2017, vol. 74, iss. 2, art. no. 27. DOI: 10.1007/s13595-017-0623-4

Golubeva L.V., *Nakvasina E.N.*, *Minin N.S.* Productivity and wood quality of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in postagrogenic forests. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2016, iss. 215, pp. 19–29. DOI: 10.21266/2079-4304.2016.215.19-29. (In Russ.)

Gribov S.E., *Korchagov S.A.*, *Khamitov R.S.*, *Evdokimov I.V.* Productivity of stands formed on agricultural lands. *Forestry Bulletin*, 2020, vol. 6, pp. 19–25. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-6-19-25. (In Russ.)

Korchagov S.A., *Shchekalev R.V.*, *Gribov S.E.*, *Mikhailov K.L.*, *Chavchavadze E.S.* Variability of wood density of Scots pine in the northeastern part of its range. *Advances of current natural sciences*, 2023, no. 12, pp. 39–44. DOI: 10.17513/use.38168. (In Russ.)

Lokhov D.V. Forest valuation and quality indicators of the wood of pine crops on fallow lands. *Environmental problems of the North*: interuniversity collection of scientific works, 2011, vol. 14, pp. 73–76. (In Russ.)

Luri D.I., *Goryachkin S.V.*, *Karavaeva N.A.*, *Denisenko E.A.*, *Nefedova T.G.* Dynamics of agricultural lands in Russia in the XX century and postagrogenic recovery of vegetation and soils. Moscow: GEOS, 2010. 416 p. (In Russ.)

Nakvasina E.N., *Shumilova Yu.N.* Dynamics of Carbon Stocks in the Formation of Forests on Post-Agrogenic Lands. *Russian Forestry Journal*, 2021, no. 1 (379), pp. 46–59. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-46-59. (In Russ.)

Poluboyarinov O.I. Density of wood. Moscow: Forest Industry, 1976. 160 p. (In Russ.)

Poluboyarinov O.I. Quality of wood from plantation-type pine crops in the North-West of the European part of the USSR. *Forestry*, *forest crops and soil science:* interuniversity collection of scientific papers. Leningrad, 1991, pp. 89–95. (In Russ.)

Pretzsch H., *Biber P.*, *Schütze G.*, *Kemmerer J.*, *Uhl E.* Wood density reduced while wood volume growth accelerated in central European forests since 1870. *Forest Ecology and Management*, 2018, vol. 429, pp. 589–616. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.07.045.

Swenson N.G., *Enquist B.J.* The relationship between stem and branch wood specific gravity and the ability of each measure to predict leaf area. *American Journal of Botany*, 2008, vol. 95, pp. 516–519. DOI: 10.3732/ajb.95.4.516.

Usoltsev V.A., *Tsepordey I.S.* Qualimetry of phytomass of forest trees: density and dry substance content: a monograph. Yekaterinburg: Ural State Forestry Engineering University, 2020. 179 p. (In Russ.)

Vaganov E.A., *Shashkin A.V.* Growth and structure of annual rings of conifers. Novosibirsk: Nauka, 2000. 232 p. (In Russ.)

Vaganov E.A., *Hughes M.K.*, *Shashkin A.V.* Growth dynamics of conifer Tree Rings: Images of Past and Future Environments (Ecological Studies. Vol. 183). Berlin-Heidelberg: Springer, 2006. 356 p.

Yanush S.Y., *Danilov D.A.*, *Zaytsev D.A.* Wood density of pine and spruce in stands on old-fallow and forest lands in the Leningrad Region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2023, iss. 243, pp. 46–67. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.243.46-67. (In Russ.)

Zaytsev D.A., *Danilov D.A.*, *Navalihin S.V.* Wood density of pine and spruce stands according to trees diameter distribution after thinning. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 226, iss. 1, art. no. 012065. DOI: 10.1088/1755- 1315/226/1/012065.

Материал поступил в редакцию 06.08.2025

Гибадуллин Н.Ф., Зайцев Д.А., Бачериков И.В., Мусин Х.Г., Мирсияпов Н.И., Галимуллин А.Ф. Макроструктурные изменения ксилемы по высоте ствола в естественных и искусственных сосняках Республики Татарстан // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 61–75. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.61-75

В статье рассмотрены особенности вариации анатомических характеристик и плотности древесины по стволу в насаждениях сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на территории Республики Татарстан. Объектами выступили искусственные насаждения на бывшей пашне со средним возрастом 55 лет и естественные насаждения возрастом 85 лет на лесных почвах (материнские породы на объектах и ландшафтные условия сходные). На каждом из объектов были заложены пробные площади, на которых спилены модельные деревья различных ступеней толщины древостоя, раскряжеванные затем на отрезки по 10%. Далее на отобранных дисках была изучена макроструктура древесины по высоте ствола с выделением зон поздней и ранней ксилемы в годичном приросте, а также проведено измерение базисной плотности древесины. Исследование показало, что лесные культуры, высаженные на старопахотных почвах, сформировали большую среднюю ширину годичного слоя по стволу с незначительно повышенной долей ранней ксилемы относительно естественных насаждений. При этом повышенная доля ранней ксилемы в ширине годичного слоя не привела к формированию значимо менее плотной древесины в

насаждении. Плотность древесины ствола в наиболее представленных ступенях толщины (20-24 см) в лесных культурах и в естественном древостое сходная на уровне достоверности 95%. Учитывая превосходящую продуктивность исследуемых лесных культур (255 м^3/га против 210 м^3/га в естественном насаждении), можно заключить, что на территории Республики Татарстан фитомасса таких насаждений значительно превышает естественные спелые насаждения в сходных ландшафтах уже к возрасту 55 лет. Выравненные условия на объекте с лесными культурами (старопахотные почвы с постоянным перемешиванием верхних горизонтов и рядовая посадка самих культур) привели к меньшей вариабельности показателей годичного прироста по стволу относительно естественно сформировавшегося древостоя, в котором влияние конкуренции внутри насаждения и особенности занимаемых отдельными деревьями участков микрорельефа привели к большим колебаниям параметров.

Ключевые слова: ширина годичного слоя, ранняя ксилема, поздняя ксилема, плотность древесины, лесные культуры, старопахотные почвы, сосна обыкновенная.

Gibadullin N.F., Zaytsev D.A., Bacherikov I.V., Musin H.G., Mirsiyapov N.I., Galimullin A.F. Macrostructural changes in xylem by trunk height in natural and artificial pine forests of the Republic of Tatarstan. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 61–75 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.61-75

The article considers the features of variation of anatomical characteristics and density of wood along the trunk in stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) on the territory of the Republic of Tatarstan, Russia. The objects of the study were forest plantations on former arable land with an average age of 55 years and natural stands aged 85 years on forest soils (the parent soils on the sites and the landscape conditions are similar). Trial areas were laid out on each of the objects, on which model trees were cut down from various diameter classes, and then buckled into segments of 10%. Further, the macrostructure of wood along the trunk height was studied on the selected discs, with the allocation of late and early xylem zones in annual growth width, and the basic density of wood was measured. The study showed that forest plantations on old arable soils formed a large average annual layer width along the trunk with a slightly increased proportion of early xylem relative to natural stands. At the same time, the increased proportion of early xylem in the annual layer width did not lead to the formation of significantly less dense wood in the plantation. The density of trunk wood in the most represented diameter classes (20-24 cm) in forest plantations and in natural stands is similar at a 95% confidence level. Given the superior productivity of the studied forest crops (255 m^3/ha versus 210 m^3/ha in natural stands), it can be concluded that in the Republic of Tatarstan the phytomass of such plantations significantly exceeds the natural stands on in similar

landscapes by the age of 55 years. The aligned conditions at the site with forest plantations (old arable soils with constant mixing of the upper soil horizons and ordinary planting) led to less variability in annual growth rates along the trunk relative to a naturally formed stand, in which the influence of competition within the stand and the features of the microrelief areas occupied by individual trees led to large fluctuations in parameters.

K e y w o r d s : annual layer width, early xylem, late xylem, wood density, forest plantations, old arable soils, Scots pine.

ГИБАДУЛЛИН Нурсиль Фоатович – доцент кафедры лесоводства и лесных культур факультета лесного хозяйства и экологии Казанского государственного аграрного университета, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 4388-8244.

420075, ул. Главная, д. 69, к. 1, п. Дербышки, г. Казань, Республика Татарстан, Россия. E-mail: Nursil.Gibadullin@mail.ru

GIBADULLIN Nursil F. – PhD (Agriculture), Associate Professor of the Department of Forestry and Forest Cultures, Kazan State Agrarian University. SPIN-code: 4388-8244.

420075. Glavnaya str. 69, build. 1. Derbyshki village. Kazan. Republic of Tatarstan. Russia. E-mail: Nursil.Gibadullin@mail.ru

ЗАЙЦЕВ Дмитрий Андреевич – доцент кафедры лесоводства Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат сельскохозяйственных наук.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия;

старший научный сотрудник отдела агрохимии и агроландшафтов Ленинградского НИИСХ «Белогорка» – филиала ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр картофеля им. А.Г. Лорха». SPIN-код: 1340-0849. ORCID: 0000-0002-8704-6516.

188338, Институтская ул., д. 1, д. Белогорка, Гатчинский район, Ленинградская область, Россия. E-mail: disoks@gmail.com

ZAYTSEV Dmitriy A. – PhD (Agriculture), Associate Professor of Forestry Department of St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia;

senior researcher of Department of Agrochemistry and Agrolandscapes, Leningrad Research Agriculture Institute Branch of Russian Potato Research Centre. SPIN-code: 1340-0849. ORCID: 0000-0002-8704-6516.

188338. Institutskaya str. 1. Belogorka village. Leningrad region. Russia.E-mail: disoks@gmail.com

БАЧЕРИКОВ Иван Викторович – математик-аналитик ООО «Умные цифровые решения», кандидат технических наук. SPIN-код: 7210-3600. ORCID: 0000-0002-0531-1604.

143001, ул. Западная, стр. 180, этаж 17, часть помещения 11, рабочий поселок Новоивановское, городской округ Одинцовский, Московская область, Россия. E-mail: ivashka512@gmail.com

BACHERIKOV Ivan V. – PhD (Technical), mathematician «Smart Digital Solutions» LLC. SPIN-code: 7210-3600. ORCID: 0000-0002-0531-1604.

143001. Zapadnaya str. 180, floor 17, part of room 11. Novoivanovskoye working settlement. Odintsovsky urban district. Moscow region. Russia. E-mail: ivashka512@gmail.com

МУСИН Харис Гайнутдинович – профессор кафедры лесоводства и лесных культур факультета лесного хозяйства и экологии Казанского государственного аграрного университета, доктор сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 2744-6995.

420075, ул. Главная, д. 69, к. 1, п. Дербышки, г. Казань, Республика Татарстан, Россия. E-mail: haris.musin@rambler.ru

MUSIN Haris G. – DSc (Agriculture), Professor of the Department of Forestry and Forest Cultures, Kazan State Agrarian University. SPIN-code: 2744-6995.

420075. Glavnaya str. 69, build. 1. Derbyshki village. Kazan. Republic of Tatarstan. Russia. E-mail: haris.musin@rambler.ru

МИРСИЯПОВ Наиль Ильясович – ассистент кафедры таксации и экономики лесной отрасли факультета лесного хозяйства и экологии Казанского государственного аграрного университета. SPIN-код: 7893-7128.

420075, ул. Главная, д. 69, к. 1, п. Дербышки, г. Казань, Республика Татарстан, Россия. E-mail: Nail.86@mail.ru

MIRSIYAPOV Nail' I. – Assistant of the Department of Forest Mensuration and Forest Sector Economics, Kazan State Agrarian University. SPIN-code: 7893-7128.

420075. Glavnaya str. 69, build. 1. Derbyshki village. Kazan. Republic of Tatarstan. Russia. E-mail: Nail.86@mail.ru

ГАЛИМУЛЛИН Алим Фиргатович – ассистент кафедры таксации и экономики лесной отрасли факультета лесного хозяйства и экологии Казанского государственного аграрного университета.

420075, ул. Главная, д. 69, к. 1, п. Дербышки, г. Казань, Республика Татарстан, Россия. E-mail: g.alim.f@mail.ru

GALIMULLIN Alim F. – Assistant of the Department of Forest Mensuration and Forest Sector Economics, Kazan State Agrarian University.

420075. Glavnaya str. 69, build. 1. Derbyshki village. Kazan. Republic of Tatarstan. Russia. E-mail: g.alim.f@mail.ru

УДК 719.0:632.7

В.Ф. Байрамова, И.А. Мельничук, Е.О. Приходько, А.С. Демчук, А.В. Селиховкин

ВЛИЯНИЕ ИНВАЗИЙ ВРЕДИТЕЛЕЙ И ПАТОГЕНОВ НА КОМПОЗИЦИОННУЮ ЦЕЛОСТНОСТЬ ОБЪЕКТОВ ЛАНДШАФТНОЙ АРХИТЕКТУРЫ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Введение. Объекты культурного наследия (ОКН), памятники садово-паркового искусства и ландшафтной архитектуры в условиях быстро развивающегося мегаполиса органично вплетаются в систему озеленения города и зачастую становятся основным зеленым массивом, предоставляющим рекреационные услуги в густонаселенных районах. Такие объекты обладают высокой степенью аттрактивности, связанной не только с эстетической и исторической ценностью насаждений как таковых, но и с целостностью созданного художественного образа. В основе композиционных приемов, которые использовались при создании исторических садов, лежат правила объемно-пространственного построения пейзажа и тщательный отбор растительного материала, обладающего исключительными декоративными качествами.

Историческая объемно-пространственная композиция и исторический ассортимент древесно-кустарниковых насаждений входят в перечень предмета охраны памятников садово-паркового искусства и подлежат сохранению в соответствии с Федеральным законом № 73-ФЗ «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации» от 25.06.2002 г.

В последнее десятилетие данные объективного фитомониторинга в исторических парках показывают, что биологические инвазии являются основной причиной ухудшения сохранности насаждений и композиционной целостности во многих европейских парках. Так, усыхание кипарисов, вызванное фитопатогеном *Seiridium cardinale*, привело к существенному сокращению кипарисовых насаждений *Cupressus sempervirens* в садах Боболи [Carrari et al., 2022]. *Ceratocystis platani* является существенной угрозой для сохранности платановых массивов *Platanus orientalis* в исторических садах региона Лацио (Италия) [Ciaffi et al., 2018]. Паразитарный комплекс, создаваемый патогенными грибами *Volutella buxi*, *Cylindrocladium buxicola*, и

вспышка размножения самшитовой огневки *Cydalima perspectalis* привели к полной утрате центрального партера в поместье Во-ле-Виконт[1].

Отмечено заметное ухудшение состояния исторических парковых насаждений и в России, в частности, в Санкт-Петербурге. Особую обеспокоенность вызывает состояние вязов *Ulmus* spp. и ясеней *Fraxinus* spp. Массовое развитие офиостомоза, вызванное распространением патогенного гриба-аскомицета *Ophiostoma novo-ulmi* и вязовых заболонников *Scolytus* spp. (Coleoptera: Scolytidae), привело к повсеместной гибели вязов в Санкт-Петербурге [Jürisoo et al., 2021, 2025]. Уже в 2008–2010 гг. в Павловском и Гатчинском парках распространенность офиостомоза ильмовых составила 97% и 80% соответственно [Федорова, 2010]. В парках Царского Села, на ООПТ «Дудергофские высоты» и в ряде других объектов присутствуют очаги другого инвазионного фитопатогенного гриба, поражающего ясень, – *Hymenoscyphus fraxineus* [Shabunin et al., 2020]. В 2020 г. в Петродворцовом районе было обнаружено появление фатального инвазионного вредителя ясеня – ясеневой изумрудной узкотелой златки *Agrilus planipennis* (Coleoptera: Buprestidae) [Волкович, Суслов, 2020; Selikhovkin et al., 2022]. Инвазионные патогены и вредители встречаются и на других древесных растениях в нашем городе, но именно вязы и ясени Санкт-Петербурга попали под сильный пресс инвайдеров, который грозит им полным уничтожением [Селиховкин и др., 2023].

Вязы и ясени нередко составляли основу композиционных решений во многих исторических парках в окрестностях Санкт-Петербурга. Крайне важно оценить место и значение деревьев этих пород в общем композиционном замысле, степень сохранности исторического облика объектов культурного наследия для выработки стратегии сохранения объектов садово-паркового искусства при использовании деревьев указанных пород в реставрационных мероприятиях или поиска методов адаптации к сложившимся условиям в вопросах сохранения исторических парков.

Объекты и методы исследований. На основании мониторинга состояния насаждений Санкт-Петербурга, проведенного в 2020–2022 гг. [Селиховкин и др., 2023], для анализа степени изменения композиционной целостности были выбраны ОКН федерального значения, находящиеся в

[1] По сообщению Ассоциации “Les Plus Beaux Jardins de France”. URL:https://www.lesplusbeauxjardinsdefrance.com/poliphilia/le-parterre-de-buis-du-chateau-de-vaux-le-vicomte-est-mort-vive-le-nouveau-parterre (дата обращения: 14.09.2025)

Петродворцовом районе города. Эти объекты имеют пейзажный и регулярный тип композиционного построения, основанного на декоративных свойствах вязов и ясеней.

Произведения садово-паркового искусства обладают особой притягательностью в силу своей постоянной изменчивости. Сохраняя свою пространственную структуру, насаждения, как живой элемент пейзажной картины, обеспечивают бесконечное множество впечатлений благодаря своим индивидуальным декоративным качествам. Это и сезонное изменение общей цветовой гаммы пейзажа, и светотеневые эффекты в течение суток, и общая динамика развития растений. Постоянная изменяемость растительного материала приобретает главенствующее значение при создании объемно-пространственной композиции парковой среды. Таким образом, в вопросах сохранения и восстановления объектов ландшафтной архитектуры необходимо руководствоваться не только отдельными морфологическими характеристиками того или иного дерева, но и учитывать общий физиономический тип древесных растений. Этот подход лёг в основу классификации декоративных качеств деревьев [Рубцов, 1977], согласно которой лиственные деревья условно разделены на две группы – декоративнолиственные, или теневые, и красивоцветущие. Вязы в данной классификации по совокупности признаков входят в группу дубовых типов, а ясени отнесены к группе ясеневых физиономических типов.

Вяз гладкий (*Ulmus laevis*) и вяз шершавый (*Ulmus glabra*), также как и другие представители этой группы, отличаются плотной округлой формой кроны, которая наиболее живописна при солитерном размещении. При размещении в группах вязы образуют густые тенистые шатры, что придает северным пейзажам южный колорит. Разнообразие декоративных качеств, присущих ильмовым, позволило садовым архитекторам находить применение деревьям этой породы как при создании «формальных» архитектурных садовых композиций, так и в пейзажном, «живописном» паркостроении. Большинство древесных пород этого типа, и вязы не исключение, весьма долговечны, что создает впечатление мощи и устойчивости создаваемого ландшафта.

Группа ясеневых типов включает всего два рода, одним из которых является род Ясень (*Fraxinus*). Представители рода – деревья с очень мощным габитусом, приобретшие большую популярность у садовых архитекторов благодаря своей очень ажурной светлой кроне. Также как и вязы, ясени весьма долговечны и при солитерном типе посадки с возрастом приобретают величественные формы, что делает образ старинного парка еще

более запоминающимся. В исторических парках Санкт-Петербурга ясени можно встретить во всех типах посадок: одиночных, в составе групп или аллей, а также массивов.

Александрийский парк, расположенный вдоль Санкт-Петербургского шоссе, к югу от парка «Александрия» – ОКН федерального значения (Постановление Правительства РФ от 10.07.2001 г. № 527). Его площадь – 144 га.

С момента своего создания в 1836 г. Александрийский парк был предназначен для пеших или конных прогулок и представлял собой лесной массив с небольшими открытыми пространствами полян вдоль дорог. Основным композиционным центром служил искусственный, вытянутый с севера на юг обширный водоем с несколькими островами.

В годы Великой Отечественной войны парк сильно пострадал: был вырублен значительный процент насаждений, нарушена мелиоративная сеть, зафиксированы многочисленные повреждения от бомбовых ударов. В 1946 г. в парке начались работы по расчистке завалов, корчевке изуродованных деревьев и ремонту мелиоративных канав. В 1954 г. начались работы по очистке водоемов, а также проводились рубки ухода и посадки молодых деревьев. В материалах инвентаризации отдельно отмечалось, что пейзажные картины по опушкам утратили во время войны свою выразительность, поэтому основные посадки были направлены на восстановление пейзажей береговой линии и вдоль основных маршрутов. В качестве компенсационных посадок были выбраны породы деревьев, обладающие высокими декоративными качествами и устойчивостью к переувлажнению, такие как ясень (*Fraxinus* sp.) и вяз (*Ulmus* sp.).

Посадки ясеня имеют большое водоохранное, водорегулирующее и берегозащитное значение. Кроме того, фенологическая фаза цветения у ясеня обыкновенного наступает поздней весной до распускания листвы. Распустившаяся листва имеет светло-зеленый окрас. Такая динамика позволяет создавать сезонные цветовые аспекты, направленные на определенное художественное восприятие. Таким образом, посадки ясеня (по данным инвентаризации) носили массовый характер вдоль береговой линии. Также ясень использовался как дополнительная порода при создании больших неоднородных групп при оформлении опушек полян.

Вязы широко применялись в советской практике озеленения, как для послевоенного восстановления исторических парков, так и для создания озелененных городских пространств. Осенняя окраска вязов изобилует багряными оттенками, что придает создаваемым пейзажам неповторимый колорит. В Александрийском парке вязы использовались либо в обрамле-

нии опушек и полян в посадках крупными группами, либо при создании береговой линии.

Данные по распространению поражения вязов энтомовредителями в Александрийском парке были взяты из материалов дендроинвентаризации 1957 и 1985 гг.; объемы назначенных к вырубке деревьев в участвующих в обследовании ОКН в период 2023–2024 гг. выявлялись на основании Актов обследования зеленых насаждений, подлежащих санитарной рубке. Согласно данным инвентаризации 1957 г. насаждения ясеня и вязов были отмечены в 5 инвентаризационных участках (3,5,9,11,19), расположенных на границах парка и вдоль береговой линии.

Инвентаризационный участок (выдел) 3 расположен в юго-западной части Александрийского парка. С юга он ограничен Петергофским шоссе, отделяющим парк Александрия от лесного Александрийского парка, с запада – парковой дорогой, с востока – канавой. Тип пространственной структуры участка – полуоткрытый, представленный цепью полян с единичными и групповыми посадками хвойных и лиственных пород деревьев (рис. 1).

Рис. 1. План инвентаризационного участка 3
(копия материалов инвентаризации 1985 г.)

Fig. 1. Plan of inventory area 3 (copy of inventory materials from 1985)

Участок 5 расположен в центральной части Александрийского парка. С южной, северной и восточной сторон участок ограничивают парковые дороги, с западной стороны границей участка является мелиоративная канава. Композиционным центром всего участка является первый из цепи прудов водоем, занимающий треть площади выдела. Он вытянут с юга на север, имеет сильно изрезанную береговую линию и остров в восточной части. Тип пространственной структуры – закрытый, композиционное построение основано на контрасте лесного массива и открытого пространства водоема. Важным элементом в композиционном решении является береговая линия водоема, которая оформлена в виде малых групп из лиственных и хвойных пород деревьев (рис. 2а).

(a) (b)

Рис. 2. Планы инвентаризационных участков: (a) – участок 5; (b) – участок 11 (копия материалов инвентаризации 1985 г.)

Fig. 2. Plans of the inventory areas. (a) – area 5; (b) – area 11 (copy of inventory materials from 1985)

Участок 9 расположен в западной части парка и граничит с городской застройкой. На послевоенных инвентаризационных планах этот участок представлял собой открытое переходное от индивидуальной жилой застройки к парковой территории пространство. На плане парка 1985 г. зафиксированы массовые посадки по восточной границе участка, играющие роль буферной зеленой зоны. В целом характер пространственной структуры является полуоткрытым, с пейзажным обрамлением малыми группами деревьев обширных полян (рис. 3a).

Участок 11 представляет собой центральный участок парка, 80% которого занято центральным, самым крупным по площади водоемом. Открытое пространство воды контрастирует с хвойным массивом, подступающим к кромке воды с запада, и полуоткрытым пространством из системы полян, обрамляющих водоем с востока. Композиционное решение построено на светотеневых эффектах, возникающих в этой части парка в разное время суток (рис. 2b).

Инвентаризационный участок 19 является западной границей парка, примыкающей к ул. Парковой. Участок представляет собой сильно изреженный лесной массив с системой малых полян. Он также играет роль буфера между парковой территорией и городской застройкой (рис. 3b).

(a) (b)

Рис. 3. Планы инвентаризационных участков: (a) – участок 9;
(b) – участок 19 (копия материалов инвентаризации 1985 г.)

Fig. 3. Plans of the inventory areas: (a) – area 9;
(b) – area 19 (copy of inventory materials from 1985)

Массовое размножение инвазионных вредителей и патогенов несет угрозу не только объектам садово-паркового искусства, созданным в XIX веке, в которых преобладают старовозрастные насаждения, но и ОКН, появившимся во второй половине XX столетия. К последней категории относятся ландшафтно-мемориальные комплексы, посвященные подвигу защитников Ленинграда. Второй объект исследования, «Мемориал в память обороны города в 1941–1944 гг. – «Зелёный пояс Славы Ленинграда», относится к этой категории. Это старейший из всего архитектурно-мемориального комплекса «Приморский» объект, который включает Ораниенбаумский плацдарм, расположенный между деревней Керново и Старым Петергофом. Мемориал представлен вертикальной 10-метровой стелой и сквером вокруг нее. Мемориальный сквер вокруг стелы плацдарма был создан в 1964 г. и дополнен в 1967 г. Он имеет сложное композиционное решение, передающее образ защитников Ораниенбаумского плацдарма. Композиционное решение пространства вокруг стелы представляет собой

строго регулярное построение внутри обширного открытого пространства луга с единичными посадками ширококронных деревьев. Передний план и главная высотная доминанта – 10-метровая гранитная стела – выдвинуты к Петергофскому шоссе. За стелой, обрамляя узкий вытянутый вглубь от дороги партер, высажены плотные ряды туи западной (*Thuja occidentalis*). На расстоянии 90 м от стелы ряды туй дополняет двурядная посадка ясеня пенсильванского (*Fraxinus pennsylvanica*). Ясень выбран неслучайно: он выступает в качестве фона для темнохвойных туй и как элемент для плавного перехода от закрытого пространства мемориального сквера к открытому лугу. Контраст окраски и ажурности кроны создает необходимый декоративный эффект, который должен быть воспринимаем в движении, из окон транспорта (рис. 4).

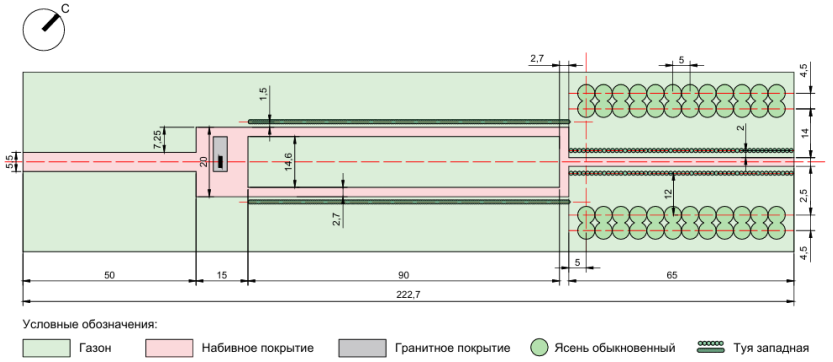


Рис. 4. План сквера у Мемориала в память обороны города в 1941–1944 гг. (авт. плана А.А. Маркин)

Fig. 4. Plan of the square near the Memorial in memory of the defense of the city in 1941–1944 (by A.A. Markin)

В ходе анализа объемно-пространственной структуры объекта культурного наследия или отдельных его композиционных узлов проводились историко-архивные изыскания и натурные обследования, на основании которых определялась степень сохранности композиционной целостности по шкале оценки сохранности исторического (мемориального) облика древесно-кустарниковой растительности, предложенной Н.Н. Гусевым [Гусев и др., 1993]. Пятибалльная оценка учитывает не только сохранность первоначального видового состава, но и объем мероприятий и затрат, которые необходимы для восстановления композиционной целостности.

При натурных обследованиях определялась степень сохранности первоначального облика, выявлялись глазомерно-измерительным способом характер пейзажной картины и основные точки обзора и восприятия пейзажа.

Результаты исследования. Возрастной состав посадок ясеней и вязов 1957 и 1985 гг. Александрийского парка показывает, что большинство этих деревьев было высажено в послевоенное время (табл. 1). В документах было отмечено, что все вязы заражены энтомовредителями, а ясени заражены лишь единично. К вырубке в 1985 г. было назначено 179 деревьев вяза гладкого (*Ulmus laevis*) и 271 дерево ясеней (*Fraxinus* spp.). Вяз шершавый (*Ulmus glabra*) к рубке не был назначен ни в 1957, ни в 1985 гг. При этом с осени 2020 по весну 2022 гг. было вырублено 200 ясеней [Селиховкин и др., 2023]. В 2024 г. согласно Протоколу обследования насаждений, подлежащих санитарной вырубке, № 6742 от 18.07.2024 г., в 2024 г. в Александрийском парке было назначено к удалению 6 экземпляров вяза шершавого и 5 экземпляров ясеня пенсильванского (рис. 5)

Таблица 1

Распределение деревьев по породам на инвентаризационных участках

Distribution of trees by species across inventory areas

№ выдела	Количество деревьев, шт.			
	1957		1985	
	Деревья до 40 лет	Деревья старше 40 лет	Деревья до 40 лет	Деревья старше 40 лет
Вяз гладкий				
3	0	0	34	1
5	0	0	59	0
9	0	0	80	5
11	0	0	0	0
19	10	18	0	0
Итого	10	18	173	6
Ясень				
3	7	22	7	36
5	44	6	0	9
9	0	0	42	0
11	3	0	0	0
19	9	0	0	0
Итого	63	28	49	45
Всего	73	46	222	51

Рис. 5. Вид на группу погибших вязов на участке 9
Fig. 5. View of a group of elms on area 9

На втором объекте исследования, Мемориале в память обороны города в 1941–1944 гг., ясень играет принципиальную роль в общей композиции. Размножение ясеневой узкотелой изумрудной златки (ЯИУЗ), отмеченное в разных частях Петродворцового района, стало причиной гибели и последующей вырубки ясеня пенсильванского в сквере вокруг этого монумента. В 2024 г. было вырублено 44 дерева (Протокол обследования зеленых насаждений, подлежащих санитарной рубке, № 4541 от 24.07.2023), а в 2025 г. – ещё 23 дерева (Протокол обследования зеленых насаждений, подлежащих санитарной рубке, № 103081 от 20.07.2024). В результате важная часть ландшафтной композиции была разрушена (рис. 6).

Рис. 6. Состояние ясеней у Стелы на Ораниенбаумском плацдарме
Fig. 6. Condition of ash trees near Stela on the Oranienbaum bridgehead

Нами была проведена оценка степени сохранности исторического композиционного замысла в Александрийском парке и Мемориале в память обороны города. Мы использовали два критерия – размещение деревьев в пейзажной картине и видовой состав растительности, составляющей пейзажную картину. Эти критерии характеризуют уровень необходимых мероприятий по сохранению исторической среды. Мы выделили 5 категорий:

- 1 – видовой состав сохранился на 100%, размещение соответствует историческому;
- 2 – видовой состав соответствует историческому более чем на 50%, размещение соответствует историческому;
- 3 – видовой состав соответствует историческому более чем на 50%, размещение не соответствует историческому;
- 4 – видовой состав соответствует историческому менее чем на 50%, размещение не соответствует историческому;
- 5 – видовой состав и размещение полностью не соответствуют историческому облику.

Насаждения Александрийского парка по видовому составу соответствуют историческому более чем на 50%, а размещение не соответствует историческому. В мемориальном комплексе соответствие видового состава меньше 50%, размещение также не соответствует историческому (табл. 2).

Таблица 2

Оценка сохранности исторического облика древесно-кустарниковой растительности

Assessment of the preservation of the historical appearance of trees and shrubs

Расположение	Участки	Критерии соответствия		Предлагаемые мероприятия
		Видовой состав	Историческое размещение	
Александрийский парк (номера участков)	3	> 50%	не соответствует	Восстановление исторического облика (реставрация)
	5	> 50%	не соответствует	
	9	> 50%	не соответствует	
	11	> 50%	не соответствует	
	19	> 50%	не соответствует	
Мемориал в память обороны города в 1941–1944 гг.		<50%	не соответствует	Восстановление исторического облика (реставрация и приспособление к современным условиям)

Согласно нашей оценке (табл. 2) на всех обследованных участках Александрийского парка и Мемориале Ораниенбаумского плацдарма необходимо проведение мероприятий по сохранению исторического облика ОКН, а именно реставрации композиционной структуры. При этом на территории мемориального комплекса рекомендована адаптация насаждений к современным условиям, т. е. воздействию инвазионных патогенов и вредителей.

Обсуждение. Инвазивные вредители и фитопатогены, повреждающие и вызывающие заболевания вязов и ясеней Санкт-Петербурга, в течение нескольких лет приводят пораженные деревья к неизбежной гибели и последующей вырубке этих деревьев. Практически все вязы Санкт-Петербурга поражены голландской болезнью, и большая их часть погибнет в ближайшее время. Очаги ясеневой узкотелой изумрудной златки в настоящее время довольно ограничены по площади и находятся в Петродворцовом и Невском районах. Очаги расположены мозаично, но в Петродворцовом районе они постепенно сливаются, охватывая близкорасположенные насаждения ясеня [Селиховкин и др., 2023; Kazi et al., 2025]. Неизбежная вырубка вязов и ясеней нарушает композиционную целостность парковой среды, где декоративные качества конкретных пород деревьев играют немаловажную роль. В связи с этим наряду с задачей поиска возможности контроля численности и распространения вредителей также стоит поиск путей адаптации ландшафтных композиций в условиях сильного пресса со стороны фитопатогенных организмов и вредителей. Ярким примером подобного метода адаптации к новым условиям в рамках сохранения ОКН является опыт реставрации насаждений объекта культурного наследия федерального значения «Кладбище Пискаревское».

Общая площадь объекта культурного наследия составляет 27 га, центральная часть мемориала была открыта 9 мая 1960 г., периферийные участки мемориального комплекса поэтапно достраивались в последующие годы. Основной участок ландшафтно-мемориального комплекса представляет собой вытянутый с севера на юг прямоугольник. Объемно-пространственное композиционное решение этого участка сочетает различные типы пространственной структуры, расположенные на двух террасах. От площадки у центрального входа на верхней террасе лестница ведет вниз к обширному центральному партеру, обрамленному аллеями, первоначально выполненными в виде односторонней рядовой посадки вяза шершавого (*Ulmus glabra*). С юга партер обрамлен искусственным возвышением и замыкающей перспективу стеной. На этом постаменте возвышается скульптура «Родина-Мать», которая является главной высотной доминантой.

Важной составляющей композиционного решения всего комплекса стал тщательный подбор растений для оформления центральной части. Растения подбирались с учетом размера: на нижней террасе должны быть расположены мощные деревья первой величины, сомасштабные всему пространству центрального партера и высоте возвышающегося монумента. Важным моментом при подборе ассортимента также служил фактор сезонной окраски: весенний розово-белый аспект обеспечивает цветение яблонь, летний алый аспект представлен розарием центрального партера, осенний аспект показан желтыми и багряными оттенками листвы деревьев, обрамляющих партер, зимний темно-зеленый аспект исполнен при помощи хвойных растений, находящихся на периферии.

В 2012 г. филиалом ФГУП «Рослесинфорг» «Севзаплеспроект» была проведена биологическая оценка состояния насаждения на Пискаревском мемориальном кладбище и подеревная инвентаризация. Согласно материалам обследования на участках №№ 7 и 5 (обрамляющие партер) было зафиксировано массовое поражения вязов офиостомозом: общее количество больных деревьев составило 18 шт., или около 30% от общего количества вязов в центральной части комплекса. В рамках работ по сохранению в 2015 г. были выполнены работы по полной замене вяза шершавого (*Ulmus glabra*) на липу мелколистную (*Tilia cordata*) (рис. 7).

Рис. 7. Замена лип в аллейной посадке на Пискаревском мемориальном кладбище

Fig. 7. Replacing linden trees in the alley planting at the Piskarevskoye Memorial Cemetery

Липа по своему физиономическому типу, также как и ильм, относится к группе дубовых типов. Дерево характеризуется долговечностью, высотой, достигающей 25 м, и плотной кроной. Сезонная окраска листвы в летний период имеет темно-зеленую гамму, в осенний период листва может окрашиваться в желто-лимонные оттенки. Таким образом, при замене породы аллейный композиционный строй был сохранен. При этом всё-таки произошла утрата сезонных аспектов.

Замена выпавших на объектах культурного наследия вязов на другие породы ведется и в других районах города (табл. 3).

Таблица 3

Показатели замены *Ulmus glabra* другими породами на объектах культурного наследия г. Санкт-Петербурга

Rates of *Ulmus glabra* replacement by other tree species at cultural heritage sites in St. Petersburg

№	Наименование ОКН	Тип планировки	Количество отпада *Ulmus glabra* (период 2020–2024 гг.), шт.	Варианты замены
1	Московский парк Победы (ОКН федерального значения, рег. № 781520223580006)	Регулярная (рядовые и аллейные посадки); Пейзажное размещение	1493	Липа мелколистная (*Tilia cordata*)
2	Ансамбль Елагина острова (ОКН федерального значения, рег. № 781520382470006)	Пейзажная	200	Дуб черешчатый (*Quercus robur*) Липа мелколистная (*Tilia cordata*) Клен остролистный (*Acer platanoides*)
3	Сад памяти жертв расстрела 1905 года (Сад 9-го Января) (ОКН федерального значения, рег.№ 781721018860005)	Пейзажная	13	Дуб черешчатый (*Quercus robur*)
4	Румянцевский сад (ОКН федерального значения, рег. № рег. № 7810187000)	Регулярная	9	Липа мелколистная (*Tilia cordata*)
5	Бульвар Большого проспекта Васильевского острова (ОКН регионального значения № 781420076260005)	Регулярная	37	Липа мелколистная (*Tilia cordata*)

В связи с этим остаётся важной задача восстановления исходных видов древесных растений, в данном случае вязов.

В случае вязов существует путь создания вязов-резистов по отношению к голландской болезни. Опыт закупки устойчивого посадочного материала не дал положительного эффекта, т. к. молодые посадки в Санкт-Петербурге были атакованы заболонником-пигмеем и также погибли. Тем не менее это направление остаётся перспективным. Несмотря на то, что в Москве, Подмосковье, Санкт-Петербурге большая часть вязов погибла от голландской болезни, в очагах заболевания сохранились устойчивые экземпляры, которые могут служить основой для создания резистов [Колганихина, Синькевич, 2021]. Второй путь – использование репеллентов против заселения заболонников (переносчиков офиостомовых грибов), инъекции системных фунгицидов и другие неразрушающие методы защиты. Однако эти методы имеют весьма существенные недостатки, связанные в первую очередь с особенностями городских условий [Селиховкин, 2024b].

Ситуация с ясенями иная. В условиях Санкт-Петербурга распространение ясеневой изумрудной узкотелой златки (ЯИУЗ) идёт довольно медленно из-за неблагоприятных климатических условий. Однако, как показали наши исследования, в городской популяции ЯИУЗ практически отсутствуют паразитоиды ЯИУЗ. Завоз насекомых-энтомофагов в сочетании с феромонным мониторингом мог бы дать существенный положительный эффект в снижении численности этого вредителя. Однако в настоящее время единственным методом контроля численности служит вырубка заселённых деревьев. Это метод недостаточно эффективен из-за сложности выявления заселённых деревьев [Селиховкин, 2024a, b].

Заключение. В рамках реставрационных работ перед специалистами весьма остро стоит вопрос выбора стратегии в условиях интенсивного инвазивного процесса, приводящего к гибели ключевых видов растений парковых насаждений. Методы эффективного контроля численности и распространения инвазионных вредителей некоторых видов древесных растений, в данном случае вязов и ясеней, отсутствуют. В этих условиях становится чрезвычайно актуальным сохранение композиционной структуры парков с заменой видов древесных растений с наиболее близкими визуальными характеристиками. Однако при этом необходим поиск путей преодоления инвазивности патогенов и вредителей и контроля их численности и распространения. Это позволит избежать окончательной утраты важнейших компонентов ландшафтных композиций.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Волкович М.Г., *Суслов Д.В.* Первая находка ясеневой изумрудной узкотелой златки *Agrilus planipennis* Fairmaire (Coleoptera: Buprestidae) в Санкт-Петербурге свидетельствует о реальной угрозе дворцово-парковым ансамблям Петергофа и Ораниенбаума // Дендробионтные беспозвоночные животные и грибы и их роль в лесных экосистемах (XI Чтения памяти О. А. Катаева): мат. Всерос. конф. с межд. уч. / под ред. Д.Л. Мусолина, Н.И. Кириченко, А.В. Селиховкина. СПб., 2020. С. 119–120.

Гусев Н.Н., *Еремеев А.Г.*, *Миронов С.Н.* Старинные парки. (Восстановление, содержание, охрана). М.: Экология, 1993. 253 с.

Колганихина Г.Б., *Синькевич В.В.* К изучению проблемы усыхания вязов в Москве и Подмосковье // Тр. СПбНИИЛХ. 2021. № 3. С. 67–85.

Петров Г.Ф. Пискаревское кладбище. Л.: Лениздат, 1980. 49 с.

Рубцов Л.И. Деревья и кустарники в ландшафтной архитектуре. Справочник. Киев: Наукова думка, 1977. 270 с.

Селиховкин А.В. Контроль численности вредителей городских насаждений: проблемы и возможности // Актуальные проблемы урболесоведения: мат. II Всерос. науч.-практ. конф. / под ред. С.Л. Рысина. М., 2024a. С. 214-219.

Селиховкин А.В. Инвазионные вредители и патогены древесных растений в Санкт-Петербурге // Фитосанитария. Карантин растений. 2024b. Спецвыпуск, №1, S (18): мат. межд. науч.-практ. конф. «Защита и карантин леса». С.70-71.

Селиховкин А.В., *Нехаева М.Ю.*, *Мельничук И.А.* Экономические и социальные последствия инвазий вредителей и патогенов древесных растений в Санкт-Петербурге // Российский журнал биологических инвазий. 2023. № 2. С. 163–171. DOI: 10.35885/1996–1499-16-2-163-171.

Федорова С.М. Болезни древесных и кустарниковых растений в парковых насаждениях музеев-заповедников Павловска и Гатчины и эффективность биопрепаратов в защите от голландской болезни вязов: автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб., 2010. 22 с.

Carrari E., *Aglietti C.*, *Bellandi A.*, *Dibari C.*, *Ferrini F.*, *Fineschi S.*, *Galeotti P. C.*., *Giuntoli A.*, *Manganelli Del Fa R.*, *Moriondo M.*, *Mozzo M.*, *Padovan G.*, *Riminesi C.*, *Selvi F.*, *Bindi M.* The management of plants and their impact on monuments in historic gardens: Current threats and solutions // Urban Forestry & Urban Greening. 2022. Vol. 76. Art. no. 127727. DOI: 10.1016/j.ufug.2022.127727.

Ciaffi M., *Alicandri E.*, *Vettraino A.M.*, *Paolacci A.R.*, *Tamantin*, *M.*, *Tomao A.*, *Agrimi M.*, *Kuzminsky E.* Conservation of veteran trees within historical gardens (COVE): a case study applied to *Platanus orientalis* L. in central Italy // Urban Forestry & Urban Greening. 2018. Vol. 34. P. 336–347. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.07.022.

Jürisoo L., *Selikhovkin A.V.*, *Padari A.*, *Shevchenko S.V.*, *Shcherbakova L.N.*, *Popovichev B.G.*, *Drenkhan R.* The extensive damages of elms by Dutch elm disease

agents and their hybrids in north-western Russia // Urban Forestry & Urban Greening. 2021. Vol. 63 (9128). Art. no. 127214. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.12721.

Jürisoo L., *Agan A*., *Tedersoo L*., *Witzel J*., *Selikhovkin A*., *Drenkhan R*. Fungal Assemblages in Northern Elms—Impacts of Host Identity and Health, Growth Environment, and Presence of Dutch Elm Disease // Microbial Ecology. 2025. Vol. 88. Art. no. 82.

Kazi I.M., *Ryss A.Yu*., *Popovichev B.G*., *Selikhovkin A.V*. Formation of the invasive range of the emerald ash borer *Agrilus planipennis* in St. Petersburg, Russia: developmental characteristic speculiarities and associated nematodes // Bio Bulletin. Pleiades publishing. 2025 (in press).

Selikhovkin A.V., *Musolin D.L*., *Popovichev B.G*., *Merkuryev S.A*., *Volkovitsh M.G*., *Vasaitis R.*. Invasive populations of the emerald ash borer *Agrilus planipennis* Fairmaire, 1888 (Coleoptera: Buprestidae) in Saint Petersburg, Russia: A hitchhiker? // Insects. 2022. Vol. 13. Art. no. 191. DOI: 10.3390/insects13020191.

Shabunin D.A., *Selikhovkin A.V*., *Varentsova E.Yu*., *Musolin D.L.* Decline of *Fraxinus excelsior* L. in parks of Saint Petersburg: Who is to blame – *Hymenoscyphus fraxineus* or *Diplodia* spp.? // Forestry Studies. 2020. Vol. 73. P. 43–51.

References

Carrari E., *Aglietti C*., *Bellandi A*., *Dibari C*., *Ferrini F*., *Fineschi S*., *Galeotti P. C*., *Giuntoli A*., *Manganelli Del Fa R*., *Moriondo M*., *Mozzo M*., *Padovan G*., *Riminesi C*., *Selvi F*., *Bindi M.* The management of plants and their impact on monuments in historic gardens: Current threats and solutions. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2022, vol. 76, art. no. 127727. DOI: 10.1016/j.ufug.2022.127727.

Ciaffi M., *Alicandri E*., *Vettraino A.M*., *Paolacci A.R*., *Tamantin*, *M*., *Tomao A*., *Agrimi M*., *Kuzminsky E.* Conservation of veteran trees within historical gardens (COVE): a case study applied to *Platanus orientalis* L. in central Italy. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, vol. 34, pp. 336–347. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.07.022.

Fedorova S.M. Diseases of trees and shrubs in parkland of the Pavlovsk and Gatchina museum-reserves and the effectiveness of biological products in protection against Dutch elm disease: author's abstract. Diss. ... Cand. Biol. Sci. St. Petersburg, 2010. 22 p. (In Russ.)

Gusev N.N., *Eremeev A.G*., *Mironov S.N.* Ancient Parks. (Restoration, Maintenance, Protection). Moscow: Ekologiya, 1993. 253 p. (In Russ.)

Jürisoo L., *Selikhovkin A.V*., *Padari A*., *Shevchenko S.V*., *Shcherbakova L.N*., *Popovichev B.G*., *Drenkhan R.* The extensive damages of elms by Dutch elm disease agents and their hybrids in north-western Russia. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2021, vol. 63 (9128), art. no. 127214. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.12721.

Jürisoo L., *Agan A*., *Tedersoo L*., *Witzel J*., *Selikhovkin A*., *Drenkhan R*. Fungal Assemblages in Northern Elms—Impacts of Host Identity and Health, Growth Environment, and Presence of Dutch Elm Disease. *Microbial Ecology*, 2025, vol. 88, art. no. 82.

Kazi I.M., *Ryss A.Yu.*, *Popovichev B.G.*, *Selikhovkin A.V.* Formation of the invasive range of the emerald ash borer *Agrilus planipennis* in St. Petersburg, Russia: developmental characteristic speculiarities and associated nematodes. *Bio Bulletin. Pleiades publishing*, 2025 (in press).

Petrov G.F. Piskarevskoye Cemetery. Leningrad: Lenizdat, 1980. 49 p. (In Russ.)

Rubtsov L.I. Trees and Shrubs in Landscape Architecture. Handbook. Kiev: Naukova Dumka, 1977. 270 p. (In Russ.)

Selikhovkin A.V. Control of urban pest populations: problems and opportunities. *Current issues of urban forestry*: proceedings of the II All-Russ. sci.-pract. conf. / ed. by S.L. Rysin. Moscow, 2024a, pp. 214-219. (In Russ.)

Selikhovkin A.V. Invasive pests and pathogens of woody plants in St. Petersburg. *Phytosanitary. Plant quarantine*, 2024b, special issue, no. 1, S (18): Proceedings of the int. sci.-pract. conf. “Forest Protection and Quarantine”, pp. 70-71. (In Russ.)

Selikhovkin A.V., *Musolin D.L.*, *Popovichev B.G.*, *Merkuryev S.A.*, *Volkovitsh M.G.*, *Vasaitis R.* Invasive populations of the emerald ash borer *Agrilus planipennis* Fairmaire, 1888 (Coleoptera: Buprestidae) in Saint Petersburg, Russia: A hitchhiker? *Insects*, 2022, vol. 13, art. no. 191. DOI: 10.3390/insects13020191.

Selikhovkin A.V., *Nekhaeva M.Yu.*, *Melnichuk I.A.* Economic and social consequences of invasions of pests and pathogens of woody plants in St. Petersburg. *Russian Journal of Biological Invasions*, 2023, vol. 16, iss. 2, pp. 163–171. DOI: 10.35885/1996-1499-16-2-163-171. (In Russ.)

Shabunin D.A., *Selikhovkin A.V.*, *Varentsova E.Yu.*, *Musolin D.L.* Decline of *Fraxinus excelsior* L. in parks of Saint Petersburg: Who is to blame – *Hymenoscyphus fraxineus* or *Diplodia* spp.? *Forestry Studies*, 2020, vol. 73, pp. 43–51.

Volkovich M.G., *Suslov D.V.* The first find of the emerald ash borer *Agrilus planipennis* Fairmaire (Coleoptera: Buprestidae) in St. Petersburg indicates a real threat to the palace and park ensembles of Peterhof and Oranienbaum. *Dendrobiont invertebrates and fungi and their role in forest ecosystems* (*XI Readings in memory of O. A. Kataev*): proceedings of the All-Russ. conf. with int. part. / ed. by D.L. Musolin, N.I. Kirichenko, A.V. Selikhovkin. St. Petersburg, 2020, pp. 119–120. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 24.03.2025

Байрамова В.Ф., Мельничук И.А., Приходько Е.О., Демчук А.С., Селиховкин А.В. Влияние инвазий вредителей и патогенов на композиционную целостность объектов ландшафтной архитектуры Санкт-Петербурга // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 76–96. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.76-96

Рассматривается проблема распространения инвазивных организмов, вызывающих ослабление и гибель вязов и ясеней в исторических парках Санкт-Петербурга. Распространение возбудителя офиостомоза вязов *Ophiostoma novo-*

ulmi и вязовых заболонников *Scolytus* spp. привело к повсеместной гибели вязов в Санкт-Петербурге. Появление очагов заболеваний, вызванных грибом *Hymenoscyphus fraxineus*, и в особенности распространение ясеневой изумрудной узкотелой златки *Agrilus planipennis* – причина отмирания ясеней в Петродворцовом районе. Основные объекты исследования – Александрийский парк (144 га) и Мемориал в память обороны города в 1941–1944 гг., входящий в состав комплекса «Зелёный пояс Славы Ленинграда». Анализ объемно-пространственной структуры проводился на основе историко-архивных данных и натурных обследований, была определена степень сохранности композиционной целостности по шкале оценки сохранности исторического (мемориального) облика древесно-кустарниковой растительности Н.Н. Гусева. Установлена гибель вязов и ясеней в результате деятельности вредителей и патогенов. Насаждения Александрийского парка по видовому составу соответствуют историческому более чем на 50%, но их размещение не соответствует историческому. В мемориальном комплексе в память обороны города соответствие видового состава – менее 50%, размещение также не соответствует историческому. На всех обследованных участках необходимо проведение мероприятий по сохранению исторического облика ОКН, а именно реставрации композиционной структуры. На территории мемориального комплекса рекомендована адаптация насаждений к воздействию инвазионных патогенов и вредителей. Сохранение композиционной структуры парков с заменой видов древесных растений с наиболее близкими визуальными характеристиками в условиях быстрого отмирания ясеней и вязов из-за размножения инвазионных вредителей и патогенов – ключевая задача сохранения исторических парков Санкт-Петербурга. Однако, чтобы избежать окончательной утраты важнейших компонентов ландшафтных композиций, её решение должно сопровождаться поиском путей контроля численности и распространения инвазиных патогенов и вредителей.

Ключевые слова: вредители, патогены, ясень, вязь, парковые насаждения, объекты культурного наследия.

Bayramova V., Melnichuk I., Prikhodko E., Demchuk A., Selikhovkin A. The impact of pest and pathogen invasions on the compositional integrity of landscape architecture objects in St. Petersburg. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 76–96 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.76-96

This paper examines the spread of invasive organisms that cause the weakening and death of elm and ash trees in the historic parks of St. Petersburg. The spread of the Dutch elm disease pathogen *Ophiostoma novo-ulmi* and the elm bark beetle *Scolytus* spp. has led to the widespread death of elms in St. Petersburg. The emergence of outbreaks caused by the fungus *Hymenoscyphus fraxineus* and, in particular, the spread of the emerald ash borer *Agrilus planipennis* are the cause of ash dieback in the Petrodvorets district. The

main objects of study are Alexandria Park (144 hectares) and the Memorial to the Defense of the City in 1941–1944, part of the "Green Belt of Glory of Leningrad" complex. An analysis of the volumetric-spatial structure was conducted based on historical and archival data and field surveys. The degree of preservation of compositional integrity was determined using N.N. Gusev's scale for assessing the preservation of the historical (memorial) appearance of trees and shrubs. The death of elm and ash trees as a result of pest and pathogen activity was established. The species composition of the Alexandria Park plantings corresponds to the historical one by more than 50%, but their placement does not correspond to this historical pattern. At the memorial complex commemorating the defense of the city, the species composition corresponds to less than 50%, and the placement also does not correspond to the historical pattern. At all surveyed sites, measures are necessary to preserve the historical appearance of the cultural heritage site, namely, the restoration of the compositional structure. Adaptation of the plantings to the effects of invasive pathogens and pests is recommended for the territory of the memorial complex. Preserving the compositional structure of parks by replacing woody plant species with the most similar visual characteristics, while ash and elm trees are rapidly dying due to the spread of invasive pests and pathogens, is a key task in preserving St. Petersburg's historic parks. However, to avoid the permanent loss of key landscape components, this task must be accompanied by a search for ways to control the numbers and spread of invasive pathogens and pests.

K e y w o r d s : pests, pathogens, ash, elm, parkland, cultural heritage sites.

БАЙРАМОВА Варвара Федоровна – старший преподаватель кафедры ландшафтной архитектуры Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 5516-8395. ORCID: 0009-0002-9624-4896.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: novator72@mail.ru

BAYRAMOVA Varvara F. – Senior Lecturer, Department of Landscape Architecture, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 5516-8395. ORCID: 0009-0002-9624-4896.

194021. Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: novator72@mail.ru

МЕЛЬНИЧУК Ирина Альбертовна – доцент кафедры ландшафтной архитектуры Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 7478-0151. ORCID: 0000-0001-7772-8874.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: melnichuk.irina.2022@yandex.ru

MELNICHUK Irina A.– PhD (Agriculture), Associate Professor of the Department of Landscape Architecture, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 7478-0151. ORCID: 0000-0001-7772-8874.

194021. Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: melnichuk.irina.2022@yandex.ru

ПРИХОДЬКО Елена Олеговна – начальник Управления историко-культурных ландшафтов и гидротехнических сооружений КГИОП Правительства г. Санкт-Петербурга, соискатель кафедры ландшафтной архитектуры Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С. М. Кирова.

191023, ул. Зодчего Росси, д.1-3, лит. А, Санкт-Петербург, Россия.

PRIKHODKO Elena O. – Head of the Department of Historical and Cultural Landscapes and Hydraulic Structures of the KGIOP of the Government of St. Petersburg, applicant of the Department of Landscape Architecture of the St.Petersburg State Forest Engineering University.

191023. Zodchego Rossi str. 1-3. Let. A. St. Petersburg. Russia.

ДЕМЧУК Анна Сергеевна – ассистент кафедры промышленного транспорта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия.

DEMCHUK Anna S. – assistant of the Department of Industrial Transport of the St.Petersburg State Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia.

СЕЛИХОВКИН Андрей Витимович – профессор кафедры защиты леса, древоведения и охотничьего хозяйства Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор биологических наук. SPIN-код: 9339-4978. ORCID: 0000-0003-4227-9647.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: a.selikhovkin@mail.ru

SELIKHOVKIN Andrey V. – DSc (Biological), Professor, Department of Forest Protection, Timber Science and Hunting, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 9339-4978. ORCID: 0000-0003-4227-9647.

194024. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: a.selikhovkin@mail.ru

УДК 574.472/502.051

Г.А. Богданов, Г.О. Османова, П.В. Бедова

ФИТОИНДИКАЦИОННАЯ ОЦЕНКА ЛЕСНЫХ СООБЩЕСТВ ГОСУДАРСТВЕННОГО ПРИРОДНОГО КОМПЛЕКСНОГО ЗАКАЗНИКА РЕСПУБЛИКАНСКОГО ЗНАЧЕНИЯ «ГОРНОЕ ЗАДЕЛЬЕ» РЕСПУБЛИКИ МАРИЙ ЭЛ

Введение. Государственный природный комплексный заказник республиканского значения «Горное Заделье» площадью 562 га создан в 1997 г. на территории Куженерского района Республики Марий Эл (РМЭ) в пойме р. Нолька. Между административными границами Куженерского и Сернурского районов проходят северная и восточная граница заказника, южная – между лесными и сельскохозяйственными угодьями кооператива «Колхоз «Шорсола», западная – по квартальным просекам.

Рельеф заказника представлен одним из участков максимального возвышения Марийско-Вятского увала (264 м н.у.м.), прорезанного глубокой и узкой долиной р. Нольки (до 170–180 м н.у.м.) с запада на восток, напоминающей горное ущелье, особенно в верхнем своем течении. Долина р. Нольки имеет крутые склоны, местами с широким дном, занятым лугами. В дно ущелья на 2-5 м врезается сухое летом русло.

Неодинаковая прогреваемость солнцем поверхности склонов северной и южной экспозиции вызывает перераспределение климатических факторов и вызывает разные микроклиматические условия на разных склонах. Эти условия в свою очередь создают различия в почвенном режиме увлажнения, в составе растительного покрова, особенно кустарничкового и травяно-мохового.

Растительный покров заказника представлен лесными и луговыми видами. Водная и околоводная растительность очень незначительная, т.к. русло р. Нолька имеет водную поверхность только у восточной границы заказника, где есть мощные выходы подземных источников.

Территория заказника является местом произрастания 20 видов растений, занесённых в Красную книгу Республики Марий Эл [Красная…, 2013; Рыжова и др., 2023]. Здесь произрастают диплазий сибирский (*Diplazium sibiricum* (Turcz. ex Kunze) Sa. Kurata or (Turcz. ex Kunze) Jermy, пузырник судетский (корневищник судетский) *Cystopteris sudetica*

A. Braun et Milde [*Rhizomatopteris sudetica* (A. Braun et Milde) A.P. Khokhr.], голокучник Роберта ((*Gymnocarpium robertianum* (Hoffm.) Newman), вейник тупочешуйный (*Calamagrostis obtusata* Trin.), схизахна мозолистая (*Schizachne callosa* (Turcz. ex Griseb.) Ohwi), осока горная (*Carex montana* L.), купена широколистная (*Polygonatum latifolium* (Jacq.) Desf.), венерин башмачок настоящий (*Cypripedium calceolus* L.), пыльцеголовник красный (*Cephalanthera rubra* (L.) Rich.), дремлик тёмно-красный (*Epipactis atrorubens* (Hoffm. ex Bernh.) Besser), калипсо луковичная (*Calypso bulbosa* (L.) Oakes), ветреничка алтайская (*Anemonoides altaica* (Fisch. ex C.A.Mey.) Holub), лютик Кауфмана (шелковник Кауфмана) (*Ranunculus kauffmannii* Clerc [*Batrachium kauffmannii* (Clerc) V.I. Krecz.], лён слабительный (*Linum catharticum* L.), истод Вольфганга (*Polygala wolfgangiana* Bess. ex Szafer, Kulcz. et Pawl.), зверобой волосистый (*Hypericum hirsutum* L.), реброплодник уральский (*Pleurospermum uralense* Hoffm.), мытник Кауфмана (*Pedicularis kaufmannii* Pinzger), василёк ложнопятнистый (*Centaurea pseudomaculosa* Dobrocz.), скерда тупокорневищная (*Crepis praemorsa* (L.) Tausch). В настоящее время василёк ложнопятнистый восстановил свою численность и исключен из Красной книги РМЭ [Рыжова и др., 2023].

На этой небольшой по площади территории представлены 13,5% видов сосудистых растений Красной книги. Только на этой территории обнаружено произрастание вейника тупочешуйного, реброплодника уральского. В настоящее время калипсо луковичная произрастает только в этом заказнике. Для схизахны мозолистой это вторая по счёту находка на территории Республики Марий Эл. Ближайшее местонахождение – в Республике Татарстан, где она была отмечена в Раифе Л.Н. Васильевой в 1925 г. [Васильева, Абрамов, 1981]. Кроме «краснокнижных» видов здесь произрастают природные популяции ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.), уцелевшие в рефугиумах по крутым склонам долин рек Вятского увала. Заслуживает охраны и другие редкие растения – ветреничка волжская (*Anemonoides* × *korzhinskyi* Saksonov & Rakov), новый вид марийской флоры, а также ястребинка рощевая (*Hieracium sylvularum* Jord. ex Boreau), обнаруженные в Республике Марий Эл только по склонам к р. Нолька. Флора заказника «Горное Заделье», площадь которого всего 5,6 км^2, полностью репрезентирует ядро флоры Восточного природного района и является местом, откуда могут в дальнейшем расселяться растения при восстановлении лесов по заброшенным пашням и безлесным склонам балок.

Целью настоящей работы стала оценка экотопов лесных фитоценозов заказника «Горное Заделье» методом фитоиндикации с применением подходов к определению экологических валентностей, бионтностей и индексов толерантности редких видов растений. Подобные исследования на территории заказника ранее не проводились.

Материалы и методика исследования. Исследования растительного покрова ООПТ «Горное Заделье» проводили в июне-июле 2022 г. маршрутно-рекогносцировочным методом в кварталах 134-137, в каждом из которых было заложено от одной до 3 пробных площадей размером 20 × 20 м. Всего обследовано 7 лесных сообществ.

С целью оценки экологических условий местообитаний этих фитоценозов проведены геоботанические описания с указанием обилия видов в баллах по шкале Браун-Бланке [Braun-Blanquet, 1964]. Флористические списки лесных фитоценозов обработаны по диапазонным экологическим шкалам [Цыганов, 1983]: Hd – увлажнения почвы, Tr – солевого режима почв, Nt – богатства почв азотом, Rc – кислотности почв, fH – переменности увлажнения и Lc – освещенности-затенения с помощью программы EcoScaleWin [Зубкова и др., 2008] методом средневзвешенной середины интервала.

Для выявления количественной оценки использования каждого экологического фактора каким-то видом Л.А. Жуковой [2004] было введено понятие «экологическая валентность», а для комплекса факторов – «толерантность» или «бионтность». Нами рассчитана потенциальная экологическая валентность (PEV) как отношение числа ступеней конкретной шкалы, занятой видом, к общей протяженности шкалы в ступенях (1):

$$PEV = \frac{\left(A_{\max} - A_{\min} + 1\right)}{n}, \quad (1)$$

где $A_{\max}$ и $A_{\min}$ – максимальные и минимальные значения ступеней шкалы, занятых отдельным видом; n – общее число ступеней в шкале; 1 – добавляется как первое деление шкалы, с которого по данному фактору начинается диапазон вида.

Для характеристики отношения конкретного вида к совокупному воздействию нескольких факторов применен индекс толерантности (2):

$$It = \frac{\sum PEV}{\sum \text{шкал рассматриваемых факторов}}, \quad (2)$$

где PEV – потенциальная экологическая валентность.

Чем больше *It*, тем теоретически выше возможность использования экологически разнообразных местообитаний популяциями конкретного вида. Фракции валентности и группы толерантности видов определяли по следующим значениям [Жукова и др., 2010]:

1. стеновалентная и стенобионтная – показатель валентности или индекс толерантности не превышает 0,33;
2. гемистеновалентная и гемистенобионтная – от 0,34 до 0,45;
3. мезовалентная и мезобионтная – от 0,46 до 0,56;
4. гемиэвривалентная и гемиэврибионтная – от 0,57 до 0,66;
5. эвривалентная и эврибионтная – от 0,67 и более.

Названия сообществ даны по доминантной классификации.

Результаты исследования. Характеристика лесных сообществ.

1. *Сосняк елово-лещиновый пролесниково-кислициевый.*

Растительный покров располагается в верхней части склона с уклоном 2-3° южной и юго-западной экспозиции. Почвы перегнойно-карбонатные, формировались на известняково-доломитовых толщах и мергелях.

Древостой с проективным покрытием (ПП) до 70%. Ярус A_I представлен сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), в ярусе A_{II} появляются ель финская (*Picea* × *fennica* (Regel) Kom.), пихта сибирская (*Abies sibirica* Ledeb.) и липа сердцелистная (*Tilia cordata* Mill.). В густом подлеске преобладают лещина обыкновенная (*Corylus avellana* L.), рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.), бересклет бородавчатый (*Euonymus verrucosus* Scop.) и жимолость лесная (*Lonicera xylosteum* L.). В подросте отмечены пихта сибирская и липа сердцелистная высотой 1-3 м. ПП травостоя – 55%. Всего обнаружено 38 видов травянистых растений. В травяном ярусе доминирует кислица обыкновенная (*Oxalis acetosella* L.), содоминанты – пролесник многолетний (*Mercurialis perennis* L.) и медуница неясная (*Pulmonaria obscura* Dumort.). Среди травянистых растений неморальные виды преобладают над бореальными. В этом сообществе выявлен редкий вид – воронец красноплодный (*Actaea erythrocarpa* Fisch.).

2. *Сосняки осочково-кислициевые* с елью произрастают в средней и нижней части склонов южной экспозиции к долине р. Нолька на дерново-слабоподзолистых почвах, сформированных на маломощных суглинках. Угол наклона склона – 30-35°. Древостой с проективным покрытием до 80%. Сосна обыкновенная преобладает в A_I и A_{II} ярусах. В подросте много ели финской, отмечено несколько особей пихты сибирской от 0,5 до 6 м. В подлеске преобладает лещина обыкновенная, высотой до 3 м. Бересклет

бородавчатый, жимолость лесная и калина обыкновенная (*Viburnum opulus* L.) встречаются с небольшим обилием, их высота не превышает 1 м.

Травяной ярус с ПП 45% насчитывает 24 вида растений. Доминантами выступают кислица обыкновенная и осока корневищная (*Carex rhizina* Blytt ex Lindblom), содоминанты – осока пальчатая (*Carex digitata* L.), майник двулистный (*Maianthemum bifolium* (L.) F.W. Schmidt) и перловник поникший (*Melica nutans* L.). Доля бореальных видов незначительная, преобладают неморальные виды. В этих сообществах встречается эндемик хвойно-широколиственных лесов Восточной Европы – ястребинка рощевая. Моховой покров представлен слабо с ПП менее 1% в равной степени здесь произрастают ритидиадельфус трёхгранный (*Rhytidiadelphus triquetrus* (Hedw.) Warnst.) и плевроциум Шребера (*Pleurozium schreberi* (Willd. ex Brid.) Mitt.). Ниже по склону на более мощных суглинках встречаемость ели и пихты увеличивается, также возрастает доля бореальных видов по сравнению с неморальными. Моховой покров местами может достигать 10%. Из редких видов здесь встречаеюся дремлик тёмно-красный и схизахна мозолистая.

Склон северной экспозиции к р. Нолька в весеннее время оттаивает медленней противоположного склона. После аномально жаркого лета 2010 г. елово-пихтовые леса, растущие на склонах, сильно пострадали от нехватки воды. Многие ослабленные деревья ели были повреждены подкоровыми, а затем и стволовыми вредителями, поэтому с 2013 г. здесь стали проводить сплошные, реже выборочные санитарные рубки. Участки не вырубленного леса остались лишь в нижней части склонов, где раньше произрастали и сейчас произрастают ельники пихтовые зеленомошно-кисличниковые.

Результаты обработки флористических списков исследуемых сосняков по почвенным шкалам и шкале освещенности-затенения представлены в табл. 1, из которой видно, что оба сообщества имеют одинаковые экологические предпочтения. Отличия выявлены лишь по фактору кислотности почв. В сосняке елово-лещиновом пролесниково-кислициевом почвы кислые/слабокислые и слабокислые, а в сосняке осочково-кислициевом – слабокислые и слабокислые/нейтральные. В целом почвы обоих сообществ согласно полученным значениям слабокислые (pH=5,5-6,5).

Для двух редких видов – воронца красноплодного и дремлика тёмно-красного, произрастающих в этих сосняках, – нами рассчитаны потенциальная экологическая валентность и индекс толерантности (табл. 2).

Таблица 1

Экологическая характеристика сосняков

Ecological characteristics of pine forests

Экологические шкалы	1. Сосняк елово-лещиновый пролесниково-кислициевый	2. Сосняк осочково-кислициевый
Увлажнения почв Hd (1-23)	12,59 сухолесолуговое/влажно-лесолуговое, влажно-лесолуговое	12,57 сухолесолуговое/влажно-лесолуговое, влажно-лесолуговое
Трофности почв Tr (1-19)	5,88 небогатые почвы, небогатые/ довольно богатые почвы	5,37 небогатые почвы, небогатые/ довольно богатые почвы
Богатства почв азотом Nt (1-11)	5,86 бедные азотом почвы, бедные азотом/достаточно обеспеченные азотом почвы	5,46 бедные азотом почвы, бедные азотом/достаточно обеспеченные азотом почвы
Кислотности почв Rc (1-13)	6,85 кислые/слабокислые почвы, слабокислые почвы (pH=5,5-6,5)	7,01 слабокислые почвы (pH=5,5-6,5), слабокислые/ нейтральные почвы
Переменности увлажнения fH (1-11)	5,47 слабо переменное увлажнение, слабо переменное/ умеренно переменное увлажнение	5,18 слабо переменное увлажнение, слабо переменное/ умеренно переменное увлажнение
Освещенности-затенения Lc (1-9)	4,69 полуоткрытые пространства / светлые леса, светлые леса	4,76 полуоткрытые пространства / светлые леса, светлые леса

Результаты показали, что в целом оба вида имеют узкий диапазон распространения и по фактору увлажнения и солевого режима почв характеризуются как стеновалентные виды, по фактору освещенности-затенения – как гемиэвриваленты, и предпочитают полуоткрытые пространства и светлые леса. Воронец красноплодный по фактору богатства почв азотом и кислотности является гемистеновалентом, в то время как дремлик тёмно-красный имеет несколько более широкий диапазон распространения и по факторам этих шкал проявляет себя как гемиэври- и мезовалент. Индекс толерантности показывает меру приспособленности ценопопуляции вида к комплексу экологических факторов [Жукова и др., 2010]. По этому индексу оба вида имеют узкий диапазон экологических предпочтений по факторам почвенных шкал: воронец красноплодный – стенобионтный вид, а дремлик тёмно-красный – гемистенобионтный.

Таблица 2

Потенциальная экологическая валентность (PEV) и индекс толерантности (I_t) *Actaea erythrocarpa* Fisch. и *Epipactis atrorubens* (Hoffm. ex Bernh.) Besser)

Potential ecological valence (PEV) and tolerance index (It) *Actaea erythrocarpa* Fisch. and *Epipactis atrorubens* (Hoffm. ex Bernh.) Besser)

Экологические шкалы*	*Actaea erythrocarpa*			*Epipactis atrorubens*		
	Позиция вида по шкале фактора	PEV	I_t	Позиция вида по шкале фактора	PEV	I_t
Hd (1-23)	11-15	0,22 СВ	0,33 СБ	11-15	0,22 СВ	0,40 ГСБ
Tr (1-19)	5-9	0,26 СВ		3-6	0,21 СВ	
Nt (1-11)	6-10	0,45 ГСВ		1-7	0,64 ГЭВ	
Rc (1-13)	5-9	0,38 ГСВ		3-9	0,54 МВ	
Lc (1-9)	3-7	0,56 ГЭВ	0,56 ГЭБ	5-9	0,56 ГЭВ	0,56 ГЭБ

Примечание: экологические шкалы: Hd – увлажнения почв, Tr – солевого режима, Nt – богатства почв азотом, Rc – кислотности почв, Lc – освещенности-затенения; фракции валентности: СВ – стеновалентный, МВ – мезовалентный, ГСВ – гемистеновалентный, ГЭВ – гемиэвривалентный, СБ – стенобионтный, ГСБ – гемистенобионтный, ГЭБ – гемиэврибионтный, PEV – потенциальная экологическая валентность, I_t – индекс толерантности

3. *Липняки лещиновые широкотравно-звездчатковые*. В конце 80-х гг. прошлого века на некоторых участках хвойных лесов проводились сплошные рубки (кв. 134 Куженерского лесного участка). В настоящее время на этих участках распространены липняки.

Древостой с проективным покрытием 80%. A_I ярус не успел сформироваться. В A_{II} ярусе с ПП 60% растет липа сердцелистная высотой 16-18 м порослевого происхождения и засыхающие небольшие деревца ивы козьей. Густой подлесок (с ПП 30%) состоит в основном из лещины обыкновенной, высотой 6-8 м, и нескольких молодых кустов рябины обыкновенной такой же высоты. В небольшом количестве встречаются черемуха обыкновенная (*Padus avium* Mill.), бересклет бородавчатый и жимолость лесная. В подросте отмечена берёза пушистая (*Betula pubescens* Ehrh.) и поросль ели финской с липой сердцелистной. Травяной ярус средней густоты (ПП – 50%) состоит из 20 видов сосудистых растений. Доминируют звездчатка жёстколистная (*Stellaria holostea* L.) и пролесник многолетний,

содоминанты – ветреничка лютичная (*Anemonoides ranunculoides* (L.) Holub), сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria* L.) и щитовник мужской (*Dryopteris filix-mas* (L.) Schott). Почти все виды трав, кроме кислицы обыкновенной (*Oxalis acetosella* L.) и майника двулистного, являются характерными видами широколиственных лесов.

4. ***Рябинник малиновый снытево-хвощёвый*** сформировался на вырубках. Уклон склона – 20-25°. Максимальная высота такого временного сообщества после 7 лет вырубки – 5 м. Преобладают виды, характерные для подлеска (ПП – 75%), – рябина обыкновенная и нитрофильный вид – малина обыкновенная (*Rubus idaeus* L.). В подросте – береза бородавчатая (*Betula pendula* Roth), клён остролистный (*Acer platanoides* L.), с ПП не больше 10%. Травяной ярус густой, ПП – 75%, представлен 10 видами, среди них доминируют хвощ луговой (*Equisetum pratense* Ehrh.) и сныть обыкновенная. Нитрофильные виды – иван-чай узколистный (*Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop.) и крапива двудомная (*Urtica dioica* L.) – образуют ПП около 5-8%. Из неморальных растений встречаются медуница неясная (*Pulmonaria obscura* Dumort.), звездчатка жёстколистная, пролесник многолетний, из бореальных – фегоптерис связующий (*Phegopteris connectilis* (Michx.) Watt), щитовник Картузиуса (*Dryopteris carthusiana* (Vill.) H.P. Fuchs). Моховой покров отсутствует из-за густого травяно-кустарникового яруса.

5. ***Сероольшаники*** на обследованной территории представлены ***ольшаником бодяково-крапивным*** с вязом и черемухой. Они распространены в восточной части заказника, в долине р. Нолька. Чаще сероольшаники произрастают по левому берегу реки и занимают всю площадь от основания склона до русла. Такие леса не переувлажнены, т.к. идет хороший дренаж в сторону р. Нольки, водная поверхность которой находится на 2-3 м ниже окружающих лесов. Очень редко такой лес занимает всю ширину долины по обе стороны от русла р. Нолька, но чаще на правой стороне произрастают влажнотравные леса, где в древостое преобладают ель и пихта.

Древостой с ПП 40%. В первом ярусе с ПП 35% встречаются ольха серая (*Alnus incana* (L.) Moench) высотой до 20 м при диаметре стволов 20-28 см. Небольшое ПП (5%) образует пихта сибирская высотой 19 м при диаметре ствола 0,22 м. Во втором ярусе с ПП 10% произрастает вяз гладкий (*Ulmus laevis* Pall.). Возобновляются с ПП 10% черемуха обыкновенная, ель финская, ольха серая. Подлесок с ПП 3% образуют рябина обыкновенная, жимолость лесная, бересклет бородавчатый высотой до 1,2 метра.

ПП травяного покрова – 100%. Видовое богатство – 15 видов. Доминируют бодяк огородный (*Cirsium oleraceum* (L.) Scop.) и крапива двудом-

ная (ПП 70%). Субдоминантом с ПП 10% являются сныть обыкновенная, цицербита уральская (*Cicerbita uralensis* (Rouy) Beauverd) и борец северный (*Aconitum septentrionale* Koelle). В небольшом количестве (по 5 %) произрастают селезеночник очереднолистный (*Chrysosplenium alternifolium* L.), костер безостый (*Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub) и мягковолосник водяной (*Myosoton aquaticum* (L.) Moench). Купырь лесной (*Anthriscus sylvestris* (L.) Hoffm.), недоспелка копьелистная (*Parasenecio hastatus* (L.) H. Koyama), чистотел большой (*Chelidonium majus* L.), малина обыкновенная, чистец лесной (*Stachys sylvatica* L.), лютик золотистый (*Ranunculus auricomus* L.) и др. вместе дают ПП 15%.

Ниже (табл. 3) приведены результаты обработки флористических списков трех лесных сообществ. Согласно экологическим шкалам Д.Н. Цыганова [1983] почвы этих сообществ небогатые, бедные/достаточно обеспеченные азотом, кислые/слабокислые/нейтральные, имеют влажно-лесолуговое/сыро-лесолуговое увлажнение с относительно устойчивым со слабо переменным/умеренно переменным увлажнением. Липняк лещиновый широкотравно-звездчатковый произрастает в условиях светлых лесов, а рябинник малиновый снытево-хвощёвый и ольшаник бодяково-крапивный предпочитают полуоткрытые пространства/светлые леса.

6. *Пихтарники зеленомошно-кислициевые с елью* расположены в нижней трети склона на дерново-слабоподзолистых почвах, подстилаемых делювиальными суглинками значительной толщины. Уклон склона – 20°. Усохшая ель частично вырублена, остались пеньки. Древостой с проективным покрытием 75%. В A_I и A_{II} ярусах доминирует пихта, ель финская – содоминант. В подросте высока средообразующая роль клёна остролистного (высота до 9 м), пихта доминирует над елью; дуб черешчатый (*Quercus robur* L.), липа сердцелистная и берёза пушистая встречаются редко, их высота не превышает 3 м. В подлеске преобладает рябина обыкновенная высотой от 1 до 3 м с ПП 15%.

Травяной покров не густой, до 35% и включает всего 11 видов высших сосудистых растений. Доминирует кислица обыкновенная, содоминанты – майник двулистный и осока корневищная. Моховой покров относительно густой с ПП 45%. Доминирует ритидиадельфус трёхгранный. С небольшим обилием встречаются родобриум розетковидный (*Rhodobryum roseum* (Hedw.) Limpr.), брахитециум неравный (*Brachythecium salebrosum* (Hoffm. ex F. Weber & D. Mohr) Schimp.), гилокомиум блестящий (*Hylocomium splendens* (Hedw.) Bruch et al.). Из редких видов здесь произрастают ястребинка рощевая и схизахна мозолистая.

Таблица 3

Экологическая характеристика сообществ

Ecological characteristics of community

Экологические шкалы	Липняк лещиновый широкотравно-звездчатковый	Рябинник малиновый снытево-хвощёвый	Ольшаник бодяково-крапивный
Увлажнения почв Hd (1-23)	13,13 влажно-лесолуговое, влажно-лесолуго-вое/сыро-лесолуговое	13,24 влажно-лесолуго-вое, влажно-лесолуго-вое/сыро-лесолуговое	13,29 влажно-лесолуговое, влажно-лесолуго-вое/сыро-лесолуговое
Трофности почв Tr (1-19)	5,91 небогатые почвы, небогатые/ довольно богатые почвы	5,98 небогатые почвы, небогатые/довольно богатые почвы	6,36 небогатые/довольно богатые почвы, довольно богатые почвы
Богатства почв азотом Nt (1-11)	5,75 бедные азотом почвы, бедные азотом/достаточно обеспеченные азотом почвы	6,28 бедные азотом/ достаточно обеспеченные азотом почвы, достаточно обеспеченные азотом почвы	6,57 бедные азотом/ достаточно обеспеченные азотом почвы, достаточно обеспеченные азотом почвы
Кислотности почв Rc (1-13)	6,99 кислые/ слабокислые почвы, слабокислые почвы (pH=5,5-6,5)	6,46 кислые/ слабокислые почвы, слабокислые почвы (pH=5,5-6,5)	7,56 слабокислые почвы (pH=5,5-6,5), слабокислые/ нейтральные почвы
Переменности увлажнения fH (1-11)	4,93 относительно устойчивое/слабо переменное увлажнение, слабо переменное увлажнение	5,04 слабо переменное увлажнение, слабо переменное/ умеренно переменное увлажнение	6,00 слабо переменное/ умеренно переменное увлажнение
Освещенности-затенения Lc (1-9)	5,00 светлые леса	4,65 полуоткрытые пространства/светлые леса, светлые леса	4,06 полуоткрытые пространства/светлые леса, светлые леса

7. ***Ельник кислицево-широкотравный*** располагается в верхней части склона северо-восточной экспозиции на правом берегу к долине левого

притока р. Нолька (координаты N 56°51.431′ E 49°02.371′). Угол склона – 2°. На площади 4 × 10 м ПП травяного покрова – 95-100%, а на остальном склоне – 75%. Удивительно, что на небольшом по площади участке была отмечена большая концентрация редких видов (5). Почва перегнойно-карбонатная, сформирована на известняково-доломитовых породах. Древостой с ПП 55%, A_I ярус состоит из ели финской и в меньшей степени сосны обыкновенной. A_{II} ярус с ПП 10% состоит из берёзы пушистой (высота 24 м и диаметр 30 см) и вяза шершавого (*Ulmus glabra* Huds.) высотой 22 м и диаметром ствола 27 см. Клён остролистный уступает в высоте и в диаметре (высота 17 м, диаметр 18 см). Подрост (с ПП 7%) представлен вязом шершавым (высотой до 7 м), пихтой сибирской и елью финской (до 5 м высотой). ПП подлеска – до 6%. Встречаются высокие и старовозрастные кусты бересклета бородавчатого до 3 м. Здесь же растет в значительном количестве лещина обыкновенная высотой до 6 м. Рябина обыкновенная, жимолость лесная, черемуха обыкновенная не превышают в высоту 2 м, а калина обыкновенная и смородина колосистая (*Ribes spicatum* E. Robson) – 1 м. В травяном покрове – 35 видов, одно из самых богатых сообществ заказника. Доминируют пролесник многолетний и кислица обыкновенная. В значительном количестве произрастают двулепестник альпийский (*Circaea alpina* L.), майник двулистный, диплазий сибирский.

По факторам почвенных шкал (трофности, богатству почв азотом, кислотности и переменности увлажнения) и шкале освещенности-затенения оба сообщества имеют схожие экологические предпочтения (табл. 4).

Однако есть различия в характере увлажнения почв. В пихтарнике увлажнение сухолесолуговое/влажно-лесолуговое, а в ельнике – влажно-лесолуговое/сыро-лесолуговое.

Потенциальные возможности у ястребинки рощевой и диплазия сибирского не столь высоки. Оба вида занимают узкий диапазон по фактору влажности и трофности почв и согласно полученным значениям являются стеновалентами, а по фактору освещенности-затенения – эвривалентами (табл. 5).

Ястребинка рощевая по богатству почв азотом – гемиэвривалент (0,64), по кислотности этот вид занимает 7 ступеней из 13 возможных и является мезовалентом. Данные по этим шкалам для диплазиума сибирского у Д.Н. Цыганова [1983] отсутствуют. Значения индекса толерантности для обоих видов позволяют отнести их к гемистенобионтам (табл. 5).

Таблица 4

Экологическая характеристика сообществ

Ecological characteristics of pine community

Экологические шкалы	Пихтарник зеленомошно-кислициевый с елью	Ельник кислицево-широкотравный
Увлажнения почв Hd (1-23)	12,65 сухолесолуговое/влажно-лесолуговое, влажно-лесолуговое	13,20 влажно-лесолуговое, влажно-лесолуговое/сыро-лесолуговое
Трофности почв Tr (1-19)	5,65 небогатые почвы, небогатые/ довольно богатые почвы	5,93 небогатые почвы, небогатые/ довольно богатые почвы
Богатства почв азотом Nt (1-11)	5,72 бедные азотом почвы, бедные азотом/достаточно обеспеченные азотом почвы	5,85 бедные азотом почвы, бедные азотом/достаточно обеспеченные азотом почвы
Кислотности почв Rc (1-13)	6,46 кислые/слабокислые почвы, слабокислые почвы (pH=5,5-6,5)	6,79 кислые/слабокислые почвы, слабокислые почвы (pH=5,5-6,5)
Переменности увлажнения fH (1-11)	5,09 слабо переменное увлажнение, слабо переменное/ умеренно переменное увлажнение	5,40 слабо переменное увлажнение, слабо переменное/ умеренно переменное увлажнение
Освещенности-затенения Lc (1-9)	5,04 светлые леса, светлые/ тенистые леса	5,22 светлые леса, светлые/ тенистые леса

В исследуемых лесных фитоценозах нами обнаружены растения со статусом 3 – «редкий вид»: диплазий сибирский растет с проективным покрытием 80% на площади 4 × 6 м, пузырник судетский (корневищник судетский) – с ПП 35% на площади 1 × 1 м; небольшая ценопопуляция дремлика тёмно-красного и венерина башмачка настоящего в количестве 13 особей была представлена одной генеративной особью и 12 вегетирующими растениями; голокучник Роберта растет с ПП 15% на площади 2 × 4 м; отмечено всего 4 дерновинки схизахны мозолистой с 10 генеративными побегами в каждой дерновинке.

Таблица 5

Потенциальная экологическая валентность (PEV) и индекс толерантности (I_t)
Hieracium sylvularum* Jord. ex Boreau и *Diplazium sibiricum
(Turcz. ex Kunze) Sa. Kurata or (Turcz. ex Kunze) Jermy

Potential ecological valence (PEV) and tolerance index (I_t)
Hieracium sylvularum* Jord. ex Boreau and *Diplazium sibiricum
(Turcz. ex Kunze) Sa. Kurata or (Turcz. ex Kunze) Jermy

Экологические шкалы*	*Hieracium sylvularum*			*Diplazium sibiricum*		
	Позиция вида по шкале фактора	PEV	I_t	Позиция вида по шкале фактора	PEV	I_t
Hd (1-23)	10-14	0,22 СВ	0,41 ГСБ	12-17	0,26 СВ	0,26 ГСБ
Tr (1-19)	3-7	0,26 СВ		5-9	0,26 СВ	
Nt (1-11)	3-9	0,64 ГЭВ		-	-	
Rc (1-13)	5-11	0,54 МВ		-	-	
Lc (1-9)	3-9	0,78 ЭВ	0,78 ЭБ	3-9	0,78 ЭВ	0,78 ЭБ

Примечание: ЭВ – эвривалентный, ЭБ – эврибионтный. Остальные обозначения см. в примечании к табл. 2.

Заключение. Изучение семи лесных сообществ Государственного природного комплексного заказника республиканского значения «Горное Заделье» Республики Марий Эл с применением фитоиндикационного метода позволило охарактеризовать экологические условия экотопов этих фтоценозов по почвенным шкалам и шкале освещенности-затенения Д.Н. Цыганова. Результаты показали, что сосняки имеют одинаковые экологические предпочтения. В сосняке елово-лещиново-пролесниково-кислициевом почвы кислые/слабокислые и слабокислые, а в сосняке осочково-кислициевом – слабокислые и слабокислые/нейтральные. Почвы следующих трех сообществ небогатые, бедные/достаточно обеспеченные азотом, кислые/слабокислые/нейтральные, имеют влажно-лесолуговое/сыролесолуговое увлажнение с относительно устойчивым со слабо переменным/умеренно переменным увлажнением. Липняк лещиновый широкотравно-звездчатковый произрастает в условиях светлых лесов, а рябинник малиновый снытево-хвощёвый и ольшаник бодяково-крапивный предпочитают полуоткрытые пространства и светлые леса. По факторам почвен-

ных шкал (трофности, богатству почв азотом, кислотности и переменности увлажнения) и шкале освещенности-затенения пихтарник и ельник имеют схожие экологические предпочтения. Однако есть различия в характере увлажнения почв. В пихтарнике зеленомошно-кислициевом с елью увлажнение сухолесолуговое/влажно-лесолуговое, а в ельнике кислицево-широкотравном – влажно-лесолуговое/сыро-лесолуговое.

В исследуемых фитоценозах обнаружены редкие виды растений, занесенные в Красную книгу Республики Марий Эл [Рыжова и др., 2023]: диплазий сибирский, пузырник судетский, ястребинка рощевая, венерин башмачок настоящий, голокучник Роберта, схизахна мозолистая, воронец красноплодный и дремлик тёмно-красный.

Значения потенциальных экологических валентностей и индексов толерантности позволяют оценить адаптационные способности редких видов к условиям среды. Воронец красноплодный и дремлик тёмно-красный имеют узкий диапазон распространения по факторам увлажнения и солевого режима почв, поэтому характеризуются как стеновалентные виды, по фактору освещенности-затенения – гемиэвриваленты, предпочитают полуоткрытые пространства и светлые леса. Воронец красноплодный является гемистеновалентом по фактору богатства почв азотом и кислотности, в то время как дремлик тёмно-красный имеет несколько более широкий диапазон распространения и по факторам этих шкал проявляет себя как гемиэври- и мезовалент. Согласно значениям индекса толерантности оба вида имеют узкий диапазон экологических предпочтений по факторам почвенных шкал: воронец красноплодный – стенобионтный вид, а дремлик тёмно-красный – гемистенобионтный. В пихтарнике нами обнаружены ястребинка рощевая и схизахна мозолистая. По увлажнению и солевому режиму почв оба вида – стеноваленты. Ястребинка рощевая по богатству почв азотом – гемиэвривалент (0,64), по кислотности этот вид занимает 7 ступеней из 13 возможных и является мезовалентом. Данные по этим шкалам для диплазиума сибирского у Д.Н. Цыганова [1983] отсутствуют. Значения индекса толерантности для обоих видов позволяют отнести их к гемистенобионтам.

В целом все эти редкие виды имеют очень узкий диапазон распространения по почвенным шкалам, поэтому и характеризуются как гемистеновалентные и стеновалентные виды, а по отношению к комплексу факторов – гемистенобионты и стенобионты, что подчеркивает их уязвимость и важность охраны лесных экосистем заказника «Горное Заделье». С целью изучения численности этих видов и состояния их ценопопуляций необходим ежегодный мониторинг.

Вклад авторов. Богданов Г.А. – проведение полевых исследований, систематизация и анализ первичных данных; Бедова П.В. – сбор полевого материала и анализ литературных источников; Османова Г.О. – обработка первичного материала, обобщение полученных результатов и их интерпретация.

Сведения о финансировании исследования. Работа выполнена в рамках Государственного контракта № 11/А/2022 от 1.03.2022 года.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Васильева Л.Н., *Абрамов Н.В.* Материалы к флоре Марийской АССР // Флора Марийской АССР и вопросы её охраны. Йошкар-Ола, 1981. С. 22–43.

Жукова Л.А. Методология и методика определения экологической валентности, стеноэврибионтности видов растений // Методы популяционной биологии: сб. мат. VII Всерос. популяционного семинара. Сыктывкар, 2004. Ч. 1. С. 75–76.

Жукова Л.А., *Дорогова Ю.А.*, *Турмухаметова Н.В.*, *Гаврилова М.Н.*, *Полянская Т.А.* Экологические шкалы и методы анализа экологического разнообразия растений: монография. Йошкар-Ола: Мар. гос. ун-т, 2010. 368 с.

Зубкова Е.В., *Ханина Л.Г.*, *Грохлина Т.И.*, *Дорогова Ю.А.* Компьютерная обработка геоботанических описаний по экологическим шкалам с помощью программы EcoScaleWin. Йошкар-Ола: Мар. гос. ун-т. 2008. 96 с.

Красная книга Республики Марий Эл. Том «Растения. Грибы» / сост. Г.А. Богданов, Н.В. Абрамов, Г.П. Урбанавичюс, Л.Г. Богданова. Йошкар-Ола: Мар. гос. ун-т, 2013. 324 с.

Рыжова Л.В., *Жукова О.В.*, *Суетина Ю.Г.*, *Богданов Г.А.*, *Урбанавичюс Г.П.*, *Бекмансуров М.В.* Красная книга Республики Марий Эл. Растения. Грибы / под ред. О.Г. Барановой, Л.В. Рыжовой, Ю.Г. Суетиной. Йошкар-Ола: Мар. гос. ун-т, 2023. 352 с.

Цыганов Д.Н. Фитоиндикация экологических режимов в подзоне хвойно-широколиственных лесов. М.: Наука, 1983. 198 с.

Braun-Blanquet J. Pflanzensociologie. 3 Aufl. Wien; New York: Springer-Verlag, l964. 865 s.

References

Braun-Blanquet J. Pflanzensociologie. 3 Aufl. Wien; New York: Springer-Verlag, l964. 865 s.

Ryzhova L.V., *Zhukova O.V.*, *Suetina Yu.G.*, *Bogdanov G.A.*, *Urbanavichyus G.P.*, *Bekmansurov M.V.* Red Book of the Republic of Mari El. Plants. Mushrooms / ed. by O.G. Baranova, L.V. Ryzhova, Yu.G. Suetina. Yoshkar-Ola: Mari State University, 2023. 352 p. (In Russ.)

The Red Book of the Mari El Republic. Vol. “Plants. Mushrooms” / authors G.A. Bogdanov, N.V. Abramov, G.P. Urbanavichyus, L.G. Bogdanova. Yoshkar-Ola: Mari State University, 2013. 324 p. (In Russ.)

Tsyganov D.N. Phytoindication of ecological regimes in the subzone of coniferous-deciduous forests. Moscow: Nauka, 1983. 198 p. (In Russ.)

Vasilyeva L.N., *Abramov N.V.* Materials to the flora of the Mari ASSR. *The flora of the Mari ASSR and questions of its conservation*. Yoshkar-Ola, 1981, pp. 22–43. (In Russ.)

Zhukova L.A. Methodology and methods of determining the ecological valence, stenoeurybiontism of plant species. *Methods of population biology*: collection of mat. of the VII All-Russ. population seminar. Syktyvkar, 2004, part 1, pp. 75–76. (In Russ.)

Zhukova L.A., *Dorogova Yu.A.*, *Turmukhametova N.V.*, *Gavrilova M.N.*, *Polyanskaya T.A.* Ecological scales and methods of analysis of ecological diversity of plants: monograph. Yoshkar-Ola: Mari State University, 2010. 368 p. (In Russ.)

Zubkova E.V., *Khanina L.G.*, *Grokhlina T.I.*, *Dorogova Yu.A.* Computer processing of geobotanical descriptions according to ecological scales using the EcoScaleWin program. Yoshkar-Ola: Mari State University. 2008. 96 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 10.07.2025

Богданов Г.А., Османова Г.О., Бедова П.В. Фитоиндикационная оценка лесных сообществ Государственного природного комплексного заказника республиканского значения «Горное Заделье» Республики Марий Эл // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 97–114. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.97-114

В статье представлены результаты изучения семи лесных сообществ Государственного природного комплексного заказника республиканского значения «Горное Заделье» Республики Марий Эл: 1) *Pinus sylvestris* L. + Picea × *fennica* (Regel) Kom. – *Corylus avellana* L. – *Oxalis acetosella* L. + *Mercurialis perennis* L.; 2) *Pinus sylvestris* L. – *Carex rhizina* Blytt ex Lindblom + *Oxalis acetosella* L.; 3) *Tilia cordata* Mill. – *Corylus avellana* L. – *Stellaria holostea* L.; 4) *Sorbus aucuparia* L. – *Rubus idaeus* L. + *Aegopodium podagraria* L. + *Equisetum pratense* Ehrh.; 5) *Alnus incana* (L.) Moench – *Cirsium oleraceum* (L.) Scop. + *Urtica dioica* L.; 6) *Abies sibirica* Ledeb. + Picea × *fennica* (Regel) Kom. – *Oxalis acetosella* L. – *Rhytidiadelphus triquetrus* (Hedw.) Warnst.; 7) *Picea* × *fennica* (Regel) Kom. – *Oxalis acetosella* L. + *Mercurialis perennis* L. Дана характеристика лесных фитоценозов и фитоиндикационная оценка экотопов по почвенным шкалам и шкале освещенности-затенения Д.Н. Цыганова. Результаты показали, что почвы исследуемых фитоценозов небогатые, бедные/достаточно обеспеченные азотом; кислые/слабокислые/нейтральные; имеют сухолесолуговое/влажно-лесолуговое/сыро-лесолуговое увлажнение с относительно устойчивым со слабо переменным/умеренно переменным увлажнением; предпочитают полуоткрытые

пространства, светлые и тенистые леса. В исследуемых фитоценозах обнаружены редкие виды растений: *Diplazium sibiricum* (Turcz. ex Kunze) Sa. Kurata or (Turcz. ex Kunze) Jermy, *Cystopteris sudetica* A. Braun et Milde [*Rhizomatopteris sudetica* (A. Braun et Milde) A.P. Khokhr.], *Hieracium sylvularum* Jord. ex Boreau, *Cypripedium calceolus* L., *Gymnocarpium robertianum* (Hoffm.) Newman, *Schizachne callosa* (Turcz. ex Griseb.) Ohwi, *Actaea erythrocarpa* Fisch. и *Epipactis atrorubens* (Hoffm. ex Bernh.) Besser. Значения потенциальных экологических валентностей и индексов толерантности позволяют оценить адаптационные способности редких видов к условиям среды. Практически все они имеют узкий диапазон распространения по почвенным шкалам и характеризуются как гемистеновалентные и стеновалентные виды, а по отношению к комплексу факторов являются гемистенобионтами и стенобионтами, что подчеркивает их уязвимость и важность охраны лесных экосистем данного заказника.

Ключевые слова: фитоиндикация, экологические шкалы, потенциальная экологическая валентность, индекс толерантности, лесные фитоценозы, редкие виды, ООПТ «Горное Заделье», Республика Марий Эл.

Bogdanov G.A., Osmanova G.O., Bedova P.V. Phytoindication assessment of forest communities of the State nature complex reserve of republican significance «Gornoye Zadelye» of the Republic of Mari El. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 97–114 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.97-114

The article presents the results of a study of seven forest communities of the State Nature Complex Reserve of Republican Significance “Gornoye Zadelye” of the Mari El Republic: 1) *Pinus sylvestris* L. + *Picea* × *fennica* (Regel) Kom. – *Corylus avellana* L. – *Oxalis acetosella* L. + *Mercurialis perennis* L.; 2) *Pinus sylvestris* L. – *Carex rhizina* Blytt ex Lindblom + *Oxalis acetosella* L.; 3) *Tilia cordata* Mill. – *Corylus avellana* L. – *Stellaria holostea* L.; 4) *Sorbus aucuparia* L. – *Rubus idaeus* L. + *Aegopodium podagraria* L. + *Equisetum pratense* Ehrh.; 5) *Alnus incana* (L.) Moench – *Cirsium oleraceum* (L.) Scop. + *Urtica dioica* L.; 6) *Abies sibirica* Ledeb. + *Picea* × *fennica* (Regel) Kom. – *Oxalis acetosella* L. – *Rhytidiadelphus triquetrus* (Hedw.) Warnst.; 7) *Picea* × *fennica* (Regel) Kom. – *Oxalis acetosella* L. + *Mercurialis perennis* L. The characteristics of forest phytocenoses and phytoindication assessment of ecotopes are given according to soil scales and the illumination-shading scale of D.N. Tsyganov. The results showed that the soils of the studied phytocenoses are poor, poor/sufficiently supplied with nitrogen; acidic/slightly acidic/neutral; have dry forest-meadow/wet forest-meadow/damp forest-meadow moisture with relatively stable with slightly variable/moderately variable moisture; prefer semi-open spaces, light and shady forests. Rare plant species were found in the studied phytocenoses: *Diplazium sibiricum* (Turcz. ex Kunze) Sa. Kurata or (Turcz. ex Kunze) Jermy, *Cystopteris sudetica* A. Braun et Milde [*Rhizomatopteris sudetica* (A. Braun et Milde) A.P. Khokhr.], *Hieracium sylvularum* Jord. ex Boreau, *Cypripedium calceolus* L., *Gymnocarpium robertianum* (Hoffm.)

Newman, *Schizachne callosa* (Turcz. ex Griseb.) Ohwi, *Actaea erythrocarpa* Fisch. и *Epipactis atrorubens* (Hoffm. ex Bernh.) Besser. The values of potential ecological valences and tolerance indices allow us to assess the adaptive abilities of rare species to environmental conditions. Almost all of them have a narrow distribution range on soil scales and are characterized as hemisthenovalent and stenovalent species, and in relation to a complex of factors they are hemisthenobionts and stenobionts, which emphasizes their vulnerability and the importance of protecting the forest ecosystems of this reserve.

Keywords: phytoindication, ecological scales, potential ecological valence, tolerance index, forest phytocenoses, rare species, “Gornoye Zadelye” protected area , Mari El Republic

---

БОГДАНОВ Геннадий Алексеевич – старший научный сотрудник ГПЗ «Большая Кокшага». SPIN-код: ORCID: 0000-0002-9662-9836.

424038, ул. Воинов-Интернационалистов, д. 26, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия. E-mail: gabogdanov@mail.ru

BOGDANOV Gennadiy A. – Senior Researcher of the State Nature Reserve «Bolshaya Kokshaga». SPIN-code: ORCID: 0000-0002-9662-9836.

424038. Voinov-Internationalistov str. 26. Yoshkar-Ola. Republic of Mari El. Russia. E-mail: gabogdanov@mail.ru

ОСМАНОВА Гюльнара Орудж кзы – доцент кафедры экологии и фармации Марийского государственного университета, профессор, доктор биологических наук. SPIN-код: 9170-1841. ORCID: 0000-0002-7553-8580.

424002, ул. Осипенко, д. 60, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия. E-mail: gyosmanova@yandex.ru

OSMANOVA Gulnara O. – DSc (Biological), Associate Professor of the Department of Ecology and Pharmacy of Mari State University, Professor. SPIN-code: 9170-1841. ORCID: 0000-0002-7553-8580.

424038. Osipenko str. 60. Yoshkar-Ola. Republic of Mari El. Russia. E-mail: gyosmanova@yandex.ru

БЕДОВА Прасковья Владимировна – доцент кафедры биологии Марийского государственного университета, кандидат биологических наук. SPIN-код: 5164-0619. ORCID: 0000-0003-4200-6534.

424002, ул. Осипенко, д. 60, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия. E-mail: bedova@marsu.ru

BEDOVA Praskovya V. – PhD (Biological), Associate Professor of the Department of Biology of Mari State University. SPIN-code: 5164-0619. ORCID: 0000-0003-4200-6534.

424038. Osipenko str. 60. Yoshkar-Ola. Republic of Mari El. Russia. E-mail: bedova@marsu.ru

УДК 574.42

Д.В. Лежнев, Ю.Б. Глазунов, С.А. Коротков, А.В. Титовец

ВТОРИЧНЫЕ СУКЦЕССИИ ПОСЛЕ СПЛОШНОЙ САНИТАРНОЙ РУБКИ СОСНЯКОВ В БЛИЖНЕМ ПОДМОСКОВЬЕ

Введение. Известно, что восстановление лесных экосистем после антропогенных нарушений до условно коренного типа, при условии наличия в доступной близости источников обсеменения, занимает несколько столетий и зависит от характера предшествующего землепользования [Морозов, 1900; Мелехов, 1962; Рысин, 2009; Лукина и др., 2018]. Процесс естественного возобновления является сложным. В него могут вмешиваться многочисленные экологические и лесохозяйственные факторы [Ruano et al., 2009; Guignabert, 2018; Ribeiro et al., 2022].

Структура лесных фитоценозов, формирующихся после катастрофических нарушений, определяется характером протекающих сукцессий. Изучение закономерностей сукцессионных процессов позволяет оценить перспективы возобновления леса [Бобровский, 2010; Разнообразие…, 2012; Киселева, 2016; Лежнев, 2022]. Внешнее вмешательство в фитоценоз нередко приводит к кардинальным изменениям в структуре всей экосистемы. Значительные нарушения во всех ценоэлементах фитоценоза наблюдаются после рубки [Крышень, 2006; Беляева и др., 2012; Patacca et al., 2023].

Как правило, данные нарушения приводят к необратимым последствиям. На сплошных вырубках лес формируется в одних случаях через смену видов-эдификаторов и субэдификаторов, что принято считать генетическими рядами сукцессий [Исаев и др., 2008], а в других – без смены эдификаторов [Сукачев, 1964]. Начальная фаза восстановительных сукцессий требует детального изучения. Необходимо выявлять условия, которые следует учитывать при проведении лесовосстановления на вырубках. Для обоснованного назначения лесовосстановительных мероприятий необходим научно обоснованный прогноз последующих направлений сукцессионных циклов [Целитан и др., 2021; Лежнев и др., 2023].

Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) устойчива только в местообитаниях с экстремальными условиями, в остальных случаях она сменится другими породами либо в силу того, что по тем или причинам занимает несвойственные ей местообитания, либо в связи с исчезновением факто-

ров, поддерживающих ее существование [Рысин, 2009; Кухта и др., 2023; Глазунов и др., 2024а]. Рассматривая сукцессии в лесах, необходимо учитывать исторический фактор. После катастрофических нарушений протекают демутационные процессы, в ходе которых может восстановиться исходный породный состав древостоев. Вместе с тем породный состав и структура насаждений способны восстановиться только в том случае, если условия, в которых протекает демутационный процесс, соответствуют условиям, в которых было сформировано исходное насаждение.

В контексте глобального изменения климата и из-за широкого естественного ареала сосна сталкивается с рядом экологически разнообразных условий, которые значительно отличаются от ее экологического оптимума [Loarie et al., 2009; Benavides et al., 2013]. При этом данная порода имеет способность адаптации к различным экологическим условиям.

Преимуществом сосны по сравнению с другими лесообразующими породами является нетребовательность к почвенным условиям. Наиболее успешно возобновление сосны происходит на бедных сухих и заболоченных почвах, так как в этих условиях конкуренция практически отсутствует [Шиманюк, 1974; Усольцев, 2001; Hannerz et al., 2002; Galdina, Khazova, 2019].

Отрицательная связь густоты соснового подроста с эффективным плодородием почвы означает, что лучшие почвы после вырубки материнского древостоя быстро занимают конкуренты: травяной покров, подлесок, подрост мелколиственных пород [Смирнов и др., 2020]. Некоторые растения из состава подлеска и травянистых растений являются главными конкурентами сосны [Лежнев, Купченко, 2024; Uutera, 1995; Nilsson, Allen, 2003]. Мелколиственные породы считаются сильными конкурентами на поздних стадиях возобновления хвойных пород [McCarthy et al., 2011; Lof et al., 2012]. Сосна, при высокой устойчивости к некоторым стрессовым абиотическим условиям, на начальных стадиях онтогенетического развития испытывает сильную конкуренцию со стороны травянистых растений [Мелехов, 1958; Черненькова и др., 2019].

Сохранение длительно и эффективно функционирующих сосновых фитоценозов в условиях возрастающей урбанизации крайне важно для обеспечения устойчивого развития мегаполисов. Пригородные леса подвержены значительным нагрузкам, которые связаны с процессом урбанизации [Махрова, 2021; Korotkov et al., 2023]. Увеличение количества различных катастрофических нарушений обуславливает актуальность исследований, направленных на изучение особенностей лесовосстановительных процессов на вырубках в Московской области.

Цель исследования – изучение восстановительных процессов древесной и кустарниковой растительности на начальных стадиях демутации после ветровала с последующей сплошной санитарной рубкой в сосновых насаждениях ближнего Подмосковья.

Объект и методика исследования. Объектом исследования стали две вырубки после сплошных санитарных рубок на месте ветровала в 2017 г. на территории Серебряноборского опытного лесничества, относящейся к Москворецко-Окской физико-географической провинции. Территория лесничества занимает долину реки Москвы и прилежащий водораздел. Примерно половину площади лесничества занимают надпойменные террасы реки Москвы [Анненская и др., 1997; Огуреева, Булдакова, 2006].

По лесорастительному районированию изучаемые участки относятся к зоне хвойно-широколиственных лесов. Почвы супесчаные. Тип условий местопроизрастания – свежие субори (B_2). Тип вырубки – вейниково-разнотравный. Обе вырубки были расчищены от упавших деревьев в 2018 г., следовательно, их зарастание началось одновременно.

Обследования вырубок проводились в течение четырех лет, начиная с 2020 г. Первая вырубка (55°44′30″ с.ш. 37°18′46″ в.д.) имеет площадь 7,76 га. Вторая вырубка (55°44′15″ с.ш. 37°19′09″ в.д.) имеет площадь 7,79 га (рис. 1, табл. 1).

Рис. 1. Контуры обследованных вырубок и расположение учетных площадок
Fig. 1. Contours of the surveyed cuttings and the location of the accounting sites

Таблица 1

Характеристика насаждений, произраставших в Серебряноборском опытном лесничестве на месте ветровала

Characteristics of the stands that grew in the Serebryanoborsky Experimental Forestry on the site of the wind

Вырубка	Квартал	Выдел	Площадь, га	Состав	Тип леса
№ 1	44	9	7,76	10С+Б	Сосняк сложный
	45	14		8С1Б1Ос+Лп+Д	
№ 2	59	2	7,79	8Б2Ос	Березняк разнотравный
		3		6Б2Ос2Олс	
		7		6Б2Ос1Олс1Д	
	45	22		7С3Б+Ос+Д	Сосняк сложный
		23		9С1Б	
		24		6Б3Ос1Олс+С	
		25		7С3Б	

Примечание. С – сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.); Б – береза повислая (*Betula pendula* Roth); Ос – осина (*Populus tremula* L.); Лп – липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill.); Д – дуб черешчатый (*Quercus robur* L.); Олс – ольха серая (Alnus incana (L.) Moench)

Для учета численности древесно-кустарниковой растительности на исследуемых вырубках было заложено 46 круговых учетных площадок по 10 м^2 каждая. На вырубке № 1 заложено 22 учетных площадки, на вырубке № 2 – 24 площадки [Глазунов и др., 2024б].

При оценке жизнеспособности подроста использовали количественные и качественные показатели: цвет хвои, протяженность кроны. В перечет включали только жизнеспособный подрост с подразделением его по классам высот. У каждого экземпляра сосны измерялись годичные приросты осевого побега в высоту по мутовкам.

В ходе исследования определялась средняя численность на учетной площадке, ошибка средней численности, среднеквадратическое отклонение, коэффициент вариации, показатель точности наблюдений и коэффициент гомогенности (КГ). Если КГ < 1, то распределение подроста случайное, если КГ = 1, то распределение равномерное, если КГ > 1 – распределение групповое [Данилов и др., 2018].

На каждой учетной площадке учитывали численность и высоту всех древесных и кустарниковых растений. При характеристике подроста выде-

лялось три класса высот: мелкий (высота до 50 см), средний (51-150 см), крупный (более 151 см)[1] [Загреев, 1992].

Расчет средних значений, стандартных ошибок, коэффициента вариации и других статистических показателей выполнен в программе Microsoft Excel 2020.

Результаты исследования и их обсуждение. Характер формирования лесных сообществ во многом определяется конкурентными взаимоотношениями между древесной растительностью. Изучение спелых и перестойных сосновых насаждений не позволяет определить начальные стадии их формирования [Рысин, Савельева, 2008].

В 2020 г. на вырубке №1 численность сосны составляла 2860 шт./га, березы – 1860 шт./га, осины – 410 шт./га. В 2021 г. на вырубке №1 данные виды упрочили свое доминирование, численность сосны составила 10680 шт./га, березы – 5510 шт./га, осины – 1640 шт./га. Подлесочные виды: ива козья – 2140 шт./га, рябина – 1770 шт./га. На шестой год после ветровала (2023 г.) численность сосны и березы снизилась до 7860 и 3570 шт./га соответственно, при этом численность осины и ивы козьей увеличилась до 5430 и 4210 шт./га соответственно. Численность рябины за исследуемый период варьирует в диапазоне от 1500 до 3000 шт./га (рис. 2).

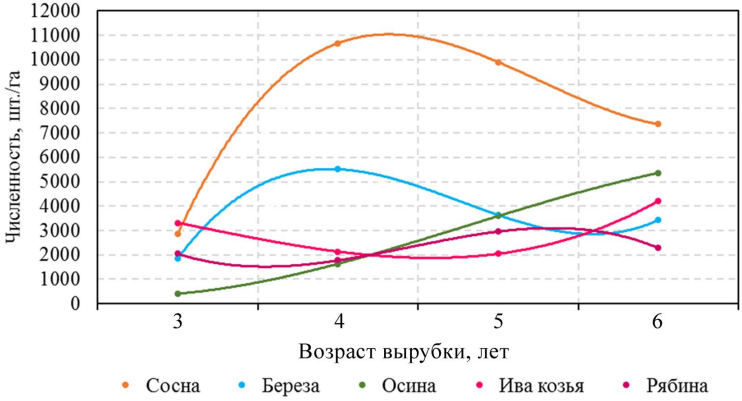


Рис. 2. Изменение численности основных древесных пород на вырубке №1
Fig. 2. The change in the number of main tree species at cutting No. 1

[1] Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 29 декабря 2021 года № 1024 «Об утверждении Правил лесовосстановления, формы, состава, порядка согласования проекта лесовосстановления, оснований для отказа в его согласовании, а также требований к формату в электронной форме проекта лесовосстановления».

На вырубке №2 в 2020 г. численность сосны составляла 1890 шт./га, березы – 4420 шт./га, осины – 1150 шт./га. В 2021 г. численность сосны, осины и ивы козьей значительно увеличилась и составила 5300, 2540 и 3180 шт./га соответственно, а численность березы сохранилась на прежнем уровне и составила 4410 шт./га. За последний год отмечается значительное увеличение численности всех основных древесных пород. Численность рябины за исследуемый период варьирует от 440 до 1540 шт./га (рис. 3). На шестой год отмечается значительное доминирование ивы козьей по численности среди древесных пород (8170 шт./га).

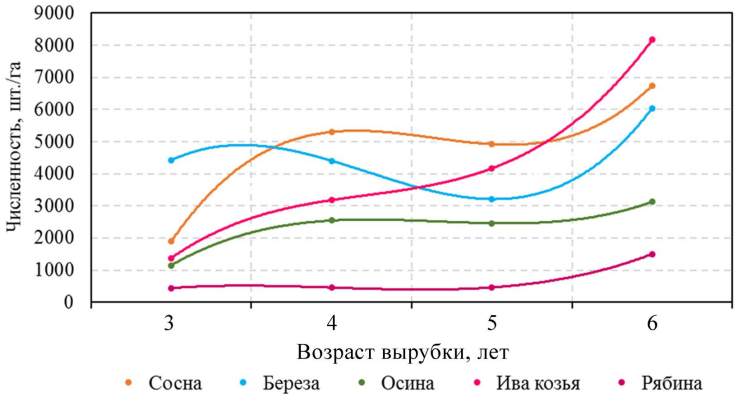


Рис. 3. Изменение численности основных древесных пород на вырубке №2
Fig. 3. The change in the number of main tree species at cutting No. 2

Численность сосны на вырубках превосходит количество сопутствующих пород, однако по средней высоте береза и осина значительно опережают сосну.

Анализ видового состава показал, что на вырубке №1 обнаружено 11 видов деревьев (65% от общего количества видов деревьев и кустарников) и 6 – кустарников (35%). На вырубке №2 обнаружено 8 видов деревьев (61% от общего числа видов) и 5 видов кустарников (39%). На обеих вырубках в возобновлении доминируют береза, осина и сосна. Также в незначительном количестве представлены дуб черешчатый, липа мелколистная, клен остролистный, тополь душистый, черемуха обыкновенная, лещина обыкновенная, крушина ломкая и бузина красная.

Установлена общая численность древесно-кустарниковой растительности на шестой год после осуществления сплошной санитарной рубки

(рис. 4, 5). Численность древесных и кустарниковых пород на вырубке №1 составляет 26,0 тыс. шт./га, из которых 7,86 тыс. шт./га приходятся на долю сосны обыкновенной. Численность древесных и кустарниковых пород на территории вырубки №2 составляет 29,2 тыс. шт./га, из которых 6,78 тыс. шт./га приходятся на долю сосны, однако ива козья превышает по количеству сосну на 1390 шт./га.

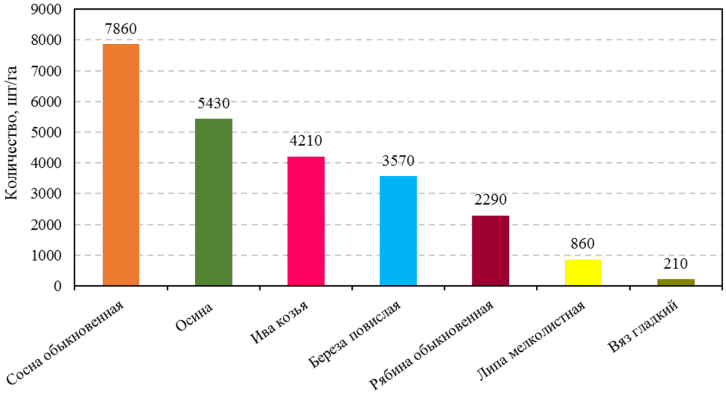


Рис. 4. Численность древесно-кустарниковой растительности в 2023 г. на вырубке №1

Fig. 4. The number of woody and shrubby vegetation in 2023 at cutting No. 1

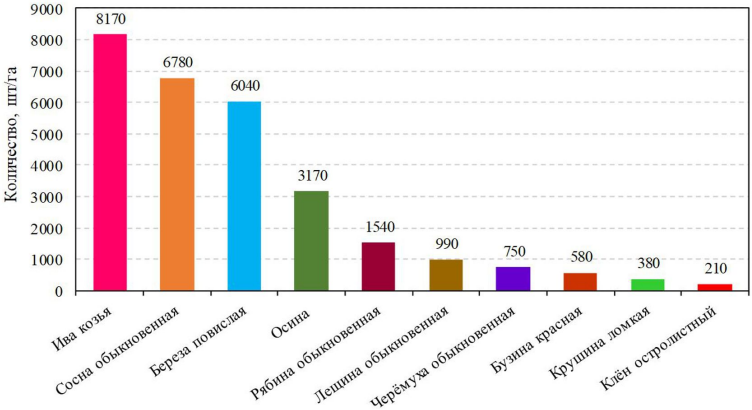


Рис. 5. Численность древесно-кустарниковой растительности в 2023 г. на вырубке №2

Fig. 5. The number of woody and shrubby vegetation in 2023 at cutting No. 2

На 6-й год после ветровала и сплошной санитарной рубки на вырубке №1 формируется насаждение со следующим синтезированным породным составом в переводе на крупный: 38С36Ос19Б6Лп1В+Д, Кло. Аналогичный породный состав формируется и на вырубке №2 – 39С39Б21Ос1Кло. Таким образом, долевое участие сосны обыкновенной на обоих участках исследования не превышает 40% от общего количества основных лесообразующих пород в переводе на крупный.

Характер размещения возобновления древесных пород на вырубках различный. Вырубка №1, максимальная ширина которой не превышает 120 м, со всех сторон окружена насаждениями с преобладанием в составе сосны. Возобновление основных древесных пород на этой вырубке распределено относительно равномерно. Встречаемость сосны в 2023 г. была равна 100%, березы – 71%, осины – 79%. Количество сосны на учетных площадках в непосредственной близости от опушек составило от 2 до 13 тыс. шт./га, тогда как в центральной части вырубки оно изменялось от 3 до 15 тыс. шт./га. Количество березы и осины на учетных площадках варьировало от 0 до 12 тыс. шт./га. Площадки с отсутствием подроста этих пород встречались как в непосредственной близости от опушек, так и в центральной части вырубки.

На вырубке №2 возобновление сосны приурочено в основном к северной опушке, где сосна преобладает в составе насаждения. Возобновление березы распределяется по площади вырубки № 2 равномерно. Осина семенного происхождения успешно возобновляется на расстоянии до 100 м от стен леса (рис. 6).

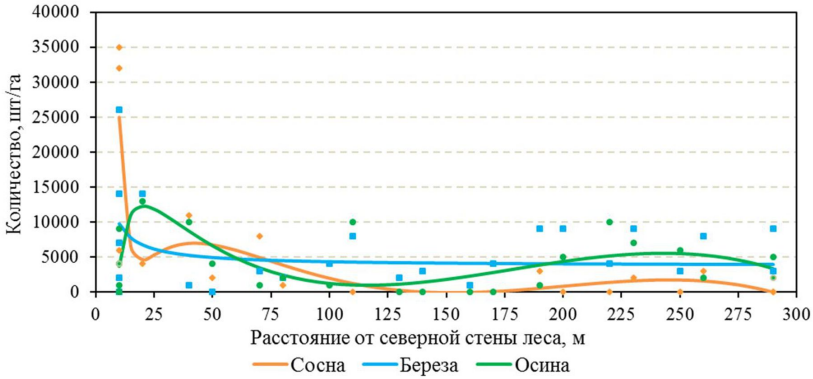


Рис. 6. Распределение деревьев основных лесообразующих пород в зависимости от расстояния от северной стены леса на вырубке №2 в 2023 г.

Fig. 6. Distribution of trees of the main forest-forming species depending on the distance from the northern wall of the forest at cutting No. 2 in 2023

Различный характер распределения возобновления по территории вырубок обусловлен как особенностями строения и разлета семян, так и наличием источников обсеменения.

Высота и прирост растений характеризуют их состояние на момент проведения исследования, а в динамике по ним можно выявить закономерности развития во времени [Зарипов и др., 2021].

Способность расти с различной скоростью является адаптивным механизмом, позволяющим древесным породам формировать в различных условиях роста устойчивые долговечные насаждения [Бабич и др., 2008].

На вырубке №1 больше всего экземпляров сосны в средней категории крупности (55%), мелколиственные породы (береза и осина) также преобладают в средней категории – 50% и 56% соответственно. Значительное количество мелкого подроста сосны свидетельствует об успешном естественном возобновлении на шестой год после начала восстановления. Наличие крупного подроста осины (40%) и березы (15%) увеличивает вероятность образования сомкнутого полога из мелколиственных пород в ближайшей перспективе.

На вырубке №2 в составе молодого поколения сосна преобладает в средней категории (60%). У мелколиственных пород преобладает крупный подрост березы – 80% – и осины – 75%, что указывает на их доминирование над сосной (27%).

Рассматривая высотную структуру, необходимо отметить большой разброс высот. Категория крупных и средних экземпляров лиственных пород по высоте на обеих вырубках преобладает, что демонстрирует их успешное возобновление на шестой год после катастрофических нарушений. Сосна существенно уступает в росте по высоте конкурентам (рис. 7).

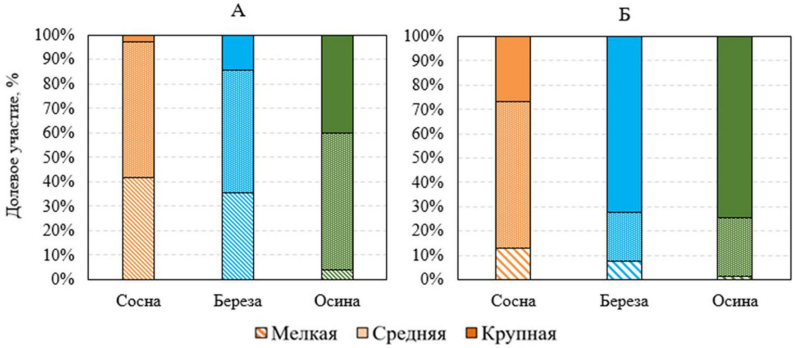


Рис. 7. Высотная структура основных лесообразующих пород на вырубках №1 (А) и №2 (Б) в 2023 г.

Fig. 7. The height structure of the main forest-forming rocks at cuttings No. 1 (A) and No. 2 (B) in 2023

Анализируя возрастную структуру сосны на вырубке №1, можно отметить, что возраст деревьев варьирует от 2 до 5 лет, а на вырубке №2 – от 2 до 6 лет. По результатам проведенного исследования установлено, что на шестой год после ветровала с последующей сплошной санитарной рубкой отсутствуют однолетние особи сосны обыкновенной (рис. 8).

На вырубке №1 преобладают экземпляры сосны четырехлетнего возраста – 57%, а на вырубке №2 больше особей пятилетнего возраста – 54%. Средний возраст главной породы на объектах исследования: вырубка №1 – 3,6±0,1 года; вырубка №2 – 4,5±0,1 года.

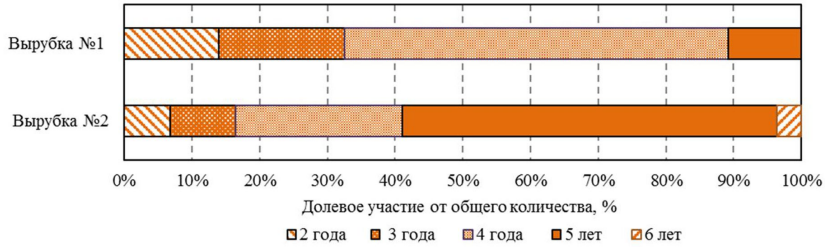


Рис. 8. Возрастная структура сосны обыкновенной на вырубках в 2023 г.
Fig. 8. Age structure of Scots pine at the research sites in 2023

Показателем жизнеспособности древесных растений является прирост по высоте. На двух вырубках проанализированы средние приросты по высоте сосны после катастрофических нарушений (рис. 9).

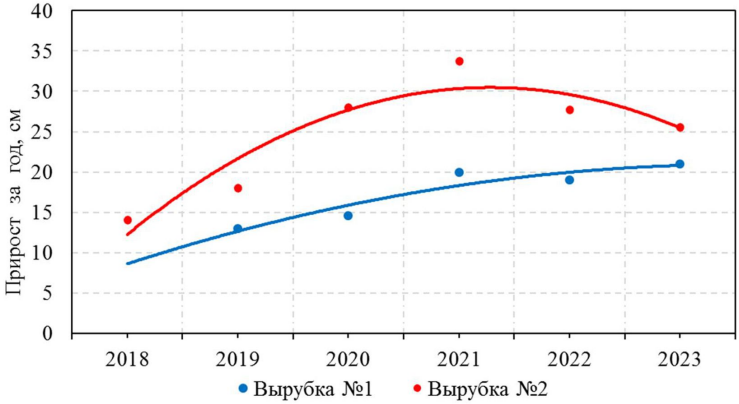


Рис. 9. Изменение ежегодных приростов сосны обыкновенной на объектах исследования
Fig. 9. Change in annual increments of Scots pine at the research sites

На вырубке №1 отмечается ежегодное увеличение приростов, что свидетельствует о благоприятных условиях для главной породы. На вырубке №2 прирост за последние два года (2022 и 2023) снижается относительно 2021 г. В целом на шестой год отмечается выравнивание ежегодных приростов сосны на вырубках в диапазоне 20-30 см.

Древесно-кустарниковая растительность на вырубках №1 и №2 существенно отличается по высоте. Сосна обыкновенная в 2021 г. на вырубке №1 имеет среднюю высоту 33,1 см, а на вырубке №2 – 78 см. Средние высоты мелколиственных пород на вырубке №1 в 2021 г. составили: береза – 92 см; осина – 138 см. Минимальная высота березы была равна 15 см, а максимальная – 204 см, осины – 63 см и 239 см соответственно. Средние высоты подлесочных пород варьируют от 29,5 до 143,8 см. На шестой год (2023 г.) наблюдается уменьшение средней высоты у березы на 12 см, до 93 см, и ивы козьей на 33 см, до 122 см относительно 2022 г. (рис. 10).

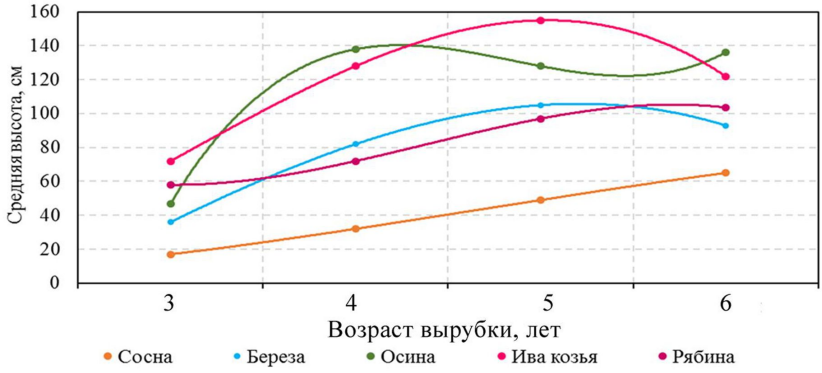


Рис. 10. Средняя высота основных древесных пород на вырубке №1
Fig. 10. The average height of the main tree species in cutting No. 1

На вырубке №2 в 2021 г. средняя высота березы составляла 180 см, а осины – 175 см. Средние высоты подлесочных пород варьировали от 108 до 230 см. Высота отдельных особей ивы достигала 5,0 м. Прослеживается постепенный рост всех древесных пород. Однако значение средней высоты в 2022 г. оказалось ниже на 41 см, чем в предыдущем, и составило 129 см, а в 2023 г. установлено незначительное уменьшение средней высоты у березы на 6 см (205 см). На шестой год у сосны увеличилась средняя высота на 17 см по сравнению с предыдущим годом. При этом высота сосны значительно ниже, чем у лиственных пород (рис. 11).

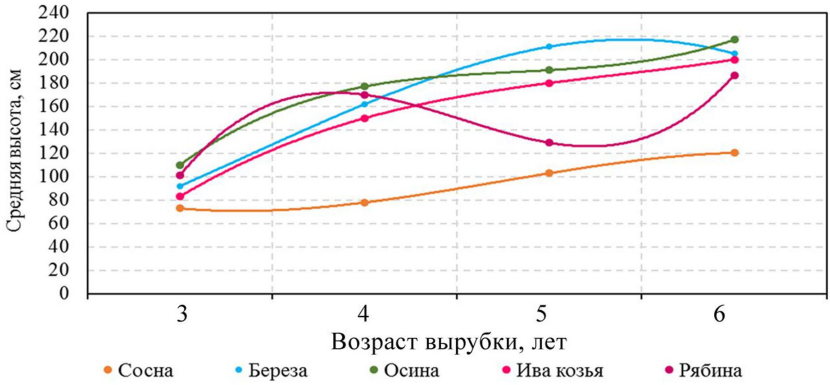


Рис. 11. Средняя высота основных древесных пород на вырубке №2
Fig. 11. The average height of the main tree species in cutting No. 2

Варьирование средней высоты в разные годы исследования обусловлено продолжающимся процессом естественного возобновления всех рассматриваемых пород.

Распределение высот основных лесообразующих пород на объектах исследования показывает доминирование березы и осины, которые, наряду с подлесочными породами (ива козья и рябина), значительно опережают в росте и угнетают сосну. Статистические показатели учета естественного возобновления сосны, березы и осины на исследуемых вырубках отражены в табл. 2.

Молодое поколение основных лесообразующих пород имеет среднюю густоту и представлено в количестве от 3710 до 7860 шт./га на 6-й год после начала восстановительного процесса. Коэффициент встречаемости свидетельствует о равномерном размещении пород по всей площади выбранных объектов, однако на вырубке №2 сосна распространена только вблизи северной стены леса и эпизодически у южной (встречаемость 58,3%). На вырубке №1 средняя численность подроста сосны на учетной площадке – 7,4 шт., на вырубке № 2 – 6,8 шт. соответственно.

Варьирование на обеих вырубках по всем породам высокое, так как коэффициент вариации превышает 31% [Данилов и др., 2018]. Величина коэффициента гомогенности говорит о групповом размещении особей на всех вырубках (КГ>1), эти обстоятельства обусловлены экологическими свойствами (отношение к свету, влаге и почвенному плодородию) исследуемых пород, кроме осины на вырубке №2 (КГ= 0,65). Для популяции сосны характерно равномерно-случайное распределение на вырубках независимо от типа леса [Беляева и др., 2019; Bilek et al., 2018].

Таблица 2

Статистические показатели учета естественного возобновления основных лесообразующих пород на шестой год после катастрофических нарушений

Statistical indicators of accounting for the natural renewal of the main forest-forming species in the sixth year after catastrophic violations

Статистический показатель	Порода					
	Сосна		Береза		Осина	
	Вырубка					
	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2
Численность подроста, шт./га	7860	6780	3570	6040	5430	3710
Встречаемость, %	100	58,3	71,4	91,7	78,6	66,7
Средняя численность на учетной площадке, шт./10м^2	7,4	6,8	3,6	4,9	5,4	2,5
Ошибка среднего, шт.	±1,6	±1,1	±0,6	±0,8	±1,1	±0,3
Среднеквадратическое отклонение	5,8	5,4	2,3	3,8	4,0	1,3
Коэффициент вариации, %	79,26	80,64	64,86	76,83	74,44	50,95
Коэффициент гомогенности	4,62	4,39	1,50	2,93	3,01	0,65

Проверка нормальности распределения подроста сосны, березы и осины на вырубках по критерию χ^2 Пирсона показала, что распределение является нормальным у всех пород на вырубке №2 и у осины на вырубке №1. Учитывая значительные различия в характере распределения роста по высоте на вырубках, сравнение вырубок было выполнено с использованием рангового коэффициента корреляции Спирмена. Слабая корреляция при уровне значимости $p<0,05$ обнаружена только у осины (табл. 3).

Однако соотношение асимметрии, эксцесса и ошибок репрезентативности этих показателей указывает на то, что распределение, возможно, отличается от нормального для всех исследуемых выборок. Асимметрия везде имеет положительные значения; вместе с тем у сосны и в особенности у березы на вырубке №1 она значительно больше, чем на вырубке №2. На это указывает также анализ гистограмм (рис. 12).

Таблица 3

Статистические показатели распределения основных лесообразующих пород по высоте на шестой год после катастрофических нарушений

Statistical indicators of the distribution of the main forest-forming species by height in the sixth year after catastrophic disturbances

Статистический показатель	Порода					
	Сосна		Береза		Осина	
	Вырубка					
	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2
Средняя высота, см	70,0	119,7	90,6	203,6	136,0	217,5
Стандартная ошибка, см	4,0	4,2	8,7	8,1	6,5	9,6
Стандартное отклонение, см	42,3	53,8	61,6	97,4	56,6	83,3
Минимальная высота, см	4	9	12	17	34	42
Максимальная высота, см	182	270	240	450	260	400
Медиана, см	58,5	123,0	69,0	210,0	128,5	211,0
Асимметрия	0,56	0,14	0,80	0,10	0,30	0,19
Ошибка репрезентативности асимметрии	0,23	0,19	0,35	0,20	0,28	0,20
Эксцесс	-0,57	0,001	-0,34	-0,34	-0,82	-0,75
Ошибка репрезентативности эксцесса	0,48	0,38	0,69	0,41	0,56	0,41
Критерий χ^2 Пирсона факт. χ^2 табл. (0,05)	24,67 11,07	14,34 16,92	14,21 9,49	10,92 11,07	3,80 12,59	5,17 7,81
Коэффициент корреляции Спирмена p	0,15 0,126		-0,12 0,391		0,31 0,006	

Таким образом, характер роста в высоту сосны и березы на исследуемых вырубках различается. Для распределения по высотам у этих пород на вырубке №1 характерна существенная правосторонняя асимметрия, медианы значительно меньше средних значений, в распределении количественно преобладают особи с меньшей высотой. Косвенно это указывает на лучшие условия возобновления сосны и березы на вырубке №1, объясняющие появление в большом количестве молодых растений. Возможно, это определяется меньшими размерами вырубки, ее конфигурацией и близким расположением источников семян.

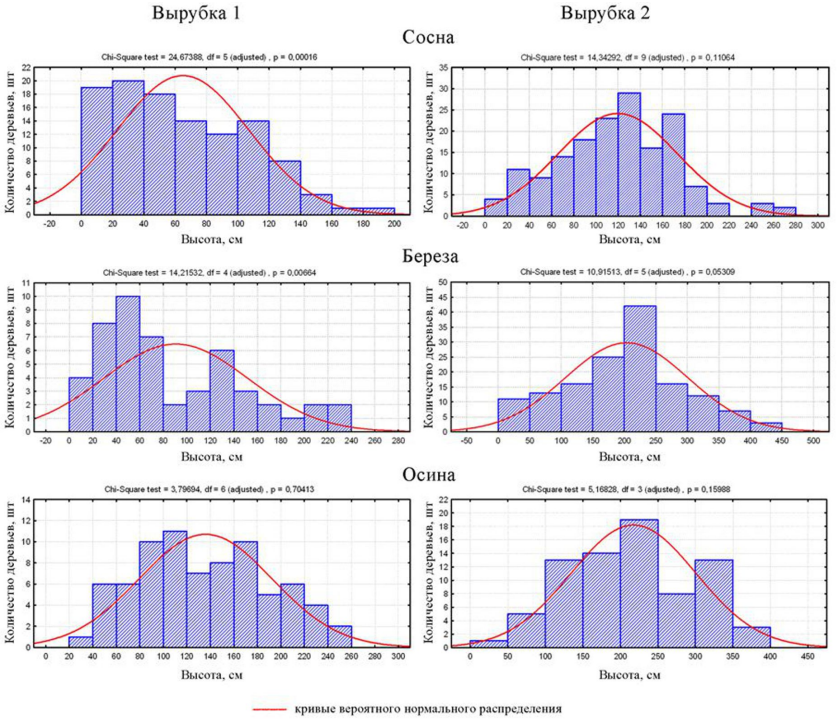


Рис. 12. Распределение по высоте основных лесообразующих пород на вырубках на шестой год после катастрофических нарушений

Fig. 12. Distribution of heights of the main forest-forming species in clearcut areas in the sixth year after catastrophic disturbances

Заключение. В условиях свежих суборей после катастрофических нарушений на начальных стадиях вторичных сукцессий происходит успешное возобновление сосны, березы и осины, которые входят в состав древостоев, примыкающих к вырубкам. По численности возобновления преобладает сосна обыкновенная. Вместе с тем сосна хорошо возобновляется на расстоянии до 60-70 м от источников обсеменения, а на большем удалении численность возобновления значительно снижается и становится равной нулю на расстоянии более 100 м. Численность возобновления осины заметно снижается на расстоянии более 100 м от стены леса, у березы этот показатель практически не изменяется на удалении до 150 м. Различный характер распределения возобновления по территории вырубок обусловлен особенностями строения и разлета семян.

Численность древесных и кустарниковых пород на шестой год после осуществления сплошной санитарной рубки на вырубке №1 составляет 26,0 тыс. шт./га. Численность древесных и кустарниковых пород на территории вырубки №2 составляет 29,2 тыс. шт./га. При этом долевое участие сосны обыкновенной на обеих вырубках составляет менее 40% от общего количества основных лесообразующих пород в переводе на крупный.

Средний возраст сосны обыкновенной на объектах исследования составляет на вырубке №1 – 3,6±0,1 года, а на вырубке №2 – 4,5±0,1 года. На вырубке №1 отмечается ежегодное увеличение приростов. На вырубке №2 прирост за последние два года (2022 и 2023) снижается относительно 2021 г. В целом на шестой год отмечается выравнивание ежегодных приростов сосны на вырубках в диапазоне 20-30 см. По результатам проведенного исследования установлено, что на шестой год после ветровала с последующей сплошной санитарной рубкой отсутствуют однолетние особи сосны обыкновенной.

Сосна значительно уступает лиственным породам, как древесным, так и кустарниковым, по скорости роста. На исследованных объектах на шестой год после вырубки высота сосны в 1,5–2 раза меньше высоты березы и осины. При естественном развитии в данных условиях сформируется насаждение с преобладанием лиственных пород, в котором сосна будет представлена единично. Вместе с тем значительное количество подроста сосны позволяет сформировать сосновое насаждение с помощью своевременно проведенных уходов.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Анненская Г.Н., *Жучкова В.К.*, *Калинина В.Р.*, *Мамай И.И.*, *Низовцев В.А.*, *Хрусталева М.А.*, *Цесельчук Ю.Н.* Ландшафты Московской области и их современное состояние. Смоленск: СГУ, 1997. 296 с.

Бабич Н.А., *Евдокимов И.В.*, *Неволин Н.Н.* Культуры сосны Вологодской области. Вологда, 2008. 136 с.

Беляева Н.В., *Грязькин А.В.*, *Ковалёв Н.В.*, *Фетисова А.А.*, *Кази И.А.* Сравнительная оценка структуры живого напочвенного покрова после рубок ухода и комплексного ухода за лесом в сосняках брусничных // Вестник Московского государственного университета леса. 2012. № 6. С. 194–200.

Беляева Н.В., *Данилов Д.А.*, *Кази И.А.* Особенности естественного возобновления ели европейской на постагрогенных землях // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2019. № 54. С. 6–10.

Бобровский М.В. Лесные почвы Европейской России: биотические и антропогенные факторы формирования. М.: КМК, 2010. 359 с.

Глазунов Ю.Б., *Коротков С.А.*, *Лежнев Д.В.*, *Титовец А.В.* Формирование сосняков сложных в Серебряноборском опытном лесничестве // Лесоведение. 2024а. № 6. С. 595-603. DOI: 10.31857/S0024114824060018.

Глазунов Ю.Б., *Полякова Г.А.*, *Коротков С.А.*, *Лежнев Д.В.* Естественное возобновление на вырубках в Серебряноборском опытном лесничестве // Сибирский лесной журнал. 2024б. № 2. С. 74–83.

Данилов Д.А., *Мандрыкин С.С.*, *Шестаков В.И.*, *Шестакова Т.А.* Возобновление ели и сосны на постагрогенных землях в Ленинградской области // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2018. № 8. С. 28–31.

Загреев В.В. Общесоюзные нормативы для таксации лесов. М.: Колос, 1992. 495 с.

Зарипов Ю.В., *Залесов С.В.*, *Залесова Е.С.*, *Попов А.С.*, *Платонов Е.П.*, *Стародубцева Н.И.* Подрост сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на отвалах месторождения хризотил-асбеста // ИВУЗ. Лесной журнал. 2021. № 5 (383). С. 22–33.

Исаев А.С., *Суховольский В.Г.*, *Бузыкин А.И.*, *Овчинникова Т.М.* Сукцессионные процессы в лесных сообществах: модели фазовых переходов // Хвойные бореальной зоны. 2008. Вып. XXV, № 1–2. С. 9–15.

Киселева В.В. Изменение состава и вертикальной структуры фитоценозов в культурах сосны в отсутствие лесохозяйственных мероприятий // Современные концепции экологии биосистем и их роль в решении проблем сохранения природы и природопользования: мат. Всерос. (с межд. уч.) науч. шк.-конф., посвящ. 115-летию со дня рождения А.А. Уранова. Пенза, 2016. С. 239–242.

Крышень А.М. Растительные сообщества вырубок Карелии. М., 2006. 264 с.

Кухта А.Е., *Максимова О.В.*, *Кузнецова В.В.* Воздействие климатических факторов на приросты сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на побережье Кандалакшского залива Белого моря // ИВУЗ. Лесной журнал. 2023. №. 4. С. 105-119.

Лежнев Д.В. Возобновление под пологом сосняков и на вырубках в ближайшем Подмосковье // Повышение эффективности лесного комплекса: мат. Восьмой Всерос. нац. науч.-практ. конф. с межд. уч. Петрозаводск, 2022. С. 95–97.

Лежнев Д.В., *Купченко К.М.* Восстановительная динамика сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) после ветровала на вырубках в Ближнем Подмосковье // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: мат. XXII Межд. науч.-тех. конф. Вологда, 2024. С. 316-321.

Лежнев Д.В., *Куликова Д.Д.*, *Полякова Г.А.* Восстановительная динамика сосновых фитоценозов на вырубках в надпойменных террасах реки Москвы // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2023. Т. 31, № 4. С. 447-467. DOI: 10.22363/2313-2310-2023-31-4-447-467.

Лукина Н. В., *Тихонова Е.В.*, *Шевченко Н.Е.*, *Горнов А.В.*, *Кузнецова А.И.*, *Гераськина А.П.*, *Смирнов В.Э.*, *Горнова М.В.*, *Ручинская Е.В.*, *Анищенко Л.Н.*,

Тебенькова Д.Н., *Данилова М.А.*, *Бахмет О.Н.*, *Крышень А.М.*, *Князева С.В.*, *Шашков М.П.*, *Быховец С.С.*, *Чертов О.Г.*, *Шанин В.Н.* Аккумуляция углерода в лесных почвах и сукцессионный статус лесов. М.: КМК, 2018. 232 с.

Махрова А.Г. Современные тенденции развития пригородной зоны Московской агломерации // Социально-экономическая география: история, теория, методы, практика 2021: сб. науч. ст. VII Всерос. науч. конф. с межд. уч. Смоленск, 2021. С. 346–351.

Мелехов И.С. О теоретических основах типологии вырубок // ИВУЗ. Лесной журнал. 1958. №1. С. 27–38.

Мелехов И.С. Рубки главного пользования. М.: Гослесбумиздат, 1962. 329 с.

Морозов Г.Ф. К вопросу о возобновлении сосны // Лесной журнал. 1900. Вып. 4. С. 222–276.

Огуреева Г.Н., *Булдакова Е.В.* Разнообразие лесов Клинско-Дмитровской гряды в связи с ландшафтной структурой территории // Лесоведение. 2006. № 1. С. 58–69.

Разнообразие и динамика лесных экосистем России: монография. Т. 1. М.: КМК, 2012. 460 с.

Рысин Л.П. Сукцессионные процессы в лесах центральной части Русской равнины // Успехи современной биологии. 2009. Т. 129, № 6. С. 578–587.

Рысин Л.П., *Савельева Л.И.* Сосновые леса России. М.: КМК, 2008. 288 с.

Смирнов А.А., *Богачев П.А.*, *Смирнов А.П.* Естественное возобновление на вырубках Карелии в связи с плодородием и увлажнением лесной почвы //Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020. Вып. 232. С. 20-32.

Сукачев В.Н. Основы лесной биогеоценологии. М.: Наука, 1964. 574 с.

Усольцев В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии: База данных и география = Forest biomass of Northern Eurasia: data base and geography / отв. ред. С.Г. Шиятов. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 708 с.

Целитан И.А., *Соколов В.А.*, *Данилин И.М.* Структура и рост насаждений, формирующихся на гарях и вырубках в Красноярском Приангарье // Сибирский лесной журнал. 2021. №. 4. С. 34-47.

Черненькова Т.В., *Пузаченко М.Ю.*, *Беляева Н.Г.*, *Котлов И.П.*, *Морозова О.В.* Характеристика и перспективы сохранения сосновых лесов Московской области // Лесоведение. 2019. № 5. С. 449–464. DOI: 10.1134/S0024114819050024.

Шиманюк А.П. Дендрология. М.: Лесн. пром-сть, 1974. 264 с.

Benavides R., *Rabasa S.G.*, *Granda E.*, *Escudero A.*, *Hódar J.A.*, *Martínez-Vilalta J.*, *Rincón A.M.*, *Zamora R.*, *Valladares F.* Direct and indirect effects of climate on demography and early growth of *Pinus sylvestris* at the rear edge: changing roles of biotic and abiotic factors // PLoS One. 2013. Vol. 8, no. 3. Art. no. e59824. DOI: 10.1371/journal.pone.0059824.

Bílek L., *Vacek Z.*, *Vacek S.*, *Bulušek D.*, *Linda R.*, *Král J.* Are clearcut borders an effective tool for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) natural regeneration? // Forest systems. 2018. Vol. 27, no. 2. Art. no. e010. DOI: 10.5424/fs/2018272-12408.

Galdina T., *Khazova E.* Adaptability of *Pinus sylvestris* L. to various environmental conditions // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 316, no. 1. Art. no. 012002.

Guignabert A. Etude des Processus de Régénération Naturelle du pin Maritime en Contexte de Dune Forestière Gérée: Influence de la Sylviculture, du Climat et des Interactions Biotiques: PhD Thesis. Bordeaux: Université de Bordeaux, 2018. 212 p.

Hannerz M., *Almqvist C.*, *Hörnfeldt R.* Timing of seed dispersal in *Pinus sylvestris* stands in central Sweden // Silva Fennica. 2002. Vol. 36, iss. 4. P. 757–765.

Korotkov S., *Stonozenko L.*, *Lezhnev D.*, *Eregina S.* Pine Plants Formation in the North-Eastern Moscow Region // II International Conference "Sustainable Development: Agriculture, Veterinary Medicine and Ecology" (VMAEE-II-2023). Karshi, 2023. Art. no. 20031.

Loarie S. R., *Duffy Ph. B.*, *Hamilton H.*, *Asner G. P.*, *Field Ch. B.*, *Ackerly D D.* The velocity of climate change // Nature. 2009. Vol. 46, no. 7276. P. 1052–1055.

Lof M., *Dey D.*, *Navarro R.*, *Jacobs D.* Mechanical site preparation for forest restoration // New Forests. 2012. № 5-6 (43). P. 825–848.

McCarthy N., *Scott Bentsen N.*, *Willoughby I.*, *Balandier P.* The state of forest vegetation management in Europe in the 21st century // Eur. J. Forest. Res. 2011. Vol. 130. P. 7–16.

Nilsson U., *Allen H.L.* Short- and long-term effects of site preparation, fertilization and vegetation control on growth and stand development of planted loblolly pine // Forest Ecology and Management. 2003. No. 1. P. 367–377.

Patacca M., *Lindner M.*, *Lucas-Borja M.E.*, *Cordonnier T.*, *Fidej G.*, *Gardiner B.*, *Hauf Y.*, *Jasinevičius G.*, *Labonne S.*, *Linkevičius E.*, *Mahnken M.*, *Milanovic S.*, *Nabuurs G.-J.*, *Nagel T.A.*, *Nikinmaa L.*, *Panyatov M.*, *Bercak R.*, *Seidl R.*, *Ostrogovič Sever M.Z.*, *Socha J.*, *Thom D.*, *Vuletic D.*, *Zudin S.*, *Schelhaas M.-J.* Significant increase in natural disturbance impacts on European forests since 1950 // Global Change Biology. 2023. Vol. 29, no. 5. P. 1359–1376.

Ribeiro S., *Cerveira A.*, *Soares P.*, *Fonseca T.* Natural regeneration of maritime pine: a review of the influencing factors and proposals for management // Forests. 2022. Vol. 13, no. 3. P. 386.

Ruano I., *Pando V.*, *Bravo F.* How do light and water influence *Pinus pinaster* Ait. germination and early seedling development? // For. Ecol. Manag. 2009. Vol. 258. P. 2647–2653.

Uutera J. Impact of Regeneration Method on Stand Structure Prior to First Thinning: Comparative study North Karelia, Finland vs. Republic of Carelia, Russian Federation // Silva Fennica. 1995. Vol. 29, no. 4. P. 267–285.

References

Annenskaya G.N., *Zhuchkova V.K.*, *Kalinina V.R.*, *Mamay I.I.*, *Nizovtsev V.A.*, *Khrustaleva M.A.*, *Tsesel'chuk Yu. N.* Landshafty Moskovskoy oblasti i ikh sovremennoe sostoyanie. Smolensk: SGU, 1997. 296 p. (In Russ.)

Babich N.A., *Evdokimov I.V.*, *Nevolin N.N.* Kul'tury sosny Vologodskoy oblasti. Vologda, 2008. 136 p. (In Russ.)

Belyaeva N.V., *Danilov D.A.*, *Kazi I.A.* Osobennosti estestvennogo vozobnovleniya eli evropeyskoy na postagrogennykh zemlyakh. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2019, no. 54, pp. 6–10. (In Russ.)

Belyaeva N.V., *Gryaz'kin A.V.*, *Kovalyov N.V.*, *Fetisova A.A.*, *Kazi I.A.* Sravnitel'naya otsenka struktury zhivogo napochvennogo pokrova posle rubok ukhoda i kompleksnogo ukhoda za lesom v sosnyakakh brusnichnykh. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa*, 2012, no. 6, pp. 194–200. (In Russ.)

Benavides R., *Rabasa S.G.*, *Granda E.*, *Escudero A.*, *Hódar J.A.*, *Martínez-Vilalta J.*, *Rincón A.M.*, *Zamora R.*, *Valladares F.* Direct and indirect effects of climate on demography and early growth of *Pinus sylvestris* at the rear edge: changing roles of biotic and abiotic factors. *PLoS One*, 2013, vol. 8, no. 3, art. no. e59824. DOI: 10.1371/journal.pone.0059824.

Bílek L., *Vacek Z.*, *Vacek S.*, *Bulušek D.*, *Linda R.*, *Král J.* Are clearcut borders an effective tool for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) natural regeneration? *Forest systems*, 2018, vol. 27, no. 2, art. no. e010. DOI: 10.5424/fs/2018272–12408.

Bobrovskiy M.V. Lesnye pochvy Evropeyskoy Rossii: bioticheskie i antropogennye faktory formirovaniya. Moskow: KMK, 2010. 359 p. (In Russ.)

Chernen'kova T.V., *Puzachenko M.Yu.*, *Belyaeva N.G.*, *Kotlov I.P.*, *Morozova O.V.* Kharakteristika i perspektivy sokhraneniya sosnovykh lesov Moskovskoy oblasti. *Lesovedenie*, 2019, no. 5, pp. 449-464. DOI: 10.1134/S0024114819050024. (In Russ.)

Danilov D.A., *Mandrykin S.S.*, *Shestakov V.I.*, *Shestakova T.A.* Vozobnovlenie eli i sosny na postagrogennykh zemlyakh v Leningradskoy oblasti. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2018, no. 8, pp. 28–31. (In Russ.)

Galdina T., *Khazova E.* Adaptability of *Pinus sylvestris* L. to various environmental conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 316, no. 1, art. no. 012002.

Glazunov Yu.B., *Korotkov S.A.*, *Lezhnev D.V*, *Titovets A.V.* Formation of complex pine forests in the Serebryanobor experimental forestry. *Forest Science*, 2024a, no. 6, pp. 595-603. DOI: 10.31857/S0024114824060018. (In Russ.)

Glazunov Yu.B., *Polyakova G.A.*, *Korotkov S.A.*, *Lezhnev D.V.* Estestvennoe vozobnovlenie na vyrubkakh v Serebryanoborskom opytnom lesnichestve. *Sibirskiy lesnoy zhurnal*, 2024b, no. 2, pp. 74–83. (In Russ.)

Guignabert A. Etude des Processus de Régénération Naturelle du pin Maritime en Contexte de Dune Forestière Gérée: Influence de la Sylviculture, du Climat et des Interactions Biotiques: PhD Thesis. Bordeaux: Université de Bordeaux, 2018. 212 p.

Hannerz M., *Almqvist C.*, *Hörnfeldt R.* Timing of seed dispersal in *Pinus sylvestris* stands in central Sweden. *Silva Fennica*, 2002, vol. 36, iss. 4, pp. 757–765.

Isaev A.S., *Sukhovol'skiy V.G.*, *Buzykin A.I.*, *Ovchinnikova T.M.* Suktsessionnye protsessy v lesnykh soobshhestvakh: modeli fazovykh perekhodov. *Khvoynye boreal'noy zony*, 2008, vol. XXV, no. 1–2, pp. 9–15. (In Russ.)

Kiseleva V.V. Izmenenie sostava i vertikal'noy struktury fitotsenozov v kul'turakh sosny v otsutstvie lesokhozyaystvennykh meropriyatiy. *Sovremennye kontseptsii ekologii biosistem i ikhh rol' v reshenii problem sokhraneniya prirody i prirodopol'zovaniya*: mat. Vseros. (s mezhd. uch.) nauch. shk.-konf., posv. 115-letiyu so dnya rozhdeniya A.A. Uranova. Penza, 2016, pp. 239–242. (In Russ.)

Korotkov S., *Stonozenko L.*, *Lezhnev D.*, *Eregina S.* Pine Plants Formation in the North-Eastern Moscow Region. II International Conference *"Sustainable Development: Agriculture*, *Veterinary Medicine and Ecology"* (VMAEE-II-2023). Karshi, 2023, art. no. 20031.

Kryshen' A.M. Rastitel'nye soobshchestva vyrubok Karelii. M., 2006. 264 p. (In Russ.)

Kukhta A.E., *Maksimova O.V.*, *Kuznetsova V.V.* Vozdeystvie klimaticheskikh faktorov na prirosty sosny obyknovennoy (*Pinus sylvestris* L.) na poberezh'e Kandalakshskogo zaliva Belogo moray. *IVUZ. Lesnoy zhurnal*, 2023, no. 4, pp. 105-119. (In Russ.)

Lezhnev D.V. Vozobnovlenie pod pologom sosnyakov i na vyrubkakh v blizhayshem Podmoskov'e. *Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa*: mat. Vos'moy Vseros. nats. nauch.-prakt. konf. s mezhd. uch. Petrozavodsk, 2022, pp. 95–97. (In Russ.)

Lezhnev D.V., *Kupchenko K.M.* Vosstanovitel'naya dinamika sosny obyknovennoy (*Pinus sylvestris* L.) posle vetrovala na vyrubkakh v Blizhnem Podmoskov'e. *Actual problems of forestry complex development*: mat. of the XXII Int. sci.-tech. conf. Vologda, 2024, pp. 316-321. (In Russ.)

Lezhnev D.V., *Kulikova D.D.*, *Polyakova G.A.* Vosstanovitel'naya dinamika sosnovykh fitotsenozov na vyrubkakh v nadpoymennykh terrasakh reki Moskvy. *Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series: Ecology and Life Safety*, 2023, vol. 31, no. 4, pp. 447-467. DOI: 10.22363/2313-2310-2023-31-4-447-467. (In Russ.)

Loarie S.R., *Duffy Ph.B.*, *Hamilton H.*, *Asner G.P.*, *Field Ch.B.*, *Ackerly D.D.* The velocity of climate change. *Nature*, 2009, vol. 462, no. 7276, pp. 1052–1055.

Lof M., *Dey D.*, *Navarro R.*, *Jacobs D.* Mechanical site preparation for forest restoration. *New Forests*, 2012, no. 5-6 (43), pp. 825–848.

Lukina N.V., *Tikhonova E.V.*, *Shevchenko N.E.*, *Gornov A.V.*, *Kuznetsova A.I.*, *Geras'kina A.P.*, *Smirnov V.E.*, *Gornova M.V.*, *Ruchinskaya E.V.*, *Anishchenko L.N.*, *Teben'kova D.N.*, *Danilova M.A.*, *Bakhmet O.N.*, *Kryshen' A.M.*, *Knyazeva S.V.*, *Shashkov M.P.*, *Bykhovets S.S.*, *Chertov O.G.*, *Shanin V.N.* Akkumulyatsiya ugleroda v lesnykh pochvakh i suktsessionny status lesov. Moskow: KMK, 2018. 232 p. (In Russ.)

Makhrova A.G. Sovremennye tendentsii razvitiya prigorodnoy zony Moskovskoy aglomeratsii. *Sotsial'no-ekonomicheskaya geografiya: istoriya*, *teoriya*, *metody*, *praktika 2021*: sb. nauch. st. VII Vseros. nauch. konf. s mezhd. uch. Smolensk, 2021, pp. 346–351. (In Russ.)

McCarthy N., *Scott Bentsen N.*, *Willoughby I.*, *Balandier P.* The state of forest vegetation management in Europe in the 21st century. *Eur. J. Forest Rep*., 2011, vol. 130, pp. 7–16.

Melekhov I.S. O teoreticheskikh osnovakh tipologii vyrubok. *IVUZ. Lesnoy zhurnal*, 1958, no. 1, pp. 27–38. (In Russ.)

Melekhov I. S. Rubki glavnogo pol'zovaniya. Moscow: Goslesbumizdat, 1962. 329 p.

Morozov G.F. K voprosu o vozobnovlenii sosny. Lesnoy zhurnal, 1900, iss. 4, pp. 222–276. (In Russ.)

Nilsson U., *Allen H.L.* Short- and long-term effects of site preparation, fertilization and vegetation control on growth and stand development of planted loblolly pine. *Forest Ecology and Management*, 2003, no. 1, pp. 367–377.

Ogureeva G.N., *Buldakova E.V.* Raznoobrazie lesov Klinsko-Dmitrovskoy gryady v svyazi s landshaftnoy strukturoy territorii. *Lesovedenie*, 2006, no. 1, pp. 58–69. (In Russ.)

Patacca M., *Lindner M.*, *Lucas-Borja M.E.*, *Cordonnier T.*, *Fidej G.*, *Gardiner B.*, *Hauf Y.*, *Jasinevičius G.*, *Labonne S.*, *Linkevičius E.*, *Mahnken M.*, *Milanovic S.*, *Nabuurs G.-J.*, *Nagel T.A.*, *Nikinmaa L.*, *Panyatov M.*, *Bercak R.*, *Seidl R.*, *Ostrogovič Sever M.Z.*, *Socha J.*, *Thom D.*, *Vuletic D.*, *Zudin S.*, *Schelhaas M.-J.* Significant increase in natural disturbance impacts on European forests since 1950. *Global Change Biology*, 2023, vol. 29, no. 5, pp. 1359–1376.

Raznoobrazie i dinamika lesnykh ekosistem Rossii [monografiya]. Vol. 1. Moscow: KMK, 2012. 460 p. (In Russ.)

Ribeiro S., *Cerveira A.*, *Soares P.*, *Fonseca T.* Natural regeneration of maritime pine: a review of the influencing factors and proposals for management. *Forests*, 2022, vol. 13, no. 3, p. 386.

Ruano I., *Pando V.*, *Bravo F.* How do light and water influence *Pinus pinaster* Ait. germination and early seedling development? *For. Ecol. Manag*., 2009, vol. 258, pp. 2647–2653.

Rysin L.P. Suktsessionnye protsessy v lesakh tsentral'noy chasti Russkoy ravniny. *Uspekhi sovremennoy biologii*, 2009, vol. 129, no. 6, pp. 578–587. (In Russ.)

Rysin L.P., *Savelyeva L.I.* Sosnovye lesa Rossii. Moscow: KMK, 2008. 288 p. (In Russ.)

Shimanyuk A.P. Dendrologiya. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1974. 264 p. (In Russ.)

Smirnov A.A., *Bogachev P.A.*, *Smirnov A.P.* Estestvennoe vozobnovlenie na vyrubkakh Karelii v svyazi s plodorodiem i uvlazhneniem lesnoy pochvy. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2020, iss. 232, pp. 20-32. (In Russ.)

Sukachev V.N. Osnovy lesnoy biogeotsenologii. Moscow: Nauka, 1964. 574 p. (In Russ.)

Tselitan I.A., *Sokolov V.A.*, *Danilin I.M.* Struktura i rost nasazhdeniy, formiruyushchikhsya na garyakh i vyrubkakh v Krasnoyarskom Priangar'e. *Sibirskiy lesnoy zhurnal*, 2021, no. 4, pp. 34-47. (In Russ.)

Usol'tsev V.A. Forest biomass of Northern Eurasia: data base and geography / resp. ed. S.G. Shiyatov. Yekaterinburg: UrO RAN, 2001. 708 p. (In Russ.)

Uutera J. Impact of Regeneration Method on Stand Structure Prior to First Thinning: Comparative study North Karelia, Finland vs. Republic of Carelia, Russian Federation. *Silva Fennica*, 1995, vol. 29, no. 4, pp. 267–285.

Zagreev V.V. Obshchesoyuznye normativy dlya taksatsii lesov. Moscow: Kolos, 1992. 495 p. (In Russ.)

Zaripov Yu.V., *Zalesov S.V.*, *Zalesova E.S.*, *Popov A.S.*, *Platonov E.P.*, *Starodubtseva N.I.* Podrost sosny obyknovennoy (*Pinus sylvestris* L.) na otvalakh mestorozhdeniya khrizotil-asbesta. *IVUZ. Lesnoy zhurnal*, 2021, no. 5 (383), pp. 22–33. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 11.12.2024

Лежнев Д.В., Глазунов Ю.Б., Коротков С.А., Титовец А.В. Вторичные сукцессии после сплошной санитарной рубки сосняков в ближнем Подмосковье // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 115–140. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.115-140

Структура лесных сообществ, формирующихся после катастрофических нарушений, определяется характером протекающих сукцессий. Особенности восстановительных сукцессий лесных фитоценозов после катастрофических нарушений в значительной степени определяются их начальной стадией. Увеличение количества различных катастрофических нарушений в Московской области обуславливает актуальность исследований, направленных на изучение особенностей лесовосстановительных процессов на вырубках. Целью исследования являлось изучение восстановительных процессов древесной и кустарниковой растительности на начальных стадиях демутации после катастрофических нарушений в сосновых насаждениях ближнего Подмосковья. Представлены результаты четырехлетнего изучения вторичных сукцессий на сплошных вырубках после ветровала 2017 г. в сосновых насаждениях на территории Серебряноборского опытного лесничества Московской области. При учете естественного возобновления на исследуемых вырубках было заложено 46 круговых учетных площадок по 10 м^2 каждая. На вырубке №1 заложено 22 учетных площадки, на вырубке №2 – 24 площадки. В перечет включали только жизнеспособный подрост с подразделением его по категориям крупности. У каждого экземпляра сосны измерялись годичные приросты осевого побега в высоту по мутовкам. Рассмотрена динамика основных лесообразующих пород за период 2020–2023 гг. На шестой год после ветровала долевое участие сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) не превышает 30% от общей численности древесно-кустарниковой растительности. Численность древесных и кустарниковых пород на шестой год после осуществления сплошной санитарной рубки на вырубке №1 составляет 26,0 тыс.

шт./га, на территории вырубки №2 – 29,2 тыс. шт./га. Средний возраст сосны обыкновенной на вырубке №1 – 3,6±0,1 года, на вырубке №2 – 4,5±0,1 года. Сосна хорошо возобновляется на расстоянии до 60-70 м от источников обсеменения. Проведенные исследования показывают, что в типе лесорастительных условий B_2 на начальных стадиях вторичных сукцессий после катастрофических нарушений количество естественного возобновления сосны удовлетворительное, однако данная порода значительно уступает по средней высоте мелколиственным породам, что препятствует успешному формированию сосновых насаждений на изучаемой территории.

Ключевые слова: *Pinus sylvestris* L., *Betula pendula* Roth, *Populus tremula* L., вырубка, восстановительная динамика, сукцессии, Серебряноборское опытное лесничество, Московская область.

Lezhnev D.V., Glazunov Yu.B., Korotkov S.A., Titovets A.V. Secondary successions after catastrophic disturbances in the pine stands of the near Moscow region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 115–140 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.115-140

The structure of forest communities formed after catastrophic disturbances is determined by the nature of ongoing successions. The characteristics of forest phytocenoses recovery successions after catastrophic disturbances are largely determined by their initial stage. The increase in the number of various catastrophic disturbances determines the relevance of research aimed at studying the characteristics of forest restoration processes in clear cut areas in the Moscow region. The aim of the study was to examine the recovery processes of tree and shrub vegetation at the initial stages of demutation after catastrophic disturbances in pine stands in the near Moscow region. The article presents the results of a four-year study of secondary successions in clear cut areas after the 2017 windfall in pine stands on the territory of the Serebryanoborsky Experimental Forestry of the Moscow region. Taking into account natural regeneration, 46 circular survey plots of 10 m^2 each were laid out in the studied clear cut areas. There are 22 counting plots in felling area no. 1 and 24 plots in felling area no. 2. Only viable undergrowth was counted, divided into size categories. For each pine specimen, annual increments of the axial shoot in height were measured by whorls. The dynamics of the main forest-forming species for the period 2020–2023 are considered. In the sixth year after the windthrow, the share of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) does not exceed 30% of the total number of trees and shrubs. The number of trees and shrubs in the sixth year after clear sanitary felling in clear cut area no. 1 is 26.0 thousand pcs/ha, in the territory of clear cut area no. 2 – 29.2 thousand pcs/ha. The average age of the main species in clear cut area no. 1 is 3.6±0.1 years, and in clear cut area no. 2 – 4.5±0.1 years. Pine regenerates well at a distance of up to 60–70 m from the sources of seeding. The conducted studies show that in the type of forest growth conditions B_2 at the initial stages of secondary successions after

catastrophic disturbances, the amount of natural pine regeneration is satisfactory, however, this species is significantly inferior in average height to small-leaved species, which complicates the successful formation of pine stands in the studied area.

Keywords: *Pinus sylvestris* L., *Betula pendula Roth*, *Populus tremula* L., clear cut area, restoration dynamics, successions, Serebryanoborskoe Experimental Forestry, Moscow region.

ЛЕЖНЕВ Даниил Викторович – младший научный сотрудник лаборатории лесоводства и биологической продуктивности Института лесоведения РАН. SPIN-код: 5133-7760. ORCID: 0000-0003-2706-7320.

143030, ул. Советская, д. 21, с. Успенское, Московская область, Россия. E-mail: lezhnev.daniil@yandex.ru

LEZHNEV Daniil V. – Junior Research Assistant, Laboratory of Forestry and Biological Productivity, Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences. SPIN-code: 5133-7760. ORCID: 0000-0003-2706-7320.

143030. Sovetskaya str. 21. Uspenskoe. Moscow region. Russia. E-mail: lezhnev.daniil@yandex.ru

ГЛАЗУНОВ Юрий Борисович –ведущий научный сотрудник, заведующий лаборатории лесоводства и биологической продуктивности Института лесоведения РАН, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 8531-6453. ORCID: 0000-0001-9427-9740.

143030, ул. Советская, д. 21, с. Успенское, Московская область, Россия. E-mail: yu.b.glazunov@mail.ru

GLAZUNOV Yuriy B. – PhD (Agricultural), Leading Researcher, Head of the Laboratory of Forestry and Biological Productivity of the Institute of Forestry of the Russian Academy of Sciences. SPIN-code: 8531-6453. ORCID: 0000-0001-9427-9740.

143030. Sovetskaya str. 21. Uspenskoe. Moscow region. Russia. E mail: yu.b.glazunov@mail.ru

КОРОТКОВ Сергей Александрович – доцент кафедры лесоводства, экологии и защиты леса Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал); старший научный сотрудник лаборатории лесоводства и биологической продуктивности Института лесоведения РАН, кандидат биологических наук. SPIN-код: 1514-9516. ORCID: 0000-0003-2754-6014.

141005, 1-я Институтская ул., д. 1, г. Мытищи, Московская область, Россия. E-mail: skorotkov-71@mail.ru

KOROTKOV Sergey A. – PhD (Biological), Associate Professor of the department of Forestry, Ecology, Forest Protection, Bauman Moscow State Technical University (Mytishchi branch); Senior Researcher, Laboratory of Forestry and Biological Productivity, Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences. SPIN-code: 1514-9516. ORCID: 0000-0003-2754-6014.

141005. 1st Institutskaya str. 1. Mytischi. Moscow region. Russia. E-mail: skorotkov-71@mail.ru

ТИТОВЕЦ Анастасия Васильевна – научный сотрудник лаборатории лесной геоботаники и лесного почвоведения Института лесоведения РАН, кандидат биологических наук. SPIN-код: 6861-0016. ORCID: 0000-0002-6078-5853.

143030, ул. Советская, д. 21, с. Успенское, Московская область, Россия. E-mail: titovets@ilan.ras.ru

TITOVETS Anastasia V. – PhD (Biological), Researcher at the Laboratory of Forest Geobotany and Forest Soil Science of the Institute of Forestry of the Russian Academy of Sciences. SPIN-code: 6861-0016. ORCID: 0000-0002-6078-5853.

143030. Sovetskaya str. 21. Uspenskoe. Moscow region. Russia. E-mail: titovets@ilan.ras.ru

УДК 630.24: 630.231.1

А.Е. Осипенко, К.А. Башегуров, Р.А. Осипенко, С.В. Залесов

ЕСТЕСТВЕННОЕ ВОЗОБНОВЛЕНИЕ В СОСНЯКАХ НОВИЧИХИНСКОГО ЛЕСНИЧЕСТВА АЛТАЙСКОГО КРАЯ ПОСЛЕ РУБОК ОБНОВЛЕНИЯ

Введение. В ленточных борах Алтайского края сосняки преимущественно разновозрастные [Осипенко, Залесов, 2023], что обусловлено зонально-типологическими условиями, а также характером пирогенного и антропогенного воздействия на них [Кутявин и др., 2021; Lundqvist et al., 2019]. При этом деление деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на поколения по размеру весьма условно, поскольку угнетенные старые деревья могут быть ниже и тоньше молодых, выросших в благоприятных условиях [Осипенко и др., 2020].

Выборочная система рубок, принятая в ленточных борах, частично способствует омоложению сосновых насаждений и усиливает дифференциацию их структуры [Дебков и др., 2017; Szmyt, 2025]. Однако при выборочных рубках возможна отрицательная селекция: вырубаются крупные и быстрорастущие деревья, а медленнорастущие и угнетенные оставляются «на доращивание», что дает последним больше шансов на оставление потомства [Tikhonova et al., 2021; Huang et al., 2023].

При правильном применении рубки обновления могут быть более эффективны, чем добровольно- и группово-выборочные рубки, для омоложения насаждений и естественного возобновления сосны [Годовалов и др., 2009; Луферов, 2020]. Однако для того, чтобы рубки обновления были эффективны, необходимо учитывать зонально-типологические особенности лесов, их целевое назначение и состояние [Иванов, Семенякин, 2021; Прищепов, Рожков, 2024].

Несмотря на накопленный опыт применения рубок обновления [Ключников, Парамонов, 2003; Залесов и др., 2014; Желдак и др., 2022], результаты нередко оказываются неудовлетворительными из-за отклонений от технологии или отсутствия должного планирования [Лабоха и др., 2021].

В ленточных борах Алтайского края рубки обновления широко применялись с 1995 по 2008 гг. [Маленко и др., 2012; Желдак и др., 2022], но

затем были фактически прекращены из-за отсутствия четких критериев их проведения. В 2017 г., после принятия актуальных на тот момент Правил ухода за лесами (Приказ Минприроды России от 22.11.2017 г. № 626), возможность применения рубок обновления в защитных лесах была восстановлена [Мартынюк и др., 2019]. Таким образом, с учетом истории применения и существующих проблем, связанных с реализацией рубок обновления в ленточных борах, становится актуальной задача анализа их эффективности с точки зрения формирования молодого поколения леса.

Цель работы – оценить эффективность рубок обновления с точки зрения формирования молодого поколения леса в сосновых насаждениях ленточных боров Алтайского края.

Материалы и методика исследования. Полевые исследования проведены в сентябре 2024 г. на территории Новичихинского лесничества Алтайского края, относящегося к Алтае-Новосибирскому району лесостепей и ленточных боров (Приказ Минприроды РФ от 18.08.2014 № 367).

Объектами исследования являются естественные сосновые насаждения типов леса: сухой бор пологих всхолмлений (СБП), свежий бор (СВБ) и травяной бор (ТРБ), пройденные рубками обновления (ОБН) в 2003-2005 гг. На пробных площадях (ПП) Н9 и Н16 также была проведена групповыборочная рубка (ГВР). Рубки проводились по беспасечной технологии с использованием бензопил и тракторов типа МТЗ-82. Порубочные остатки сжигались в пожаробезопасный период [Залесов и др., 2023].

Рубки различной интенсивности (табл. 1) в исследуемых сосняках проводились путем равномерного изреживания старших поколений деревьев. На ПП Н9 и Н10 осуществлялся заключительный прием обновления.

На пробных площадях размером 0,25–0,30 га был выполнен сплошной перечет деревьев диаметром от 4 см с определением высот у части экземпляров. Подрост (деревья диаметром < 4 см) и подлесок учитывались на площадках размером 4 м^2 (по 20 шт. на каждой ПП), заложенных по диагоналям. Изучение компонентов насаждения осуществлялось с использованием общеизвестных методик [Бунькова и др., 2020].

На большинстве ПП для оценки текущих приростов по высоте и диаметрам было измерено по 30 экземпляров подроста и по 10 модельных деревьев. Замеры диаметров проводились у основания ствола и на высоте 1,3 м. На ПП Н17 измерения не проводились из-за недостаточного количества подроста. Характеристика древостоев и подроста до рубки (табл. 2, 3) приведена по материалам лесоустройства 2003 г.

Таблица 1

Местонахождение лесных участков и характеристика рубок

Location of forest plots and characteristics of felling

№ ПП	Координаты GPS, с.ш. / в.д.	Участковое лесничество	№ квартала	№ выдела	Площадь выдела, га	Характеристика рубки		
						Вид	Год	Интенсивность, %
Н9	52°10.142′ 81°18.392′	Новичихинское	22	33	8,1	ОБН	2004	45
						ГВР	2012	10
Н10	52°10.363′ 81°16.840′	Новичихинское	6	21	6,5	ОБН	2004	60
Н15	52°09.228′ 81°09.114′	Мельниковское	31	11	4,3	ОБН	2005	50
Н16	52°10.757′ 81°12.040′	Мельниковское	44	19	11,0	ОБН	2005	50
						ГВР	2021	25
Н17	52°10.870′ 81°17.978′	Новичихинское	8	49	2,7	ОБН	2003	30

Таблица 2

Таксационная характеристика древостоев до рубки

Taxation characteristics of stands before felling

№ ПП	Тип леса	Класс бонитета	Ярус	Состав	Элемент леса	Средние			Относительная полнота	Запас, $м^3$/га
						Возраст, лет	Высота, м	Диаметр, см		
Н9	СБП	IV	1	6С4С	6С	145	21	36	0,3	100
					4С	95	20	28		
			2	6С4С	6С	55	16	14	0,6	120
					4С	30	10	10		
Н10	СВБ	III	1	7С3С	7С	140	23	40	0,4	150
					3С	105	22	30		
			2	7С3С	7С	45	16	16	0,5	100
					3С	25	10	8		
Н15	СБП	III	1	7С3С	7С	120	23	32	0,6	215
					3С	55	16	16		
Н16	СВБ	III	1	7С2С1С	7С	120	23	32	0,7	230
					2С	70	18	18		
					1С	45	11	12		
Н17	ТРБ	II	1	9С1Б	9С	105	27	36	0,9	380
					1Б	45	17	16		

Таблица 3

Характеристика подроста до рубки

Characteristics of undergrowth before felling

№ ПП	Состав	Возраст, лет	Высота, м	Густота, тыс. шт./га
Н9	10С	10	1,0	4,0
Н10	10С	15	2,0	5,0
Н15	10С	10	1,5	7,0
Н16	10С	10	1,5	6,0
Н17	10С	20	1,5	1,5

Средние значения диаметров и высот элементов леса рассчитывались по стандартным методикам. Возраст деревьев уточнялся по мутовкам и древесным кернам. Запас древесины, относительная полнота, а также бонитет определялись по общеизвестным таблицам и шкалам [Загреев и др., 1992; Третьяков и др., 1952].

Для статистической оценки различий использован *H*-критерий Краскела–Уоллиса. Обработка данных проводилась в Excel-2013 и Statistica 8.

Результаты исследования. Таксационная характеристика древостоев спустя 19-21 год после рубок обновления представлена в табл. 4.

После рубки обновления на четырех из пяти участков зафиксировано изменение класса бонитета. Понижение бонитета на ПП Н10 связано с тем, что молодняк сформировался из подроста, который более 10 лет развивался под пологом материнских деревьев. Переоценка бонитета на ПП Н15 по сравнению с материалами лесоустройства 2003 г., по-видимому, обусловлена занижением среднего возраста древостоя. Повышение бонитета на ПП Н9 и Н17, вероятно, связано с изъятием во время рубок угнетенных и больных деревьев [Рогозин, Разин, 2015].

На ПП Н9 в рамках рубки обновления планировалось полное удаление первого яруса (средний возраст элементов леса 95 и 145 лет в 2003 г.). Однако даже после проведения дополнительной группово-выборочной рубки через 8 лет полностью реализовать это не удалось.

На ПП Н10, где также планировалось удаление первого яруса, интенсивность рубки была на 15% выше, что позволило за один прием преобразовать двухъярусное насаждение в молодняк, хотя в составе древостоя остались единичные, преимущественно угнетенные, деревья старшего поколения. С точки зрения возобновления леса на ПП Н10 получены наилучшие результаты.

Таблица 4

Таксационная характеристика древостоев в 2024 г.

Taxation characteristics of stands in 2024

№ ПП	Класс бонитета	Состав	Элемент леса	Средние			Густота, шт./га	Полнота		Запас, $м^3$/га
				Возраст, лет	Высота, м	Диаметр, см		Абсолютная, $м^2$/га	Относительная	
Н9	III	9С1С+С	9С	121	23,6	31,1	198	15,1	0,41	153
			1С	91	15,3	16,5	127	2,7	0,09	23
			+С	22	5,1	5,0	234	0,5	0,03	2
Итого:							559	18,3	0,53	178
Н10	IV	10С ед.С	10С	31	6,3	6,3	2160	6,7	0,39	29
			ед.С	98	19,8	29,2	52	3,5	0,10	34
Итого:							2212	10,2	0,49	63
Н15	IV	6С2С2С	6С	150	21,1	36,5	86	8,9	0,27	95
			2С	111	15,0	17,9	165	4,2	0,15	34
			2С	28	6,8	6,2	1880	5,7	0,29	25
Итого:							2131	18,8	0,71	154
Н16	III	9С1С	9С	132	23,3	33,9	123	11,2	0,30	122
			1С	38	6,5	5,9	723	2,0	0,10	8
Итого:							846	13,2	0,40	130
Н17	I	8С2Б	8С	103	28,6	39,6	162	19,9	0,43	264
			2Б	50	15,8	14,6	408	6,8	0,21	56
Итого:							570	26,7	0,64	320

На ПП Н15 и Н16, где проводился первый прием рубки обновления, сформировались полноценные молодые поколения, вошедшие в состав древостоя. Дополнительно после рубок появился новый подрост, однако его жизнеспособность невысока – преобладают особи мелкой и средней категорий (табл. 5). Это свидетельствует о затенении подроста последующей генерации как материнским пологом, так и подростом предварительной генерации.

На ПП Н17 рубка обновления в комплексе с минерализацией поверхности почвы (в качестве меры содействия естественному возобновлению) не дали положительного эффекта. Количество подроста сосны сократилось, в составе насаждения увеличилась доля березы. Это согласуется с результатами работ [Малиновских, 2020, 2024; Желдак и др., 2022; Залесов и др., 2023], где отмечено, что в условиях типа леса «травяной бор» при снижении полноты происходит разрастание подлеска и живого напочвенного покрова.

Таблица 5

Характеристика подроста, всходов и подлеска в 2024 г.

Undergrowth, seedling, and underwood characteristics in 2024

Показатель		№ ПП				
		Н9	Н10	Н15	Н16	Н17
Состав подлеска		–	10АЖ	–	–	10АЖ
Густота подлеска, тыс. шт./га		0	0,3	0	0	5,5
Высота подлеска, м		–	0,9	–	–	1,7
Густота всходов, тыс. шт./га		1,6	0	0	3,0	0
Состав подроста		10С	10С	10С	10С+Б	5Б3Ос2С
Мелкий подрост						
Густота, тыс. шт./га	Жизнеспособный	0,4	0,6	0,1	0,1	0
	Сомнительный	1,4	0	0	0,3	0
	Нежизнеспособный	2,1	0,1	0,3	0,9	0
Встречаемость, %		35	25	10	20	0
Возраст, лет		5	5	5	7	–
Диаметр основания ствола, см		0,4	0,9	0,4	0,8	–
Диаметр кроны, см		12,4	25,3	12,7	23,7	–
Средний подрост						
Густота, тыс. шт./га	Жизнеспособный	2,3	0,1	0,1	1,8	0
	Сомнительный	1,1	0,1	0,9	0,5	0
	Нежизнеспособный	5,1	1,3	3,6	4,5	0
Встречаемость, %		75	35	80	70	0
Возраст, лет		15	22	14	15	–
Диаметр основания ствола, см		1,8	1,6	1,2	1,8	–
Диаметр ствола, на высоте 1,3 м, см		0,3	0,6	0,5	0,7	–
Диаметр кроны, см		57,9	45,1	41,1	59,6	–
Крупный подрост						
Густота, тыс. шт./га	Жизнеспособный	6,8	1,4	6,3	5,4	0,5
	Сомнительный	0,9	0	1,6	2,9	0
	Нежизнеспособный	1,5	2,8	1,6	1,4	0,8
Встречаемость, %		60	55	90	50	20
Возраст, лет		20	29	25	21	30
Диаметр основания ствола, см		3,6	3,9	3,6	4,1	–
Диаметр ствола, на высоте 1,3 м, см		1,6	1,9	1,8	2,4	–
Диаметр кроны, см		94,9	86,7	102,1	110,9	–
В пересчете на крупный жизнеспособный подрост						
Густота, тыс. шт./га		10,0	1,8	7,8	8,5	0,5
Встречаемость, %		90	45	85	60	5
Возраст, лет		16	25	21	17	30

Густота жизнеспособного подроста, пересчитанная на категорию крупного, варьирует в пределах от 0,5 до 10,0 тыс. шт./га. Жизнеспособный подрост на исследуемых участках относится преимущественно к категории крупного. Наибольшие диаметры стволов и крон подроста наблюдаются на ПП Н16, что объясняется низкой относительной полнотой древостоя. Относительно небольшое количество подроста на ПП Н10, вероятно, является следствием высокой густоты сформированного молодняка и куртинным характером расположения деревьев в нем.

На рис. 1 представлены данные о текущих приростах по высоте для модельных деревьев, а также для подроста различных категорий за период с 2000 по 2024 гг.

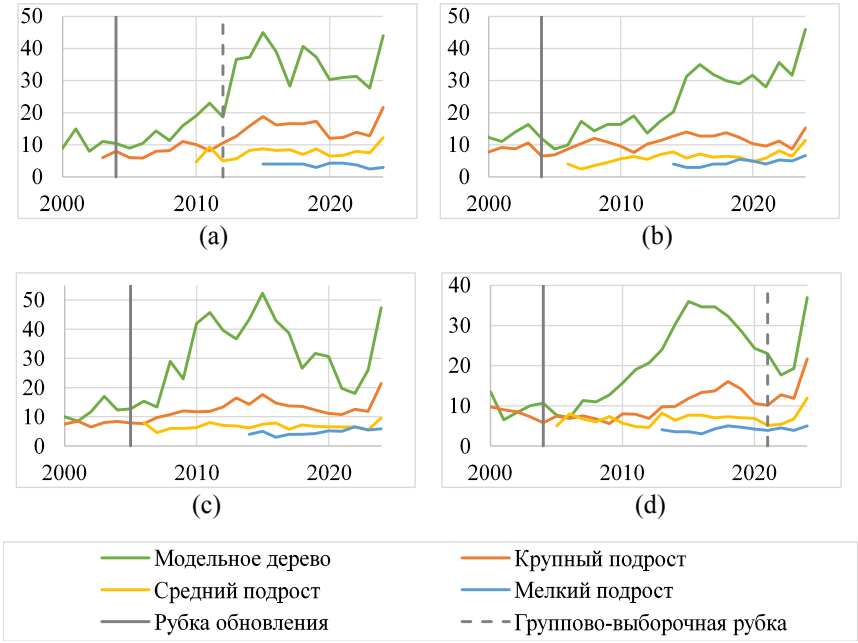


Рис. 1. Текущие приросты по высоте (см) модельных деревьев и подроста сосны за период с 2000 по 2024 гг. на участках: (a) – Н9, (b) – Н10, (c) – Н15, (d) – Н16

Fig. 1. Current height increases (in cm) of model trees and pine undergrowth for the period from 2000 to 2024 on the plots: a – H9, b – H10, c – H15, d – H16

Реакция подроста на рубку обновления выражалась в увеличении приростов по высоте через 2–3 года после вмешательства. Более крупные эк-

земпляры характеризовались наиболее интенсивным приростом. Пик прироста приходится на 2015–2018 гг., после чего наблюдается спад, вероятно, вызванный усилением внутривидовой конкуренции за ресурсы, усугубленной засушливыми условиями в мае (рис. 2). В 2024 г. при благоприятном сочетании осадков и температуры прирост вновь увеличился.

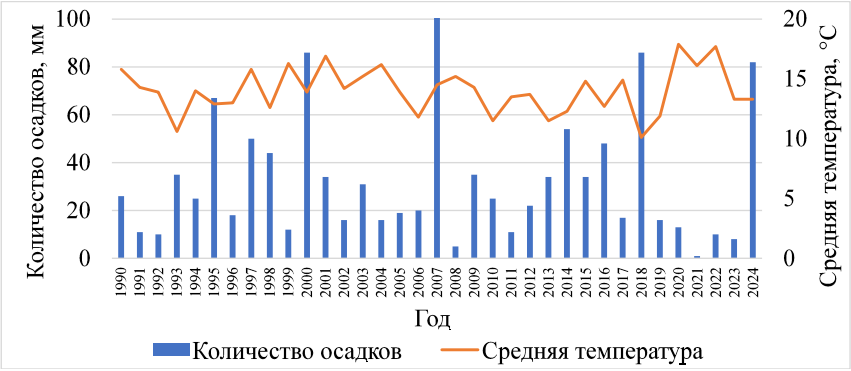


Рис. 2. Количество осадков и средняя температура воздуха в мае за период с 1990 по 2024 гг. (по данным метеостанции в г. Рубцовск)

Fig. 2. Precipitation and average air temperature in May for the period from 1990 to 2024 (according to the weather station in Rubtsovsk)

У подроста последующей генерации (категории мелкий и средний) прирост, за исключением 2024 г., не превышал 10 см в год. Следовательно, достижение средней высоты 1 м требует порядка 15 лет. Основной вклад в формирование древостоя вносит подрост предварительной генерации: от 33 до 74% жизнеспособных экземпляров относятся к категории крупного.

Применение *H*-критерия Краскела-Уоллиса для установления различий по величине текущих приростов подроста и модельных деревьев на исследуемых участках дало следующие результаты: для мелкого подроста различия в ходе роста при уровне значимости 0,05 не существенны (*H*-критерий расчетный – 5,73, *p*-значение – 0,125); для среднего подроста различия существенны (*H*-критерий расчетный – 9,62, *p*-значение – 0,022); для крупного подроста различия не существенны (*H*-критерий расчетный – 5,11, *p*-значение – 0,164); для модельных деревьев результат не значим (*H*-критерий расчетный – 5,74, *p*-значение – 0,125).

На всех участках зафиксированы валежные деревья (табл. 6). Среди погибших деревьев младших поколений преобладают экземпляры, постра-

давшие от механических повреждений и самоизреживания. Валежные деревья старших поколений представлены преимущественно ветровалом, причем как старым, так и свежим.

Таблица 6

Количество и запас валежных деревьев

Number and stock of fallen trees

№ ПП	Валежные деревья младших поколений		Валежные деревья старших поколений	
	Количество, шт./га	Запас, м^3/га	Количество, шт./га	Запас, м^3/га
Н9	152	0,7	4	4,2
Н10	280	0,3	8	3,6
Н15	264	1,1	10	4,4
Н16	100	1,7	17	16,7
Н17	0	0	12	31,0

Отпад деревьев старшего поколения варьирует от 2,3 до 11,4% запаса древостоев, что сопоставимо с выборочной рубкой очень слабой и слабой интенсивности. Наиболее существенный вывал деревьев зафиксирован на ПП Н16 и Н17. Учитывая типы леса на этих участках (СВБ и ТРБ), отпад может оказывать существенное влияние на восстановительные процессы.

В условиях типов леса СВБ и СБП возобновление сосны происходит успешнее, чем в типе леса ТРБ, что подтверждается результатами исследований [Осипенко, Залесов, 2024]. Для улучшения возобновления в травяных борах могут быть перспективны чересполосные постепенные рубки [Залесов и др., 2023] с последующим созданием культур и агротехническими уходами или содействием естественному возобновлению [Годовалов и др., 2009; Семенякин, Тихонова, 2024].

При полноте древостоя 0,3–0,5 формирование нового поколения сосны в ленточных борах возможно, однако даже при относительной полноте 0,3–0,4 рост подроста и молодняка замедлен. На открытых участках в районе исследований сосна достигает к 20 годам 3,0–6,5 м [Швиденко и др., 2008], тогда как под пологом – в среднем 1,7 м.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку методик оценки экологических функций ленточных боров и изучение влияния лесохозяйственных мероприятий на насаждения различных типов леса с целью создания устойчивой системы ведения хозяйства [Желдак и др., 2022; Banaś et al., 2018].

Выводы:

1. В условиях типов леса «свежий бор» и «сухой бор пологих всхолмлений» рубки обновления позволили омолодить сосновые насаждения и накопить в них достаточное количество подроста для успешного возобновления леса. В условиях травяного бора рубка обновления негативно отразилась на подросте и древостое;

2. Подрост сосны после рубок обновления в условиях типов леса «свежий бор» и «сухой бор пологих всхолмлений» имеет схожую динамику роста в высоту, а также по диаметру стволов и крон. После рубки обновления текущие приросты подроста предварительной генерации увеличиваются в течение 10-14 лет, после чего начинают уменьшаться;

3. Формирование нового поколения сосны происходит преимущественно за счет подроста предварительной генерации. Подрост последующей генерации принимает в этом процессе незначительное участие, так как угнетается более крупным подростом и деревьями старшего возраста;

4. Для завершения смены поколений и предотвращения отпада деревьев на участках Н9, Н15 и Н16 рекомендуется осуществить заключительный прием рубки обновления. На участке Н10 следует провести рубку единичных деревьев и уход за молодняком;

5. На участке Н17 рекомендуется реализация мер по содействию естественному возобновлению с последующей рубкой обновления либо проведение чересполосной постепенной рубки и создание лесных культур. В обоих случаях необходимы качественные агротехнические уходы за самосевом и культурами сосны.

Вклад авторов. Осипенко А.Е. – планирование эксперимента, сбор полевых материалов, камеральная обработка данных, написание текста статьи; Башегуров К.А. – планирование эксперимента, сбор полевых материалов, редактирование текста статьи; Осипенко Р.А. – камеральная обработка данных; Залесов С.В. – редактирование текста статьи.

Сведения о финансировании исследования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-76-00009, https://rscf.ru/project/24-76-00009/

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам ООО «Новичиха-лес» А.Ю. Толстикову и В.А. Овчинникову за предоставленную информацию об объектах исследования.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Бунькова Н.П., Залесов С.В., Залесова Е.С., Магасумова А.Г., Осипенко Р.А. Основы фитомониторинга: учеб. пособие; изд. 3-е, доп. и перераб. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2020. 90 с.

Годовалов Г.А., Ежова М.Г., Шипицина О.В., Секерин И.М. Изучение эффективности рубок обновления различными способами // Аграрный вестник Урала. 2009. № 6(60). С. 66-68.

Дебков Н.М., Ильинцев А.С., Васильев А.С. Оценка подпологового возобновления в сосняках южной тайги Томской области // Лесной вестник. 2017. Т. 21, № 1. С. 28-35. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-28-35.

Желдак В.И., Маленко А.А., Мартынюк А.А., Сидоренков В.М., Лямцев Н.И., Коршунов Н.А., Корякин В.А., Рябцев О.В., Малиновских А.А., Дорощенкова Э.В., Конюшенков М.Е., Курсикова Е.С., Сидоренкова Е.М., Трушина И.Г., Трушина Н.И. Ленточные боры и ведение хозяйства в них: монография / под ред. А.А. Мартынюка. Пушкино: Изд-во ВНИИЛМ, 2022. 216 с.

Загреев В.В., Сухих В.И., Швиденко А.З., Гусев Н.Н., Мошкалев А.Г. Общесоюзные нормативы для таксации лесов. М.: Колос, 1992. 495 с.

Залесов С.В., Залесова Е.С., Данчева А.В., Федоров Ю.В. Опыт рубок обновления в одновозрастных рекреационных сосняках подзоны северной лесостепи // ИВУЗ. Лесной журнал. 2014. № 6(342). С. 20-31.

Залесов С.В., Осипенко А.Е., Толстиков А.Ю., Усов М.В., Гоф А.А., Савин В.В. Воспроизводство и омоложение ленточных боров Алтайского края: монография. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2023. 357 с.

Иванов В.В., Семенякин Д.А. Влияние выборочных рубок на продуктивность сосновых древостоев в условиях Красноярской лесостепи // Сибирский лесной журнал. 2021. № 1. С. 58-67. DOI: 10.15372/SJFS20210106.

Ключников М.В., Парамонов Е.Г. Рубки обновления и переформирования в особо ценных сосняках. Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2003. 117 с.

Кутявин И.Н., Манов А.В., Осипов А.Ф., Кузнецов М.А. Строение древостоев северотаежных сосняков // ИВУЗ. Лесной журнал. 2021. № 2(380). С. 86-105. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-86-105.

Лабоха К.В., Прищепов А.А., Луферов А.О. Пути формирования естественных сосновых насаждений рубками обновления // Труды БГТУ. Сер. 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2021. № 2(246). С. 51-57. DOI: 10.52065/2519-402X-2021-246-6-51-57.

Луферов А.О. Ход естественного возобновления соснового подроста под пологом насаждений с проведенными рубками промежуточного пользования и постепенными рубками главного пользования // Труды БГТУ. Сер. 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2020. № 1. С. 39-47.

Маленко А.А., Семенов М.И., Елизаров В.А. К вопросу о рубках ухода в ленточных борах Алтайского края // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2012. № 12(98). С. 54-57.

Малиновских А.А. Степень развития растительного покрова в разных типах лесорастительных условий на гарях в ленточных борах Алтайского края // Лесной вестник / Forestry Bulletin. 2020. Т. 24, № 4. С. 43-51. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-4-43-51.

Малиновских А.А. Оценка успешности естественного возобновления сосны обыкновенной в пригородных лесах Барнаула // Леса России и хозяйство в них. 2024. № 3(90). С. 15-25.

Мартынюк А.А., Сидоренков В.М., Желдак В.И., Лямцев Н.И., Рябцев О.В., Жафяров А.В. Ленточные боры Алтайского края – состояние и совершенствование хозяйства в них // Лесохозяйственная информация. 2019. № 1. С. 33-48. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2019.1.03.

Осипенко А.Е., Залесов С.В. Разновозрастность сосновых древостоев как фактор гармонизации системы лесохозяйственных мероприятий в ленточных борах Алтайского края // Лесотехнический журнал. 2023. Т. 13, № 1 (49). С. 129-145. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.1/9.

Осипенко А.Е., Залесов С.В. Обеспеченность подростом сосновых насаждений Алтае-Новосибирского района лесостепей и ленточных боров // Лесной вестник / Forestry Bulletin. 2024. Т. 28, № 3. С. 15-25. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-15-25.

Осипенко А.Е., Осипенко Р.А., Залесов С.В. Возрастная структура сосновых древостоев в Алтае-Новосибирском районе лесостепей и ленточных боров // Лесохозяйственная информация. 2020. № 3. С. 89-100. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2020.3.08.

Прищепов А.А., Рожков Л.Н. Лесные насаждения Беларуси с установленным режимом лесопользования в форме рубок обновления // Труды БГТУ. Сер. 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2024. № 2(282). С. 38-45. DOI: 10.52065/2519-402X-2024-282-5.

Рогозин М.В., Разин Г.С. Развитие древостоев. Модели, законы, гипотезы. Пермь: Изд-во ПГНИУ, 2015. 277 с.

Семенякин Д.А., Тихонова И.В. Использование многофакторного анализа данных в оценке состояния предварительного и последующего возобновления сосняков после выборочных рубок // ИВУЗ. Лесной журнал. 2024. № 1. С. 33-51. DOI: 10.37482/0536-1036-2024-1-33-51.

Третьяков Н.В., Горский П.В., Самойлович Г.Г. Справочник таксатора. Таблицы для таксации лесов. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1952. 854 с.

Швиденко А.З., Щепащенко Д.Г., Нильсон С., Булуй Ю.И. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Се-

верной Евразии: нормативно-справочные материалы. 2-е изд., доп. М.: Федеральное агентство лесного хозяйства, 2008. 886 с.

Banaś J., Zięba S., Bujoczek L. An example of uneven-aged forest management for sustainable timber harvesting // Sustainability. 2018. No. 10(9). Art. no. 3305. DOI: 10.3390/su10093305.

Huang C., Bai T., Li Y., Huang H., Zheng D., Jiang W. Genetic diversity and fine-scale spatial structure of *Pinus yunnanensis* var. *tenuifolia* after selective logging of large-diameter trees // Journal of Central South University of Forestry & Technology. 2023. No. 43(10). P. 60-69. DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2023.10.007.

Lundqvist L., Ahlström M. A., Petter Axelsson E., Mörling T., Valinger E. Multi-layered Scots pine forests in boreal Sweden result from mass regeneration and size stratification // Forest Ecology and Management. 2019. No. 441. P. 176-181. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.03.044.

Szmyt J. Group-selection system as alternative management of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) forests facing climate change // European Journal of Forest Research. 2025. Vol. 144. P. 133-148. DOI: 10.1007/s10342-024-01746-1.

Tikhonova I.V., Ekart A.K., Kravchenko A.N., Tikhonova N.A. Genetic variability in *Pinus sylvestris*, *Picea obovata*, and *Abies sibirica* populations and in felling in the southern taiga of Central Siberia // Russian Journal of Genetics. 2021. Vol. 57. P. 297-310. DOI: 10.1134/S1022795421030133.

References

Banaś J., Zięba S., Bujoczek L. An example of uneven-aged forest management for sustainable timber harvesting. *Sustainability*, 2018, no. 10(9), art. no. 3305. DOI: 10.3390/su10093305.

Bunkova N.P., Zalesov S.V., Zalesova E.S., Magasumova A.G., Osipenko R.A. Fundamentals of phytomonitoring. 3rd ed, suppl. and rev. Yekaterinburg: USFEU Publ., 2020. 90 p. (In Russ.)

Debkov N.M., Ilyintsev A.S., Vasilyev A.S. The evaluation of regeneration under the pine forest canopy of southern taiga in the Tomsk region. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 1, pp. 28–35. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-28-35. (In Russ.)

Godovalov G.A., Yezhova M.G., Shipitsyna O.V., Sekirin I.M. Study of efficiency of cutting of updating by various ways. *Agrarian Bulletin of the Urals*, 2009, no. 6(60), pp. 66-68. (In Russ.)

Huang C., Bai T., Li Y., Huang H., Zheng D., Jiang W. Genetic diversity and fine-scale spatial structure of *Pinus yunnanensis* var. *tenuifolia* after selective logging of large-diameter trees. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2023, no. 43(10), pp. 60-69. DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2023.10.007.

Ivanov V.V., Semenyakin D.A. Influence of selective logging on the productivity of pine trees in the conditions of Krasnoyarsk forest-steppe. *Siberian*

Journal of Forest Science, 2021, no. 1, pp. 58-67. DOI: 10.15372/SJFS20210106. (In Russ.)

Klyuchnikov M.V., Paramonov E.G. Regeneration and Restocking Felling in Especially Valuable Pine Forests. Barnaul: AltSU Publ., 2003. 117 p. (In Russ.)

Kutyavin I.N., Manov A.V., Osipov A.F., Kuznetsov M.A. Stand Structure of Northern Taiga Pine Forests. *IVUZ. Russian Forestry Journal*, 2021, no. 2(380), pp. 86-105. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-86-105. (In Russ.)

Labokha K.V., Prishchepov A.A., Luferov A.O. Ways of formation of natural pine forests by renovation felling. *Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry. Nature management. Processing of Renewable Resources*, 2021, no. 2(246), pp. 51–57. DOI: 10.52065/2519-402X-2021-246-6-51-57. (In Russ.)

Luferov A.O. Process of natural regeneration of *Pinus sylvestris* undergrowth under the canopy of forest stands with passed intermediate and shelterwood cuttings. *Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry. Nature management. Processing of Renewable Resources*, 2020, no. 1, pp. 39-47. (In Russ.)

Lundqvist L., Ahlström M.A., Petter Axelsson E., Mörling T., Valinger E. Multi-layered Scots pine forests in boreal Sweden result from mass regeneration and size stratification. *Forest Ecology and Management*, 2019, no. 441, pp. 176-181. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.03.044.

Malenko A.A., Semenov M.I., Elizarov V.A. On improvement cuttings in belt pine forests of the Altai region. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*, 2012, no. 12(98), pp. 54-57. (In Russ.)

Malinovskikh A.A. Plant cover development degree under different types of forest growth conditions on burnt areas in the belt pine forests of the Altai region. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 4. pp. 43-51. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-4-43-51. (In Russ.)

Malinovskikh A.A. Evaluation of natural regeneration success of scots pine in the suburban forests of the city of Barnaul. *Forests of Russia and economy in them*, 2024, no. 3(90), pp. 15-25. (In Russ.)

Martynyuk A.A., Sidorenkov V.M., Zheldak V.I., Lyamtsev N.I., Ryabtsev O.V., Zhafyarov A.V. Ribbon Relict Pine Forests in the Altay Territory – Current Forest Management and its Improvement. *Forestry information*, 2019, no. 1, pp. 33-48. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2019.1.03.

Osipenko A.E., Osipenko R.A., Zalesov S.V. Age Structure and Composition of Pine Stands in the Altai-Novosibirsk Region of Forest-Steppe and Ribbon Forests. *Forestry information*, 2020, no. 3, pp. 89-100. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2020.3.08. (In Russ.)

Osipenko A.E., Zalesov S.V. Age differences of pine stands as a factor of harmonization of the system of forest management activities in ribbon forests of the Altai krai. *Forestry Engineering journal*, 2023, vol. 13, no. 1(49), pp. 129-145. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.1/9. (In Russ.)

Osipenko A.E., Zalesov S.V. Young pine plantations availability in Altai-Novosibirsk region of forest-steppes and ribbon forests. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 3, pp. 15–25. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-15-25. (In Russ.)

Prishchepov A.A., Rozhkov L.N. Forests of Belarus with an established forest use regime in the form of renovation felling. *Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources,* 2024, no. 2(282), pp. 38-45. DOI: 10.52065/2519-402X-2024-282-5. (In Russ.)

Rogozin M.V., Razin G.S. Development of Tree Stands. Models, Laws, Hypotheses. Perm: PSU Publ., 2015. 277 p. (In Russ.)

Semenyakin D.A., Tikhonova I.V. The Use of Multivariate Data Analysis in Assessing the State of Advance and After-Regeneration of Pine Forests after Selective Felling. *IVUZ. Russian Forestry Journal,* 2024, no. 1, pp. 33-51. DOI: 10.37482/0536-1036-2024-1-33-51. (In Russ.)

Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G., Nilson S., Buluy Yu.I. Tables and models of growth and productivity of forests of major forest forming pecies of Northern Eurasia (standard and reference materials). 2nd ed., exp. Moscow: Federal Forestry Agency, 2008. 886 p. (In Russ.)

Szmyt J. Group-selection system as alternative management of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) forests facing climate change. *European Journal of Forest Research*, 2025, vol. 144, pp. 133-148. DOI: 10.1007/s10342-024-01746-1.

Tikhonova I.V., Ekart A.K., Kravchenko A.N., Tikhonova N.A. Genetic variability in *Pinus sylvestris*, *Picea obovata*, and *Abies sibirica* populations and in felling in the southern taiga of Central Siberia. *Russian Journal of Genetics*, 2021, vol. 57, pp. 297-310. DOI: 10.1134/S1022795421030133.

Tretyakov N.V., Gorsky P.V., Samoilovich G.G. The Taxator's Handbook. Tables for Forest Taxation. Moscow; Leningrad: Goslesbumizdat, 1952. 854 p. (In Russ.)

Zagreev V.V., Sukhih V.I., Shvidenko A.Z., Gusev N.N., Moshkalev A.G. All-Union Standards for Forest Taxation. Moscow: Kolos, 1992. 495 p. (In Russ.)

Zalesov S.V., Osipenko A.E., Tolstikov A.Yu., Usov M.V., Gof A.A., Savin V.V. Reproduction and rejuvenation of ribbon pine forests in the Altai krai: monograph. Yekaterinburg: USFEU Publ., 2023. 357 p. (In Russ.)

Zalesov S.V., Zalesova E.S., Dancheva A.V., Fedorov Yu.V. Experience of Regeneration Fellings in the Even-Aged Pine Forests of the Northern Forest-Steppe Subzone. *IVUZ. Russian Forestry Journal*, 2014, no. 6(342), pp. 20-31. (In Russ.)

Zheldak V.I., Malenko A.A., Martynyuk A.A., Sidorenkov V.M., Lyamtsev N.I., Korshunov N.A., Koryakin V.A., Ryabtsev O.V., Malinovskikh A.A., Doroshchenkova E.V., Konyushenkov M.E., Kursikova E.S., Sidorenkova E.M., Trushina I.G., Trushina N.I. Pine forests and its management: monograph / ed. by A.A. Martynyuk. Pushkino: VNIILM Publ., 2022. 216 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 13.03.2025

Осипенко А.Е., Башегуров К.А., Осипенко Р.А., Залесов С.В. Естественное возобновление в сосняках Новичихинского лесничества Алтайского края после рубок обновления // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 141–158. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.141-158

Изучено влияние рубок обновления на молодое поколение леса в сосновых насаждениях Новичихинского лесничества Алтайского края. Давность рубок составляет 19-21 год, интенсивность рубок варьирует от 30 до 60%. Рубки обновления проводились путем равномерного изреживания старших поколений деревьев сосны. Приведена таксационная характеристика древостоев и подроста до и после рубок. Определены текущие приросты по высоте. Оценено количество и запас валежных деревьев на исследуемых участках. Установлено, что в условиях типов леса «свежий бор» и «сухой бор пологих всхолмлений» рубки обновления позволили омолодить сосновые насаждения и накопить в них достаточное количество подроста для успешного возобновления леса. В условиях травяного бора рубка обновления негативно отразилась на подросте и древостое. Доказано, что молодое поколение в сосновых насаждениях, пройденных рубкой обновления, формируется преимущественно за счет подроста предварительной генерации. Выявлено, что подрост сосны после рубок обновления в условиях типов леса «свежий бор» и «сухой бор пологих всхолмлений» имеет схожую динамику роста в высоту. Установлено, что после рубки обновления текущие приросты по высоте подроста предварительной генерации увеличиваются в течение 10-14 лет, после чего начинают уменьшаться. Рекомендовано на трех обследованных участках осуществить заключительный прием рубки обновления; на одном участке – провести рубку единичных деревьев и уход за молодняком; еще на одном участке необходимы меры по содействию естественному возобновлению и последующее проведение рубки обновления, либо проведение чересполосной постепенной рубки и создание лесных культур на вырубленных полосах.

Ключевые слова: рубка обновления, *Pinus sylvestris*, подрост, возобновление, поколение леса, текущий прирост, густота.

Osipenko A.E., Basheguro K.A., Osipenko R.A., Zalesov S.V. Natural regeneration in the pine forests of the Novichikhinsky forest district in the Altai krai following regeneration felling. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 141–158 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.141-158

The influence of regeneration felling on the younger generation of forests in the pine plantations of the Novichikhinsky forest district in the Altai Krai has been

studied. The age of felling is 19-21 years; the intensity of felling varies from 30 to 60%. The regeneration felling was carried out by evenly thinning the older generations of pine trees. The taxation characteristics of stands and undergrowth before and after felling are given. The current height increases are determined. The number and stock of dead trees on the studied plots are estimated. The study shows that in the conditions of fresh forest and dry forest on gentle slopes, the felling allowed rejuvenating pine plantations and accumulating a sufficient amount of undergrowth in them for successful forest regeneration. In the conditions of the grassy forest, the regeneration felling negatively affected the undergrowth and the forest stand. The study proves that the younger generation in pine plantations subjected to regeneration felling is formed mainly due to pre-generation undergrowth. The study revealed that after regeneration felling in the conditions of fresh forest and dry forest on gentle slopes, the undergrowth of pine trees shows a similar growth dynamics in height. It has been established that after regeneration felling, the current height gains of the pre-generation undergrowth increase over a period of 10-14 years, after which they begin to decrease. It is recommended to carry out the final regeneration felling on three studied plots; on one plot, it is recommended to cut down single trees and take care of young ones; on another plot, measures are needed to promote natural regeneration and subsequent regeneration felling, or to carry out interlaced gradual felling and the creation of forest crops in the cut-down strips.

K e y w o r d s : regeneration felling, *Pinus sylvestris*, undergrowth, regeneration, forest generation, current growth, density.

ОСИПЕНКО Алексей Евгеньевич – доцент Уральского государственного лесотехнического университета, доцент, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 9805-1800. ORCID: 0000-0002-6148-1747.

620100, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: osipenkoae@m.usfeu.ru

OSIPENKO Aleksey E. – PhD (Agricultural), Assistant Professor, Ural State Forestry Engineering University. SPIN-code: 9805-1800. ORCID: 0000-0002-6148-1747.

620100. Siberian tract str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: osipenkoae@m.usfeu.ru

БАШЕГУРОВ Константин Андреевич – доцент Уральского государственного лесотехнического университета, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 7573-8390. ORCID: 0000-0002-9050-8902.

620100, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: basheguravka@m.usfeu.ru

BASHEGUROV Konstantin A. – PhD (Agricultural), Assistant Professor, Ural State Forestry Engineering University. SPIN-code: 7573-8390. ORCID: 0000-0002-9050-8902.

620100. Siberian tract str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: basheguroVka@m.usfeu.ru

ОСИПЕНКО Регина Александровна – доцент Уральского государственного лесотехнического университета, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 9512-7269. ORCID: 0000-0003-3359-3079.

620100, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: osipenkora@m.usfeu.ru

OSIPENKO Regina A. – PhD (Agricultural), Assistant Professor, Ural State Forestry Engineering University. SPIN-code: 9512-7269. ORCID: 0000-0003-3359-3079.

620100. Siberian tract str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: osipenkora@m.usfeu.ru

ЗАЛЕСОВ Сергей Вениаминович – профессор, заведующий кафедрой лесоводства Уральского государственного лесотехнического университета, профессор, доктор сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 8652-3165. ORCID: 0000-0003-3779-410X.

620100, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: zalesovsv@m.usfeu.ru

ZALESOV Sergey V. – DSc (Agricultural), Head of the Forestry Department, Ural State Forestry Engineering University, Professor. SPIN- code: 7599-8125. ORCID: 0000-0003-3779-410X.

620100. Siberian tract str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: zalesovsv@m.usfeu.ru

УДК 630*161

О.Н. Тюкавина, Е.А. Сурина, Л.Г. Гоголева, П.А. Феклистов

СВЕТОВОЙ РЕЖИМ ЛЕСОВ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРА

Введение. Изучению освещенности под пологом леса по-прежнему уделяется большое внимание [Santos, Ferreira, 2020], поскольку увеличение доступности света тесно связано с ускорением роста деревьев, развитием древостоя и предварительного лесовозобновления [Sendall et al., 2018; Daryaei et al., 2019]. Уровень освещенности под пологом древостоя является стратегическим регулятором процессов, происходящих в лесном биогеоценозе [Bhadouria et al., 2018], ценной информацией, необходимой для управления лесами [Silva et al., 2012]. Понимание реакции конкретных видов на адаптацию и рост в условиях низкой освещенности поможет оценить реакции экосистем на глобальные изменения климата [Valladares, Niinemets, 2008; Lukina et al., 2020].

Каждый тип леса имеет собственные уникальные характеристики. Хвойные имеют более плотные кроны по сравнению с лиственными, вызывая большее затенение. Такой же эффект оказывают кроны молодых деревьев. С возрастом высота деревьев увеличивается, кроны становятся ажурными, повышая освещенность под пологом леса [Феклистов и др., 2024]. Во всех лесах потенциальная продолжительность появления солнечных бликов невелика (4-6 минут). Под полог леса через просветы между кронами деревьев может проникать значительное количество солнечной радиации, особенно в высоких широтах [Canham et al., 1990]. Световой режим в лесах изменяется в зависимости от сомкнутости крон деревьев, вертикального размещения листовой поверхности, метеорологических условий и силы ветра [Мартыненко, Дмитрук, 2009]. Также важно качество солнечной радиации, проходящей через полог леса [Matsuo et al., 2021; Zhen et al., 2022].

Минимальная освещенность для существования сосны составляет 3300 ЛК, а для ели – 1000 Лк. Для молодых растений сосны оптимальная освещенность составляет 25-30% общей радиации на открытом месте [Веретенников, 2002], полнота древостоя должна быть не более 0,4-0,5 [Луганский и др., 1996]. При одинаковой интенсивности прореживания

смешанные насаждения имели наибольшую световую радиацию и наиболее сбалансированный спектральный состав [Su et al., 2024]. Максимальное количество жизнеспособного подроста отмечается при относительной к открытому месту освещенности от 15 до 60% [Феклистов, Шаньгина, 2014]. Во влажных регионах с умеренным климатом молодые деревья (за исключением некоторых видов, таких как сосны, лиственницы и осины) имеют оптимальный рост при относительной освещенности от 25 до 75% в зависимости от вида и экологических условий [Lee, 1978].

Правильное регулирование освещенности признано основным способом контроля за восстановлением и развитием леса, улучшения качества древесины и контроля за видовым составом растений лесного фитоценоза [Kim et al., 2019]. Для этого необходимо формирование базы данных по освещенности под пологом разнообразных насаждений и реакции всех компонентов леса на нее. Освещенность под пологом северотаежных и притундровых лесов изучена недостаточно.

Цель работы – оценка освещенности под пологом лесов арктической зоны Европейского Севера.

Материалы и методика исследования. Объектами исследования являлись сосняки, ельники и березняки разных лесорастительных условий Печорского лесничества (Республика Коми), Архангельского лесничества и Пинежского лесничества (Архангельская область) (табл. 1).

Таблица 1

Таксационная характеристика насаждений

Taxation characteristics **of** plantings

Тип леса	Состав древостоя	Средняя высота, м	Средний диаметр, см	Класс возраста	Относительная полнота
Притундровая зона					
Сосняк толокнянко-лишайниковый	10С+ЕедБ	4,3	7,4	2	0,32
Сосняк черничный	8С2Б	5,7	6,6	3	0,60
Ельник кустарничково-сфагновый	10Е	5,9	8,2	6	0,56
Ельник травяно-гипновый	9Е1Б	9,9	14,5	7	0,51
Ельник черничный	7Е3Б	10,2	14,2	10	0,64

Окончание табл .1

Тип леса	Состав древостоя	Средняя высота, м	Средний диаметр, см	Класс возраста	Относительная полнота
Березняк черничный, 3 класс возраста	10Б	4,4	4,0	3	1,60
Березняк черничный, 8 класс возраста	6Б4Е	10,8	12	8	0,80
Березняк чернично-долгомошный	10Б+ЕедС	6,4	6,9	4	0,67
Северотаежная зона					
Ельник черничный	8Е1С1Б	15,0	15,8	7	0,87
Ельник черничный	8Е1С1Б	16,6	18,7	8	0,78
Ельник черничный	8Е2Б	22	21	10	0,5
Ельник черничный	6Е4Б+СедОс	18,1	18,5	5	0,68
Ельник черничный	1С6Е3Б+Ос	19,6	19,3	5	0,72
Ельник черничный	1С5Е4БедЛц,Ос	16,3	15,4	4	0,83
Сосняк черничный	9С1БедЕ,Ос	17,9	16,1	6	0,93
Сосняк черничный	8С1Б1Ос+Е	18,6	18,4	6	1,00
Сосняк черничный	10С	22,0	28,0	13	0,70
Сосняк черничный	9С1Б	17,8	21,6	5	0,83
Сосняк брусничный	10С	17,2	15,8	5	0,77
Сосняк брусничный	10С+БедЕ	14,6	15,9	4	0,52
Сосняк брусничный	8С2БедЕ	17,3	16,9	5	0,56
Сосняк брусничный	8С1Е1Б+Ос	17,0	16,6	5	0,77
Сосняк лишайниковый	10С	18,0	21,0	6	0,60
Сосняк кустарничково-сфагновый	10С	10,5	13,1	5	0,69
Березняк черничный	2С3Е5Б+Лц едОс	16,8	16,4	4	0,77
Березняк черничный	1С3Е5Б1Ос	17,6	17,0	5	0,62

Исследования проводили в вегетационный период путем заложения временных пробных площадей по стандартным методикам[1] [Сукачев,

[1] ОСТ 56-69-83. Площади пробные лесоустроительные. Методы закладки.

Зонн, 1961; Гусев, 2000]. Освещенность измеряли в 20 случайных точках пробной площади на высоте 1,3 м люксметром Ю-116 около полудня. Синхронно измеряли освещенность на открытом участке. Обработку данных проводили с помощью программ MS Excel 2010.

Результаты исследования и обсуждение. Освещенность под пологом притундровых лесов выше, чем в северотаежных лесах (табл. 2).

Таблица 2

Световой режим под пологом различных типов леса

Light mode under the canopy of different types of forest

Тип леса	Виды погоды	Освещенность, Лк	Изменчивость, %	Относительная освещенность,%
Притундровая зона				
Сосняк толокнянко-лишайниковый	Солнечно	47567±2060	19,4	66,7±2,9
	Ясно	32267±1573	21,8	66,4±3,2
	Облачно	20600±1200	26,1	72,9±4,2
Сосняк черничный	Солнечно	39000±2280	26,1	53,8±3,1
	Ясно	25433±787	13,8	48,0±2,4
	Облачно	8850±160	8,1	70,0±1,3
Ельник кустарничково-сфагновый	Солнечно	47400±2235	21,1	64,9±3,1
	Ясно	40000±1940	21,7	66,7±3,2
	Облачно	13233±720	24,3	67,0±3,6
Ельник травяно-гипновый	Солнечно	36400±2320	28,5	51,2±3,3
	Ясно	27600±1540	25,0	55,1±3,1
	Облачно	10483±304	13,0	62,7±1,8
Ельник черничный	Ясно	24200±1770	32,7	45,3±3,3
	Облачно	7600±400	23,5	40,6±2,1
Березняк черничный	Солнечно	28200±2530	40,1	38,6±3,5
	Ясно	13033±1000	34,3	29,6±2,3
	Облачно	5367±392	32,7	32,0±2,3
Березняк черничный	Ясно	21425±1320	27,6	44,2±2,7
	Облачно	8710±365	18,7	49,6±2,1
Березняк черничнo-долгомошный	Ясно	17667±1467	37,1	33,6±2,8
	Облачно	5444±281	23,1	42,6±2,2

Окончание табл. 2

Тип леса	Виды погоды	Освещенность, Лк	Изменчивость, %	Относительная освещенность,%
Северо-таежная зона				
Ельник черничный	Солнечно	6767±289	19,1	9,7±0,4
	Облачно	3722±81	9,7	18,6±0,4
Ельник черничный	Солнечно	6667±331	22,2	9,5±0,5
	Облачно	2267±118	23,3	11,3±0,6
Ельник черничный	Солнечно	6099±281	20,6	8,2±0,4
Ельник черничный	Облачно	2362±113	21,3	7,4±0,4
Ельник черничный	Ясно	2600±140	24,1	4,5±0,2
Ельник черничный	Ясно	2800±149	23,8	5,0±0,3
Сосняк черничный	Солнечно	8943±659	33,0	12,8±0,9
	Облачно	3800±186	21,9	19,0±0,9
Сосняк черничный	Солнечно	10286±717	31,2	14,7±1,0
	Облачно	3900±256	29,4	19,5±1,3
Сосняк черничный	Солнечно	3931±314	35,7	5,3±0,4
Сосняк черничный	Облачно	4357±61	6,3	21,5±0,3
Сосняк брусничный	Ясно	4800±89	8,3	17,8±0,3
Сосняк брусничный	Облачно	9100±125	6,1	33,7±0,5
Сосняк брусничный	Облачно	8300±96	5,2	30,7±0,4
Сосняк брусничный	Ясно	3175±200	28,2	5,9±0,4
Сосняк лишайниковый	Солнечно	8090±459	25,4	10,9±0,6
Сосняк кустарничково-сфагновый	Облачно	5500±144	11,7	27,1±0,7
Березняк черничный	Ясно	5000±358	32,0	8,9±0,6
Березняк черничный	Солнечно	12700±340	12,0	16,9±0,5

Так, в ельниках черничных при ясной погоде освещенность больше в 3,6 раза ($t = 12,5$ при $t_{st}=2,7$; $p = 0,99$), при облачности – в 3,3 раза ($t = 12,7$ при $t_{st}=2,7$; $p = 0,99$). В сосняках черничных притундровой зоны в солнечную погоду освещенность выше в 4,3 раза ($t = 12,7$ при $t_{st}=2,7$; $p = 0,99$), при облачности – в 2,3 раза ($t = 20,6$ при $t_{st}=2,7$; $p = 0,99$) по сравнению с сосняками черничными северотаежной зоны; в березняках черничных в

ясную погоду – в 4,3 раза (t = 12,0 при t_{st}=2,7; p = 0,99). К солнечной погоде относили освещенность открытого места выше 60 тыс. Лк; к ясной погоде – выше 30 тыс.Лк до 60 тыс. Лк; к облачной – менее 30 тыс. Лк.

Изменчивость освещенности притундровых и северотаежных лесов составляет до 40%. Наименьшие значения отмечаются при облачной погоде.

Относительная освещенность (освещенность под пологом леса в процентах к открытому месту) под пологом притундровых лесов выше, чем в северотаежных лесах. Так, в ельниках черничных при ясной погоде относительная освещенность больше в 4,7 раза (t = 10,7 при t_{st}=2,7; p = 0,99); при облачности – в 3,6 раза (t = 13,4 при t_{st}=2,7; p = 0,99). В сосняках черничных притундровой зоны в солнечную погоду относительная освещенность выше в 4,2 раза (t = 12,7 при t_{st}=2,7; p = 0,99); при облачности – в 3,7 раза (t = 32,3 при t_{st}=2,7; p = 0,99) по сравнению с сосняками черничными северотаежной зоны; в березняках черничных в ясную погоду – в 5 раз (t = 12,8 при t_{st}=2,7; p = 0,99).

Большая пропускная способность полога притундровых лесов относительно солнечной энергии обусловлена меньшей высотой (табл. 1) и сомкнутостью крон. Так, в притундровой зоне в березняке черничном при относительной полноте древостоя 0,8 сомкнутость крон составляет 0,34, в сосняке черничном при относительной полноте 0,6 сомкнутость крон – 0,4, в ельнике кустарничково-сфагновом при относительной полноте 0,56 сомкнутость крон – 0,14, в ельнике травяно-гипновом при относительной полноте 0,51 сомкнутость крон – 0,39, в ельнике черничном при относительной полноте 0,64 сомкнутость крон – 0,31. В северотаежном районе в ельнике черничном при относительной полноте древостоя 0,68 сомкнутость крон составляет 0,71, при относительной полноте 0,83 сомкнутость крон – 0,85. В северотаежных лесах сомкнутость крон практически в 2 раза больше, чем в притундровых. В притундровых лесах на подпологовую освещенность оказывает влияние сомкнутость крон (r = –0,75 при t = 4,8), а не относительная полнота (r = –0,34 при t = 1,1).

Отмечается тенденция увеличения доли пропускаемой под полог солнечной энергии в пасмурную погоду, несмотря на то, что абсолютная величина освещенности выше в солнечную погоду. Так, в притундровой зоне в сосняке толокнянко-лишайниковом подпологовая освещенность в облачную погоду сократилась в 2,3 раза по сравнению с солнечной, а относительная освещенность увеличилась на 6,2% (t = 12,0 при t_{st}=2,7; p = 0,99); в сосняке черничном – в 4,4 раза и на 16,2% соответственно (t = 4,8 при t_{st}=2,7; p = 0,99); в ельнике травяно-гипновом – в 3,5 раза и на 11,5% соот-

ветственно (t = 3,1 при t_{st}=2,7; p = 0,99); в березняке черничнодолгомошном – в 3,2 раза и на 9% соответственно (t = 2,5 при t_{st}=2,0; p = 0,95). В ельнике черничном и березняке черничном данные изменения не значимы. Теснота связи между подпологовой относительной освещенностью на высоте 1,3 м и освещенностью открытого участка обратная значимая, высокая – в березняке чернично-долгомошном (r = -0,80 при t = 9,4) и ельнике травяно-гипновом (r = -0,87 при t = 15,7); значительная – в ельнике черничном (r = -0,61 при t = 4,2); умеренная – в сосняке толокнянколишайниковом, березняке черничном.

В северотаежной зоне в сосняке черничном подпологовая освещенность в облачную погоду сократилась в 2,5 раза по сравнению с солнечной, а относительная освещенность увеличилась на 5,5% (t = 2,9 – 4,9 при t_{st}=2,7; p = 0,99); в ельнике черничном – в 1,8-2,9 раза и на 1,8-8,9% соответственно (t = 2,3 – 15,9 при t_{st} = 2,0; p = 0,95). В пасмурную погоду на кроны деревьев падает только рассеянная радиация, отраженная от облаков и крон деревьев. В ясную погоду поверхность крон освещается еще и прямыми лучами, которые частично отражаются и поглощаются, а частично проходят сквозь кроны в виде бликов. Продолжительность действия рассеянного света гораздо больше, чем у прямых лучей [Шаповалова, 2015].

Влияние типа леса неоднозначно. Это связано с большим разнообразием факторов, влияющих на подпологовую освещенность, и сложностью с подбором объектов, характеризующихся однородностью по большинству факторов. Так, согласно исследованиям [Feklistov et al, 2021], освещенность уменьшается от кромки соснового леса до расстояния 10 м, елового – до расстояния около 6 м, после чего остается постоянной. Максимальные же значения средней освещенности в табл. 2 в северотаежных лесах характерны для пробных площадей, заложенных на расстоянии 10 м от кромки леса. На расстоянии 40 м от кромки леса средняя подпологовая освещенность в солнечный день близка к освещенности в облачный день на пробных площадях, находящихся на расстоянии 20 м. В северотаежном районе при облачной погоде наибольшая освещенность характерна для сосняков кустарничково-сфагновых (5500 Лк), затем по мере ее снижения располагаются сосняки черничные (3800–4400 Лк), ельники черничные (2100–3800 Лк). Данные насаждения характеризуются относительной полнотой более 0,68. Сосняки брусничные при данных погодных условиях, но со средней относительной полнотой 0,55, отличаются наибольшими значениями освещенности (8000–9000 Лк). В солнечный день освещенность в сосняках черничных составляет 6000-10300 Лк, ельниках черничных – 6000-

7000 Лк. Максимальная освещенность отмечается в березняке черничном при относительной полноте 0,62.

В притундровых лесах наибольшая подпологовая освещенность отмечается в ельниках кустарничково-сфагновых и сосняках толокнянково-лишайниковых. Чем дальше отклоняются условия произрастания от оптимальных, тем меньше развитие кроны и ниже ее сомкнутость. Но на освещенность под пологом притундровых лесов оказывает влияние участие березы в составе насаждения независимо от типа леса (рис. 1).

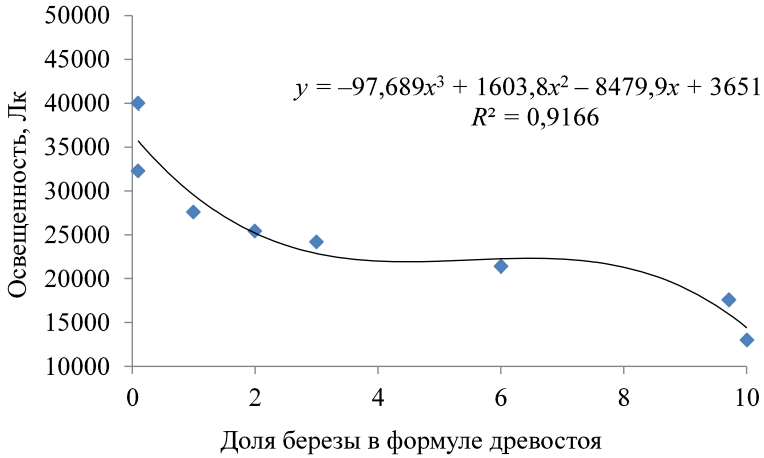


Рис. 1. Влияние доли березы в составе насаждения на освещенность под его пологом при ясной погоде в притундровой зоне

Fig. 1. The effect of the proportion of birch in the composition of the plantation on the illumination under its canopy in clear weather in the forest tundra

Влияние доли березы в составе насаждения на освещенность под его пологом при ясной погоде в притундровой зоне можно описать полиномиальной функцией третьей степени (рис. 1). Чем больше доля участия березы в составе древостоя, тем ниже освещенность. Модель построена при условии $0 \leq x \leq 10$.

Заключение. Отличием светового режима притундровых лесов от северотаежных является высокая проницаемость полога. Относительная освещенность на высоте 1,3 м под пологом различных типов притундровых лесов и при разных видах погоды превышает относительную освещенность в

северотаежных лесах в 3,6-5 раз. В результате здесь формируются более высокие уровни освещенности. Большая проницаемость полога в притундровых лесах обусловлена сомкнутостью крон. При схожей с северотаежными лесами относительной полноте древостоя сомкнутость крон ниже практически в 2 раза. Доля пропускаемой под полог солнечной энергии в пасмурную погоду больше, чем в солнечную, на 2-16%. Влияние типа леса на подпологовую освещенность неоднозначно. Помимо вида погоды необходимо учитывать дальность от кромки леса. В притундровых лесах на освещенность влияет доля березы в составе древостоя.

Сведения о финансировании исследования. Работа проведена по результатам исследований, выполненных в рамках государственного задания ФБУ «СевНИИЛХ» на проведение прикладных научных исследований, регистрационный номер темы – 123032700030-9; в рамках государственного задания Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова УрО РАН (№ гос. рег. – 125021902596-8).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Веретенников А.В. Физиология растений: учебник. Воронеж: ВГЛТА, 2002. 272 с.

Гусев И.И. Таксация древостоя: учеб. пособие. Архангельск: АГТУ, 2000. 71 с.

Луганский Н.А., Залесов С.В., Шавровский В.А. Лесоведение: учеб. пособие. Екатеринбург: УГЛТА, 1996. 373 с.

Мартыненко В.П., Дмитрук Л.Б. Основы фитоценологии. Учебно-методический комплекс. Витебск: ВГУ им. П.М. Машерова, 2009. 108 с.

Сукачёв В.Н., Зонн С.В. Методические указания к изучению типов леса. М.: АН СССР, 1961. 227 с.

Феклистов П.А., Бруева Ж.А., Верховцева Е.П., Болотов И.Н. Особенности микроклимата под пологом северотаежных сосняков разных типов леса // Лесной вестник / Forestry Bulletin. 2024. Т. 28, № 5. С. 30–41. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-30-41.

Феклистов П.А., Шаньгина Н.П. Экологические факторы естественного возобновления под пологом ельников черничных. Архангельск: ИДСАФУ, 2014. 114 с.

Шаповалова А.А. Экология растений. Саратов: Саратовский источник, 2015. 80 с.

Bhadouria R., Srivastava P., Singh S., Singh R., Raghubanshi A., Singh J.S. Effects of light, nutrient and grass competition on growth of seedlings of four tropical tree species // Indian Forester. 2018. Vol. 144, no. 1. P. 54–65.

Canham C.D., Denslow J.S., Platt W.J., Runkle J.R., Spies T.A., White P.S. Light regimes beneath closed canopies and tree-fall gaps in temperate and tropical forests // Canadian Journal of Forest Research. 1990. Vol. 20, no. 5. P. 620-631. DOI:10.1139/x90-084.

Daryaei A., Sohrabi H., Puerta-Piñero C. How does light avail ability affect the aboveground biomass allocation and leaf morphology of saplings in temperate mixed deciduous forests? // New for. 2019. Vol. 50, no. 3. P. 409–422. DOI:10.1007/s11056-018-9666-0.

Feklistov P., Sobolev A., Barzut O., Neverov N. Illuminance under canopy in different types of forest in the northern taiga // Folia Forestalia Polonica. Series A – Forestry. 2021. Vol. 63, no. 2. P. 112–115. DOI: 10.2478/ffp-2021-0012.

Kim D.-H., Son S.-W., Suh G.-U., Jung J.-Y., Lee J.-Ch., Kim P.-G. Analysis of the Light Condition in the Forest Stand // Journal of Agriculture & Life Science. 2019. Vol. 53, no. 5. P. 75-82. DOI: 10.14397/jals.2019.53.5.75.

Lee R. Forest microclimatology. N.-Y.: Columbia University Press New York, 1978. 276 p.

Lukina N., Kuznetsova A., Tikhonova E., Smirnov V., Danilova M., Gornov A., Tebenkova D., Knyazeva S., Bakhmet O., Kryshen A., Shashkov M. Linking forest vegetation and soil carbon stock in northwestern Russia // Forests. 2020. Vol. 11, no. 9. P. 979. DOI: 10.3390/f11090979.

Matsuo T., Martinez-Ramos M., Bongers F., van der Sande M.T., Poorter L. Forest structure drives changes in light heterogeneity during tropical secondary forest succession // J. Ecol. 2021. Vol. 109, no. 8. P. 2871-2884. DOI:10.1111/1365-2745.13680.

Santos V.A.H.F., Ferreira M.J. Are photosynthetic leaf traits related to the first-year growth of tropical tree seedlings? A light-induced plasticity test in a secondary forest enrichment planting // For. Ecol. Manag. 2020. Vol. 460. Art. no. 117900. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.117900.

Sendall K.M., Reich P.B., Lusk C.H. Size-related shifts in carbon gain and growth responses to light differ among rainforest ever greens of contrasting shade tolerance // Oecologia. 2018. Vol. 187, no. 3. P. 609-623. DOI:10.1007/s00442-018-4125-3.

Silva D.D., Balandier P., Boudon F., Marquier A., Godin Ch. Modeling of light transmission under heterogeneous forest canopy: an appraisal of the effect of the precision level of crown description // Annals of Forest Science. 2012. Vol. 69. P. 181–193. DOI: 10.1007/s13595-011-0139-2.

Su Sh., Jin N., Wei X. Effects of thinning on the understory light environment of different stands and the photosynthetic performance and growth of the reforestation species *Phoebe bournei* // Journal of Forestry Research. 2024. Vol. 35. P. 6. DOI:10.1007/s11676-023-01651-0.

Valladares F., Niinemets Ü. Shade tolerance, a key plant feature of complex nature and consequences // Ann. Rev. Ecol. Evol. Syst. 2008. Vol. 39. P. 237–257. DOI: 10.1146/annurev.ecolsys.39.110707.173506.

Zhen S.Y., van Iersel M.W., Bugbee B. Photosynthesis in sun and shade: the surprising importance of far-red photons // New Phytol. 2022. Vol. 236, no. 2. P. 538–546. DOI: 10.1111/nph.18375.

References

Bhadouria R., Srivastava P., Singh S., Singh R., Raghubanshi A., Singh J.S. Effects of light, nutrient and grass competition on growth of seedlings of four tropical tree species. *Indian Forester*, 2018, vol. 144, no. 1, pp. 54–65.

Canham C.D., Denslow J.S., Platt W.J., Runkle J.R., Spies T.A., White P.S. Light regimes beneath closed canopies and tree-fall gaps in temperate and tropical forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 1990, vol. 20, no. 5, pp. 620-631. DOI:10.1139/x90-084.

Daryaei A., Sohrabi H., Puerta-Piñero C. How does light avail ability affect the aboveground biomass allocation and leaf morphology of saplings in temperate mixed deciduous forests? *New for.*, 2019, vol. 50, no. 3, pp. 409–422. DOI: 10.1007/s11056-018-9666-0.

Feklistov P., Sobolev A., Barzut O., Neverov N. Illuminance under canopy in different types of forest in the northern taiga. *Folia Forestalia Polonica. Series A – Forestry*, 2021, vol. 63, no. 2, pp. 112–115. DOI: 10.2478/ffp-2021-0012.

Feklistov P.A., Brueva Zh.A., Verkhovtseva E.P., Bolotov I.N. Microclimate features under canopy of north taiga pine forests of different types. *Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 5, pp. 30–41. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-30-41. (In Russ.)

Feklistov P.A., Shangina N.P. Ecological factors of natural regeneration under the canopy of blueberry spruce forests. Arkhangelsk: IDSAFU, 2014. 114 p. (In Russ.)

Gusev I.I. Taxation of tree stands: a textbook. Arkhangelsk: AGTU, 2000. 71 p. (In Russ.)

Kim D.-H., Son S.-W., Suh G.-U., Jung J.-Y., Lee J.-Ch., Kim P.-G. Analysis of the Light Condition in the Forest Stand. *Journal of Agriculture & Life Science*, 2019, vol. 53, no. 5, pp. 75-82. DOI: 10.14397/jals.2019.53.5.75.

Lee R. Forest microclimatology. New York: Columbia University Press New York, 1978. 276 p.

Lugansky N.A., Zalesov S.V., Shavrovsky V.A. Forest science: textbook. Yekaterinburg: UGLTA, 1996. 373 p. (In Russ.)

Lukina N., Kuznetsova A., Tikhonova E., Smirnov V., Danilova M., Gornov A., Tebenkova D., Knyazeva S., Bakhmet O., Kryshen A., Shashkov M. Linking forest vegetation and soil carbon stock in northwestern Russia. *Forests,* 2020, vol. 11, no. 9, p. 979.

Martynenko V.P., Dmitruk L.B. Fundamentals of phytocenology. Educational and methodical complex. Vitebsk: Masherov Vitebsk State University, 2009. 108 p. (In Russ.)

Matsuo T., Martinez-Ramos M., Bongers F., van der Sande M.T., Poorter L. Forest structure drives changes in light heterogeneity during tropical secondary forest succession. *J. Ecol*., 2021, vol. 109, no. 8, pp. 2871-2884. DOI:10.1111/1365-2745.13680.

Santos V.A.H.F., Ferreira M.J. Are photosynthetic leaf traits related to the first-year growth of tropical tree seedlings? A light-induced plasticity test in a secondary forest enrichment planting. *For. Ecol. Manag*., 2020, vol. 460, art. no. 117900. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.117900.

Sendall K.M., Reich P.B., Lusk C.H. Size-related shifts in carbon gain and growth responses to light differ among rainforest ever greens of contrasting shade tolerance. *Oecologia*, 2018, vol. 187, no. 3, pp. 609–623. DOI:10.1007/s00442-018-4125-3.

Shapovalova A.A. Plant ecology. Saratov: Saratov Source, 2015. 80 p. (In Russ.)

Silva D.D., Balandier P., Boudon F., Marquier A., Godin Ch. Modeling of light transmission under heterogeneous forest canopy: an appraisal of the effect of the precision level of crown description. *Annals of Forest Science*, 2012, vol. 69, pp. 181–193. DOI: 10.1007/s13595-011-0139-2.

Su Sh., Jin N., Wei X. Effects of thinning on the understory light environment of different stands and the photosynthetic performance and growth of the reforestation species *Phoebe bournei*. *Journal of Forestry Research*, 2024, vol. 35, pp. 6. DOI:10.1007/s11676-023-01651-0.

Sukachev V.N., Zonn S.V. Methodological guidelines for the study of forest types. Moscow: USSR Academy of Sciences, 1961. 227 p. (In Russ.)

Valladares F., Niinemets Ü. Shade tolerance a key plant feature of complex nature and consequences. *Ann. Rev. Ecol. Evol. Syst*., 2008, vol. 39, pp. 237–257.

Veretennikov A.V. Plant physiology: textbook. Voronezh: VGLTA, 2002. 272 p. (In Russ.)

Zhen S.Y., van Iersel M.W., Bugbee B. Photosynthesis in sun and shade: the surprising importance of far-red photons. *New Phytol*., 2022, vol. 236, no. 2, pp. 538–546. DOI: 10.1111/nph.18375.

Материал поступил в редакцию 15.08.2025

Тюкавина О.Н., Сурина Е.А., Гоголева Л.Г., Феклистов П.А. Световой режим лесов арктической зоны Европейского Севера // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 159–173. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.159-173

В статье приведена оценка освещенности под пологом лесов арктической зоны Европейского Севера. Уровень освещенности под пологом древостоя является стратегическим регулятором процессов, происходящих в лесном биогеоценозе, ценной информацией, необходимой для управления лесами,

особенно в условиях изменяющегося климата. Правильное регулирование освещенности признано основным способом контроля за восстановлением и развитием леса. Для этого необходимо формирование базы данных по освещенности под пологом разнообразных насаждений и реакции всех компонентов леса на нее. Недостаточно изучена освещенность под пологом северотаежных и притундровых лесов. Исследования проводили в вегетационный период в сосняках, ельниках и березняках Печорского (Республика Коми), Архангельского и Пинежского (Архангельская область) лесничеств. Освещенность измеряли на высоте 1,3 м около полудня. Отличием светового режима притундровых лесов от северотаежных является высокая проницаемость полога. Относительная освещенность на высоте 1,3 м под пологом различных типов притундровых лесов и при разных видах погоды превышает относительную освещенность в северотаежных лесах в 3,6-5 раз. В результате здесь формируются более высокие уровни освещенности. Большая проницаемость полога в притундровых лесах обусловлена сомкнутостью крон. При схожей с северотаежными лесами относительной полноте древостоя сомкнутость крон ниже практически в 2 раза. Доля пропускаемой под полог солнечной энергии в пасмурную погоду больше, чем в солнечную, на 2–16%. Влияние типа леса на подпологовую освещенность неоднозначно. Помимо вида погоды необходимо учитывать дальность от кромки леса. В притундровых лесах на освещенность влияет доля березы в составе древостоя.

Ключевые слова: освещенность под пологом леса, относительная освещенность, притундровые леса, северотаежные леса.

Tyukavina O.N., Surina E.A., Gogoleva L.G., Feklistov P.A. The light regime of the forests of the Arctic zone of the European North. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 159–173 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.159-173

The article provides an assessment of the illumination under the canopy of the forests of the Arctic zone of the European North. The level of illumination under the canopy of a stand is a strategic regulator of the processes occurring in the forest biogeocenosis, valuable information necessary for forest management, especially in a changing climate. Proper regulation of illumination is recognized as the main way to control the restoration and development of forests. To do this, it is necessary to create a database on the illumination under the canopy of various plantings and the reaction of all components of the forest to it. The illumination under the canopy of the North taiga and tundra forests has not been sufficiently studied. The research was carried out during the growing season in pine forests, spruce forests and birch forests of Pechora (Komi Republic), Arkhangelsk and Pinezhsky (Arkhangelsk region) forest districts. The illumination was measured at a height of 1.3 m around noon. The difference between the light regime of tundra forests and North taiga forests is the high

permeability of the canopy. The relative illumination at an altitude of 1.3 m under the canopy of various types of tundra forests and under different types of weather exceeds the same value in the North taiga forests by 3.6-5 times. As a result, higher levels of illumination are formed here. The high permeability of the canopy in tundra forests is due to the closeness of the crowns. With a relative abundance of trees similar to the Northern taiga forests, the crown closure are almost 2 times lower. The share of solar energy transmitted under the canopy in cloudy weather is 2-16% more than in sunny weather. The influence of the type of forest on the sub-ecological illumination is ambiguous. In addition to the type of weather, it is necessary to take into account the distance from the edge of the forest. In tundra forests, the proportion of birch in the composition of the stand affects the illumination.

K e y w o r d s : illumination under the forest canopy, relative illumination, forest tundra, northern taiga forests.

ТЮКАВИНА Ольга Николаевна – ведущий научный сотрудник Северного научно-исследовательского института лесного хозяйства; профессор кафедры биологии, экологии и биотехнологии Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова, доктор сельскохозяйственных наук, доцент. Researcher ID: H-2336-2019. ORCID: 0000-0003-4024-6833. SPIN-код: 5120-2525.

163062, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия. E-mail: o.tukavina@narfu.ru

TYUKAVINA Olga N. — DSc (Agriculture), Leading Researcher of the Northern Research Institute of Forestry; Professor of the Department of Biology, Ecology and Biotechnology of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Associate Professor. Researcher ID: H-2336-2019. ORCID: 0000-0003-4024-6833. SPIN-code: 5120-2525.

163062. Nikitova str. 13. Arkhangelsk. Russia. E-mail: o.tukavina@narfu.ru

СУРИНА Елена Анатольевна – ведущий научный сотрудник Северного научно-исследовательского института лесного хозяйства, кандидат сельскохозяйственных наук. ORCID: 0000-0002-8159-8977. SPIN-код: 159131. WOS ResearcherID: AAD-6192-2019. Scopus AuthorID: 57329896400.

163062, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия. E-mail: surina_ea@sevniilh-arh.ru

SURINA Elena A. – PhD (Agricultural), Leading Researcher, Northern Research Institute of Forestry. ORCID: 0000-0002-8159-8977. SPIN-code: 159131. WOS ResearcherID: AAD-6192-2019. Scopus AuthorID: 57329896400.

163062. Nikitova str. 13. Arkhangelsk. Russia. E-mail: n.minin@sevniilh-arh.ru

ГОГОЛЕВА Людмила Георгиевна – научный сотрудник Северного научно-исследовательского института лесного хозяйства, кандидат сельскохозяйственных наук. ORCID: 0000-0002-4876-892X. SPIN-код: 1061011. WOS ResearcherID: ABE-1664-2020. Scopus AuthorID: 57219987384.

163062, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия. E-mail: lesovod@sevniilh-arh.ru

GOGOLEVA Ludmila G. – PhD (Agricultural), Researcher, Northern Research Institute of Forestry. ORCID: 0000-0002-4876-892X. SPIN-code: 1061011. WOS ResearcherID: ABE-1664-2020. Scopus AuthorID: 57219987384.

163062. Nikitova str. 13. Arkhangelsk. Russia. E-mail: lesovod@sevniilh-arh.ru

ФЕКЛИСТОВ Павел Александрович – главный научный сотрудник лаборатории приарктических лесных экосистем Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук, доктор сельскохозяйственных наук, профессор. Researcher ID: AAC-2377-2020. ORCID: 0000-0001-8226-893X. SPIN-код: 4825-2695.

163000, Никольский пр., д. 20, г. Архангельск, Россия. E-mail: pfeklistov@yandex.ru

FEKLISTOV Pavel A. – DSc (Agricultural), Chief Researcher at the Laboratory of Arctic Forest Ecosystems of the N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Professor. Reasearcher ID: AAC-2377-2020. ORCID: 0000-0001-8226-893X. SPIN-code: 4825-2695.

163000. Nikolsky av. 20. Arkhangelsk. Russia. E-mail: pfeklistov@yandex.ru

УДК 630*1+630*451.2

А.В. Лебедев, В.Э. Демидов, С.А. Осипов

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ДРЕВЕСНО-КУСТАРНИКОВОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В ЗУБРОВОМ ПИТОМНИКЕ ПРИОКСКО-ТЕРРАСНОГО ЗАПОВЕДНИКА

Введение. Крупные травоядные животные (лось, косуля, кабан, зубр, олень и др.) являются активной частью лесных биогеоценозов, участвуя в трофической и топической деятельности, в результате чего они считаются ключевыми видами, так как могут вносить значительные изменения в процессы динамики и функционирования ландшафтов [Антонец, Ярыш, 2015; Белкин и др., 2017; Mills et al., 1993; Gottlieb et al., 2024]. Крупные стадные копытные (зубры, тарпаны, туры и др.) рассматриваются в качестве одной из наиболее значимых функциональных групп видов для существования лесного покрова с конца плейстоцена в Северной Евразии и Северной Америке [Смирнова и др., 2015]. В многочисленных исследованиях показаны роль копытных животных в формировании лесного покрова, их влияние на лесовозобновление и биологическое разнообразие, экосистемные функции лесов, в том числе климаторегулирующие [Харченко, Семенов, 2013; Шевченко, 2016; Зарипов и др., 2017; Савин и др., 2017; Иванова и др., 2018; Пилипко, 2018; Ярыш, Ярыш, 2019; Лукина и др., 2020]. Особые условия динамики численности диких копытных животных и их взаимодействия с компонентами биогеоценозов формирует режим особо охраняемых природных территорий (ООПТ), что в ряде случаев из-за высокой плотности популяций создает опасность трансформации и разрушения растительных сообществ [Филонов, 1977; Гусев, 1984; Потапов, Бородин, 2021].

На протяжении всего голоцена в лесной зоне видом-эдификатором являлся зубр (*Bison bonasus* Linnaeus, 1758) [Калякин, Турубанова, 2004]. Вместе с другими стадными копытными животными он участвовал в формировании открытых и полуоткрытых ландшафтов, высокопродуктивных пастбищ, способствовал удобрению почвы и обеспечивал существование светолюбивой флоры [Евстигнеев, Солонина, 2016]. Массовое истребление зубра привело к тому, что к началу XX века в дикой природе сохранились два подвида – беловежский, населявший равнинные леса Европы, и кавказ-

ский, обитавший в горах Кавказа. Но к 1920-м гг. под натиском цивилизации зубр исчез из дикой природы, лишь последние особи сохранились в зоопарках и частных питомниках Европы [Перерва, 2018; Федотова, 2018]. Международным союзом охраны природы и природных ресурсов зубр занесен в «Международную Красную книгу животных», а благодаря целенаправленной деятельности ученых с середины XX века наблюдается рост популяции этого вида [Рыжакина и др., 2016]. Восстановление популяции зубра на какой-либо территории приводит к трансформации существующих популяций растений и животных, изменению их обилия [Созинов и др., 2018]. Дальнейшее расселение зубра в лесной зоне Восточной Европы требует проведения исследований, направленных на изучение изменения компонентов биогеоценозов под воздействием этого вида копытных животных. Особую ценность при этом имеет сопоставление материалов о состоянии растительного покрова до заселения зубров и после их жизнедеятельности на протяжении нескольких десятилетий.

ООПТ относятся к важным объектам, где проводится восстановление и изучение популяций зубра в нашей стране. Центральный зубровый питомник (оборудован в 1948 г. по проекту М.А. Заблоцкого) Приокско-Террасного биосферного заповедника является основным центром в России по сохранению генетического фонда зубров страны. Также работы по восстановлению популяции зубра и их изучению проводятся и на других ООПТ: например, в 1956 г. основан зубровый парк по выведению чистопородной группы животных в Мордовском заповеднике [Потапов, 2012], в 1959 г. организован зубровый питомник Окского заповедника [Цибизова, 2021], с 1968 г. работы по реинтродукции проводятся в Тебердинском заповеднике [Текеев, 2021], в 1996 г. началось активное заселение зубров из разных центров разведения в национальный парк «Орловское полесье» [Лапин и др., 2022], с 2001 г. вольная популяция зубров (более 100 особей) обитает в заповеднике «Калужские засеки» [Иванова и др., 2018], с 2011 г. зубры содержатся в заповеднике «Брянский лес» [Ситникова, 2013].

Цель исследования – выявление долговременных изменений древесно-кустарниковой растительности (древостой, подрост и подлесок) в результате воздействия копытных животных в зубровом питомнике Приокско-Террасного заповедника.

Объект и методика исследования. Приокско-Террасный заповедник создан в 1945 г. в качестве одного из участков Московского заповедника на территории, входившей ранее в состав Серпуховского лесхоза; статус

самостоятельного заповедника был получен в 1948 г. [Заблоцкая, 2018]. Приокско-Террасный заповедник расположен в Серпуховском районе Московской области на южной границе распространения хвойно-широколиственных лесов [Геоботаническое…, 1989], занимая площадь 4960 га (рис. 1). В результате длительных антропогенных воздействий, предшествующих введению заповедного режима, коренные леса на всей территории заповедника уступили место вторичным, представленным на большей части площади сосняками и березняками [Ковда и др., 1981; Заугольнова, 2000; Демидов, 2023].

В 1948 г. в заповеднике создан Центральный зубровый питомник для разведения, изучения и расселения зубра в границах исторического ареала [Белоусова, 1996; Голубев и др., 2017]. В первые годы питомник занимал площадь около 30 га, но к концу 1960-х гг. она была увеличена до 198 га. Территория рассчитана на содержание 50-55 животных, из которых 20-25 – взрослые племенные, а остальные – молодняк, выращивающийся до возраста 1,5-2,0 года [Перерва, 2018]. В летний период зубры питаются в основном подножным кормом (травы и кустарники), зимой получают дополнительную подкормку в виде сена, корнеплодов и комбикорма. Круглый год животные имеют возможность поедать кору и подрост деревьев на площади загонов.

Плотность популяции зубров в питомнике Приокско-Террасного заповедника значительно превышает природную. Ввиду высокой численности влияние зубров на лес чрезвычайно велико. При этом в некоторых аспектах это влияние ускорено деятельностью человека, поскольку в питомнике до начала 2000-х гг. практиковалась интенсивная биотехния. Так, регулярно срубались осины (основная кормовая порода), кора которых была сильно повреждена зубрами у комля. Целью являлось предоставление свежего веточного корма стаду, не дожидаясь полного высыхания поврежденного дерева. При этом происходил ускоренный отпад осины. Также в случае повреждения зубрами прикомлевой части стволов подвергались выборочной рубке сосны, материал которых шел на постройку сенных амбаров и другие нужды питомника. Существующие редины и поляны на территории питомника каждое лето прокашивались с целью предоставить животным отаву и избежать залесения. В 1963 г. для создания полян в проектируемых загонах №7 и №8 была произведена сплошная вырубка березняка на площади 4 га[1].

[1] Летопись природы Приокско-Террасного государственного заповедника 1964 г. Научные фонды Приокско-Террасного заповедника.

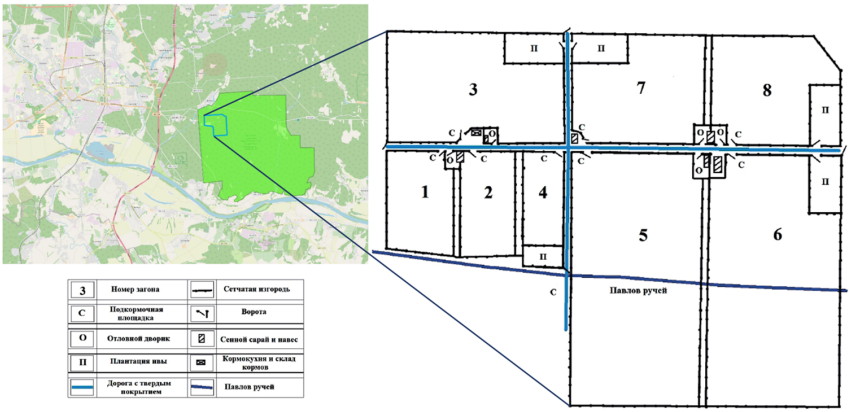


Рис. 1. Расположение Приокско-Террасного заповедника и зубрового питомника (зеленая заливка – территория заповедника, синяя линия – граница зубрового питомника) [по данным открытых картографических сервисов и Перерва, 2017]

Fig. 1. Location of the Prioksko-Terrasny Nature Reserve and the bison nursery (green fill – nature reserve, blue line – boundary of the bison nursery) [according to open mapping services and Pererva, 2017]

Материалами для исследования послужили данные таксационных описаний на территорию зубрового питомника Приокско-Террасного заповедника за 1946 и 2015 гг., визуальных маршрутных обследований, проведенных летом 2024 гг. (рис. 2a, b). В качестве контроля использовались данные по находящимся в сходных лесорастительных условиях (сосняки сложные мелкотравные, сосняки черничные мелкотравные, ельники черничные широкотравные) кварталам № 6 и 12, которые примыкают к восточной границе питомника. Из таксационных описаний были взяты такие показатели, как номер квартала, номер и площадь выдела, преобладающая древесная порода древостоя, подроста и подлеска (при наличии), класс возраста, запас на выделе, относительная полнота, класс бонитета, густота подроста и подлеска. В дальнейшем составлялись итоговые таблицы распределения площадей и запасов, проводился расчет (по площади) среднего возраста, средней полноты и класса бонитета, среднего запаса древесины для лесопокрытой площади. Статистическая обработка данных заключалась в расчете стандартной ошибки средних величин (приводится в тексте после знака ±) с использованием Microsoft Office Excel.

Результаты исследования и их обсуждение. С 1946 по 2015 гг. произошло сокращение лесопокрытой площади в зубровом питомнике с 175,5 до 158,1 га. Лесистость за рассматриваемый период снизилась с 92,4 до 83,2%.

В соотношении доли запасов произошли изменения для таких преобладающих пород, как осина (сокращение с 47 до 17%) и береза (повышение с 29 до 40%). Четверть от общего запаса древесины на территории питомника в 2015 г. стали занимать древостои с преобладанием липы (26%), которая в 1946 г. не входила в верхний полог лесных насаждений. Доля древесных запасов в выделах с преобладанием сосны снилась с 23 до 15% (рис. 3a, b).

a b

Рис. 2. Современное состояние лесных насаждений зубрового питомника: a) 3-й загон; b) 6-й загон

Fig. 2. Current state of forest of the bison nursery: a) 3rd enclosure; b) 6th enclosure

На контрольном участке за пределами зубрового питомника лесопокрытая площадь за рассматриваемый период изменилась от 163,0 до 185,6 га, а лесистость – от 83 до 95%. За прошедшее время практически не изменилась доля запасов древесины в выделах с преобладанием березы и осины. Результатом естественного распада спелых и перестойных сосняков стало снижение доли запаса насаждений с преобладанием сосны: в 1946 г. – 56%, в 2015 г. – 45%. Кроме того, при лесоустройстве 2015 г. выявлены участки с преобладанием ели и липы, доля которых в общем запасе составила 9 и 4% соответственно (рис. 3c, d).

Распределение площадей и запасов древесины по преобладающим породам и классам возраста показано в табл. 1 и 2. Смещение максимумов площадей и запасов в распределении по классам возраста соответствует прошедшему периоду между двумя учетами лесного фонда (около 70 лет). В зубровом питомнике по состоянию на 1946 г. средний возраст (по площади) для хвойных насаждений составлял 58±1 лет, для мелколиственных – 20±1 лет, а на контрольном участке для хвойных – 52±2 года и для мелколиственных – 22±1 года. К 2016 г. в зубровом питомнике средний возраст для хвойных составил 110±3 лет, для мелколиственных – 74±1 года, для широколиственных – 71±1 год, а на контрольном участке для хвойных – 133±2 года, мелколиственных – 71±1 год, широколиственных – 62±1 года.

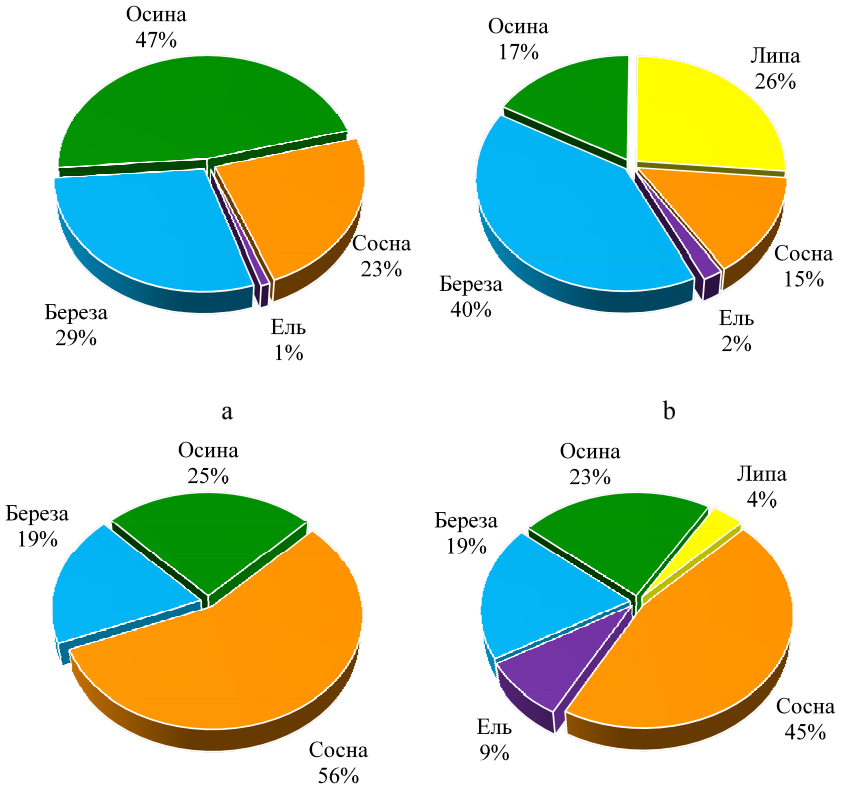


Рис. 3. Соотношение запасов по преобладающим в выделах древесным породам: a) зубровый питомник, 1946 г.; b) зубровый питомник, 2015 г.; c) контроль, 1946 г.; d) контроль, 2015 г.

Fig. 3. Ratio of stand volumes by tree species prevailing in forest areas: a) bison nursery, 1946; b) bison nursery, 2015; c) control, 1946; d) control, 2015

Для территории зубрового питомника средний запас древесины в 1946 г. для хвойных составлял 259±33 м^3/га, для мелколиственных – 94±8 м^3/га, а в 2015 г. для хвойных – 278±19 м^3/га, для мелколиственных – 222±11 м^3/га, для широколиственных – 318±20 м^3/га. На контрольном участке в 1946 г. средний запас хвойных составлял 237±37 м^3/га, для мелколиственных – 134±16 м^3/га, а в 2015 г. для хвойных – 286±16 м^3/га, для

мелколиственных – 245±12 м^3/га, для широколиственных – 352±23 м^3/га. Таким образом, на территории зубрового питомника и контрольного участка за период с 1946 по 2015 гг. произошло естественное старение насаждений с повышением среднего запаса древесины на 1 га лесопокрытой площади. При этом в 2015 г. по всем группам древесных пород средний запас в зубровом питомнике меньше, чем на контрольном участке.

Таблица 1

Распределение площадей и запасов древесины по преобладающим породам и классам возраста в зубровом питомнике

Distribution of areas and timber stock by predominant species and age classes in the bison nursery

Преобладающая порода	Площади (над чертой, га) и запасы (под чертой, м^3) по классам возраста									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Итого
1946 г.										
Сосна	2,4 0	5,7 900	0,0 0	0,3 410	8,7 3230	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	17,1 4540
Ель	0,0 0	1,1 180	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	1,1 180
Береза	30,8 0	7,2 160	44,0 5340	0,8 130	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	82,8 5630
Осина	2,4 0	25,2 2330	46,9 6890	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	74,5 9220
Итого	35,6 0	39,2 3570	90,9 12230	1,1 540	8,7 3230	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	175,5 19570
2015 г.										
Сосна	0,0 0	0,0 0	0,0 0	3,7 1140	1,2 340	0,0 0	10,2 3250	4,6 1000	0,0 0	19,7 5730
Ель	0,7 0	0,0 0	3,0 780	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	3,7 780
Береза	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	1,3 160	1,9 420	28,6 5930	10,5 2190	35,7 7260	78,0 15960
Осина	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	9,9 2920	11,6 3150	2,6 650	24,1 6720
Липа	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	7,1 2280	0,0 0	0,0 0	21,9 6850	3,6 1250	32,6 10380
Итого	0,7 0	0,0 0	3,0 780	3,7 1140	9,6 2780	1,9 420	48,7 12100	48,6 13190	41,9 9160	158,1 39570

Таблица 2

Распределение площадей и запасов древесины по преобладающим породам и классам возраста на контрольном участке

Distribution of areas and timber stock by predominant species and age classes in the control area

Преобладающая порода	Площади (над чертой, га) и запасы (под чертой, м^3) по классам возраста									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Итого
1946 г.										
Сосна	18,8 20	0,0 0	4,0 920	17,1 5370	29,0 10010	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	68,9 16320
Ель	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0
Береза	0,0 0	12,1 870	36,7 4280	0,0 0	0,0 0	0,0 0	1,2 330	0,0 0	0,0 0	50,0 5480
Осина	0,0 0	15,5 1540	28,6 5610	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	44,1 7150
Итого	18,8 20	27,6 2410	69,3 10810	17,1 5370	29,0 10010	0,0 0	1,2 330	0,0 0	0,0 0	163,0 28950
2015 г.										
Сосна	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	26,6 8690	4,7 620	11,7 2570	39,2 10870	0,0 0	82,2 22750
Ель	0,0 0	0,0 0	1,1 280	0,0 0	0,0 0	5,9 1930	5,5 2090	0,0 0	0,0 0	12,5 4300
Береза	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,4 60	9,6 1640	4,5 1170	8,0 1410	19,8 4210	5,5 1200	47,8 9690
Осина	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	4,5 1220	26,0 7580	7,2 2480	37,7 11280
Липа	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,3 70	0,0 0	2,5 860	1,6 590	1,0 380	0,0 0	5,4 1900
Итого	0,0 0	0,0 0	1,1 280	0,7 130	36,2 10330	17,6 4580	31,3 7880	86,0 23040	12,7 3680	185,6 49920

С 1946 по 2015 гг. произошло снижение средней полноты насаждений на территории зубрового питомника (табл. 3 и 4). Так, сразу после организации Приокско-Террасного заповедника в современных границах питомника средняя полнота составляла 0,81±0,03 ед., а к 2015 г. она снизилась до 0,62±0,02 ед. В 1946 г. выделы с высокополнотными насаждениями (0,9-1,0 ед.) занимали площадь 99,7 га (57% от лесопокрытой площади), а в 2015 г.

они полностью отсутствовали. Высокополнотные насаждения в 1946 г. были представлены, главным образом, выделами с преобладанием березы и осины. Количество площадей со среднеполнотными насаждениями (0,6-0,8 ед.) увеличилось с 54,1 га (31%) в 1946 г. до 121,6 га (77%) в 2015 г. Также за рассматриваемый период наблюдается увеличение площадей с низкополнотными (0,3-0,5 ед.) насаждениями от 21,7 га (12%) до 36,6 га (23%).

Таблица 3

Распределение площадей по преобладающим породам и относительным полнотам в зубровом питомнике

Distribution of areas by predominant tree species and relative density in the bison nursery

Преобладающая порода	Площадь (га) по относительным полнотам (ед.)								
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	Итого
1946 г.									
Сосна	0,0	0,0	0,0	0,0	11,4	1,5	0,0	4,2	17,1
Ель	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	0,0	1,1
Береза	0,0	4,4	16,1	7,2	7,3	3,0	2,2	42,6	82,8
Осина	1,2	0,0	0,0	15,0	0,0	8,7	46,1	3,5	74,5
Итого	1,2	4,4	16,1	22,2	18,7	13,2	49,4	50,3	175,5
1946 г.									
Сосна	0,6	0,0	7,1	5,9	6,1	0,0	0,0	0,0	19,7
Ель	0,0	0,0	3,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,7
Береза	3,3	2,5	9,7	26,1	25,9	10,5	0,0	0,0	78,0
Осина	0,0	0,6	5,5	2,0	16,0	0,0	0,0	0,0	24,1
Липа	0,0	3,6	0,0	16,1	12,9	0,0	0,0	0,0	32,6
Итого	3,9	6,7	26,0	50,1	60,9	10,5	0,0	0,0	158,1

На контрольном участке в 1946 г. средняя полнота составляла 0,77±0,03 ед., а в 2015 г. – 0,62±0,01 ед. При первом лесоустройстве высокополнотные насаждения занимали площадь 44,2 га (27%), среднеполнотные – 94,4 га (58%), низкополнотные – 24,4 га (15%). К 2015 г. это соотношение изменилось. Высокополнотные насаждения полностью отсутствовали, среднеполнотные были на площади 151,9 га (82%), низкополнотные – 33,7 га (18%). Снижение средней полноты за 70-летний период произошло и на территории зубрового питомника, и на контрольном участке, поэтому основным фактором, оказавшим влияние на это, можно считать процессы естественного изреживания в результате старения древостоев.

Таблица 4

Распределение площадей по преобладающим породам и относительным полнотам на контрольном участке

Distribution of areas by predominant tree species and relative density in the control area

Преобладающая порода	Площадь (га) по относительным полнотам (ед.)								
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	Итого
1946 г.									
Сосна	0,0	2,6	21,2	7,0	17,2	20,9	0,0	0,0	68,9
Ель	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Береза	0,0	0,0	0,0	2,3	2,8	30,2	12,0	2,7	50,0
Осина	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0	14,0	16,9	12,6	44,1
Итого	0,0	2,6	21,8	9,3	20,0	65,1	28,9	15,3	163,0
1946 г.									
Сосна	0,7	10,6	9,5	31,9	29,5	0,0	0,0	0,0	82,2
Ель	0,0	0,0	1,6	9,0	1,9	0,0	0,0	0,0	12,5
Береза	2,1	0,0	4,8	12,3	23,7	4,9	0,0	0,0	47,8
Осина	0,0	0,0	4,4	20,7	12,6	0,0	0,0	0,0	37,7
Липа	0,0	0,0	0,0	1,4	3,7	0,3	0,0	0,0	5,4
Итого	2,8	10,6	20,3	75,3	71,4	5,2	0,0	0,0	185,6

Распределение площадей по преобладающим породам и классам бонитета показано в табл. 5. В 1946 г. в зубровом питомнике высокопродуктивные насаждения (I^a-I классы бонитета) занимали 112,3 га (64% от лесопокрытой площади), среднепродуктивные (II-III классы бонитета) – 63,2 га (36%). В 2015 г. высокопродуктивные занимали площадь 118,7 га (75%), а среднепродуктивные – 39,4 га (25%). Изменение с 1946 по 2015 гг. среднего класса бонитета по группам основных лесообразующих пород составило для хвойных с I,2 до I,3, для мелколиственных – с I,4 до I,0 класса. Для широколиственных пород в 2015 г. средний класс бонитета составил I,8 класса. Таким образом, за прошедшие 70 лет наблюдается повышение производительности древостоев с преобладанием мелколиственных пород и незначительное ее снижение у древостоев с преобладанием хвойных.

Таблица 5

Распределение площадей по преобладающим породам и классам бонитета

Distribution of areas by predominant tree species and site index classes

Преобладающая порода	Площадь (га) по классам бонитета									
	Зубровый питомник					Контроль				
	Ia	I	II	III	Итого	Ia	I	II	III	Итого
1946 г.										
Сосна	0,0	14,0	3,1	0,0	17,1	2,0	56,5	10,4	0,0	68,9
Ель	0,0	0,0	1,1	0,0	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Береза	0,0	36,2	46,6	0,0	82,8	0,0	37,9	12,1	0,0	50,0
Осина	0,0	62,1	12,4	0,0	74,5	0,0	32,5	11,6	0,0	44,1
Итого	0,0	112,3	63,2	0,0	175,5	2,0	126,9	34,1	0,0	163,0
2015 г.										
Сосна	2,1	9,6	8,0	0,0	19,7	18,2	53,2	10,8	0,0	82,2
Ель	0,0	3,0	0,7	0,0	3,7	0,0	1,9	10,6	0,0	12,5
Береза	0,0	73,6	3,1	1,3	78,0	0,0	37,8	5,7	4,3	47,8
Осина	0,0	24,1	0,0	0,0	24,1	4,7	33,0	0,0	0,0	37,7
Липа	0,0	6,3	26,3	0,0	32,6	0,0	5,1	0,3	0,0	5,4
Итого	2,1	116,6	38,1	1,3	158,1	22,9	131,0	27,4	4,3	185,6

На контрольном участке в 1946 г. высокопродуктивными насаждениями были заняты 128,9 га (79%), среднепродуктивными – 34,1 га (21%). В 2015 г. высокопродуктивные насаждения отмечены на площади 153,9 га (83%), среднепродуктивные – 31,7 га (17%). По основным группам лесообразующих пород изменение среднего класса бонитета составило для хвойных с I,1 до I,0 класса, для мелколиственных с I,3 до I,1 класса. Для широколиственных пород в 2015 г. средний класс бонитета составил I,1 класса. В целом для контрольного участка характерны аналогичные закономерности в изменении производительности лесных насаждений за рассматриваемый временной промежуток, что и для территории зубрового питомника. Исключением является липа, сформированные из которой насаждения в 2015 г. являлись менее производительными (I,8 класс бонитета) по сравнению с контрольным участком (I,1 класс бонитета).

От наличия подроста в лесотаксационных выделах зависит успешность процесса восстановления леса в местах естественной гибели спелых

и перестойных деревьев. В табл. 6 показано распределение площадей по преобладающей породе подроста и густоте. В 1946 г. в зубровом питомнике площадь лесных насаждений с подростом составляла 81,4 га (46% от лесопокрытой площади), к 2015 г. она сократилась до 54,3 га (34%). В 1946 г. значительную площадь занимали выделы с подростом липы (36,6 га), дуба (13,7 га), березы (12,5 га) и сосны (11,7 га). Ель преобладала в подросте только на площади 0,9 га. К 2015 г. заметно снизилось разнообразие древесных пород, преобладающих в подросте. Площадь выделов с преобладанием ели составила 37,6 га, липы – 16,7 га. В распределении выделов по густоте подроста в 1946 г. 11% всех площадей характеризовались единичным подростом (до 1,0 тыс. га 1 га), 82% – редким (от 1,0 до 2,0 тыс. на 1 га) и 7% – средним (от 2,0 до 4,0 тыс. на 1 га). В 2015 г. 33% площадей было с единичным подростом, 62% – с редким и 5% – со средним. В оба учетных периода густой подрост (более 4,0 тыс. на 1 га) не встречался в границах зубрового питомника.

Таблица 6

Распределение площадей по преобладающей породе подроста и густоте

Distribution of areas by predominant species of young trees and density

Преобладающая порода	Площадь (га) по группам густоты									
	Зубровый питомник					Контроль				
	Единичный	Редкий	Средний	Густой	Итого	Единичный	Редкий	Средний	Густой	Итого
1946 г.										
Сосна	0,0	11,7	0,0	0,0	11,7	0,0	5,2	0,0	0,0	5,2
Ель	0,0	0,9	0,0	0,0	0,9	0,0	18,6	6,6	0,0	25,2
Дуб	0,0	13,7	0,0	0,0	13,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Липа	0,0	33,5	3,1	0,0	36,6	0,0	6,7	0,0	0,0	6,7
Береза	9,2	0,9	2,4	0,0	12,5	0,0	1,9	0,0	0,0	1,9
Итого	9,2	66,7	5,5	0,0	81,4	0,0	32,4	6,6	0,0	39,0
2015 г.										
Ель	4,7	29,9	3,0	0,0	37,6	16,1	106,2	19,3	7,8	149,4
Липа	13,0	3,7	0,0	0,0	16,7	0,7	14,7	0,8	0,0	16,2
Итого	17,7	33,6	3,0	0,0	54,3	16,8	120,9	20,1	7,8	165,6

На контрольном участке с 1946 по 2015 гг. произошло увеличение площади лесных насаждений с подростом с 39,0 до 165,6 га, или с 24 до 89% от лесопокрытой площади. В 1946 г. наиболее представленными были выделы с подростом ели (25,2 га), липы (6,7 га) и сосны (5,2 га). В 2015 г. практически на всех выделах преобладающей породой являлась ель (149,4 га), площадь выделов с преобладанием липы составила 16,2 га. В распределении площадей по густоте в 1946 г. преобладали выделы с редким подростом (32,4 га, 83%), незначительно были представлены выделы со средним подростом (6,6 га, 17%). К 2015 г. соотношение площадей по густоте подроста изменилось следующим образом: единичный подрост – 16,8 га (10%), редкий – 120,9 га (73%), средний – 20,1 га (12%) и густой – 7,8 га (5%). Сопоставление результатов для питомника и контрольного участка показывает, что в зубровом питомнике происходит угнетение подроста и формируются условия, препятствующие успешному естественному возобновлению древесных пород.

Также, как и для яруса подроста, в зубровом питомнике наблюдается сокращение площади выделов с подлеском (табл. 7). В 1946 г. площадь лесных насаждений с подлеском составляла 117,8 га (67% от лесопокрытой площади), а к 2015 г. произошло ее снижение до 69,2 га (44%), т.е. практически в два раза. В 1946 г. породами, преобладавшими в составе подлеска, были липа (45,9 га), бересклет (33,9 га), клен (17,0 га), крушина (13,3 га), можжевельник (4,4 га) и рябина (3,3 га). В 2015 г. преобладающими породами в составе подлеска стали липа (38,9 га), рябина (29,3 га) и можжевельник (1,0 га). В распределении подлеска по густоте в оба учетных периода наиболее представленными были выделы с редким подлеском (до 2,0 тыс. на 1 га): в 1946 г. – 113,0 га (96%), в 2015 г. – 48,0 га (69%). Количество площадей со средним подлеском (от 2,0 до 5,0 тыс. на 1 га) в 1946 г. составляло 4,8 га (4%), в 2015 г. – 21,2 га (31%). Выделы с густым подлеском (более 5,0 тыс. на 1 га) в оба учетных периода отсутствовали.

На контрольном участке с 1946 по 2015 г. произошло значительное увеличение площадей с подлеском, с 46,3 до 189,4 га (более чем в 4 раза). Кроме того, наблюдается повышение разнообразия преобладающих пород подлеска. В 1946 г. в качестве преобладающих отмечены только липа (80,8 га) и бересклет (46,3 га), а в 2015 г. – рябина (96,1 га), липа (70,7 га), малина (8,1 га), ива (8,0 га), крушина (4,7 га), жимолость (1,8 га). Также отмечены изменения в распределении подлеска по густоте в сторону ее увеличения. В 1946 г. весь подлесок являлся редким, а в 2015 г. редким занята площадь 5,5 га (3%), средним – 174,2 га (92%), густым – 9,7 га (5%). Таким образом, трофическая деятельность зубров в питомнике способствует активному истреблению подлеска, снижению его разнообразия. В первую очередь подверженными негативному воздействию являются такие кормовые породы, как крушина и бересклет.

Таблица 7

Распределение площадей по преобладающей породе подлеска и густоте

Distribution of areas by predominant undergrowth species and density

Преобладающая порода	Площадь (га) по группам густоты							
	Зубровый питомник				Контроль			
	Редкий	Средний	Густой	Итого	Редкий	Средний	Густой	Итого
1946 г.								
Можжевельник	4,4	0,0	0,0	4,4	0,0	0,0	0,0	0,0
Рябина	3,3	0,0	0,0	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0
Липа	41,1	4,8	0,0	45,9	80,8	0,0	0,0	80,8
Клен	17,0	0,0	0,0	17,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Крушина	13,3	0,0	0,0	13,3	0,0	0,0	0,0	0,0
Бересклет	33,9	0,0	0,0	33,9	46,3	0,0	0,0	46,3
Итого	113,0	4,8	0,0	117,8	127,1	0,0	0,0	127,1
2015 г.								
Можжевельник	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Рябина	26,3	3,0	0,0	29,3	0,8	95,3	0,0	96,1
Липа	20,7	18,2	0,0	38,9	4,3	61,0	5,4	70,7
Ива	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	3,3	4,3	8,0
Крушина	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,7	0,0	4,7
Жимолость	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	0,0	1,8
Малина	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,1	0,0	8,1
Итого	48,0	21,2	0,0	69,2	5,5	174,2	9,7	189,4

Материалы повыдельной таксации лесов находят широкое применение в задачах мониторинга растительного покрова ООПТ [Кузьмичев, Бондарев, 2009; Бухарова, 2012; Балясный, 2014; Чернявин и др., 2017; Гостева и др., 2018]. Проведенное исследование, основанное на использовании лесоустроительных данных, позволило выявить количественные изменения компонентов лесных фитоценозов зубрового питомника Приокско-Террасного заповедника. Под влиянием зоогенного фактора с 1946 по 2015 г. произошло снижение лесопокрытой площади с 175,5 до 158,1 га с уменьшением доли насаждений с преобладанием сосны и осины. За рассматриваемый период в зубровом питомнике произошло уменьшение площадей с выраженными

ярусами подроста и подлеска, а также снижение их видового разнообразия и густоты. Наиболее уязвимыми оказались такие кормовые породы, как ель, крушина, рябина, бересклет. В условиях подавления зубрами естественного возобновления в ближайшие десятилетия в местах отпада деревьев в перестойных насаждениях будут происходить процессы формирования открытых ландшафтов с единичными деревьями и дальнейшее снижение лесопокрытой площади. Аналогичные результаты были получены другими авторами [Корочкина, 1971; Козорез и др., 2016; Шевченко, 2016; Иванова и др., 2018]. Таким образом, зубры в зоне хвойно-широколиственных лесов оказывают сильное воздействие на состав и структуру растительных сообществ. В условиях продолжающейся реинтродукции зубра в европейской части России требуется проведение дальнейших исследований по мониторингу их влияния на компоненты лесных биогеоценозов.

Заключение. Проведенное исследование позволило численно оценить влияние зубров на количественные характеристики компонентов лесных фитоценозов в Приокско-Террасном заповеднике с 1946 по 2015 гг. Показано, что трофическая и топическая деятельность зубров в условиях перевыпаса приводит к формированию открытых ландшафтов и уменьшению лесопокрытой площади (с 92,4 до 83,2%). Выявлено снижение количества лесных площадей с наличием подроста и подлеска, обеднение их видового состава. В первую очередь подвержены негативному воздействию кормовые породы, например, рябина, крушина и бересклет. Таким образом, зубры в зоне хвойно-широколиственных лесов оказывают сильное воздействие на состав и структуру растительных сообществ. При реинтродукции зубра в разные почвенно-климатические условия требуется проведение дальнейших исследований по мониторингу их влияния на компоненты лесных биогеоценозов.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Антонец Н.В., Ярыш В.Л. Средообразующая деятельность диких копытных животных Карадагского природного заповедника // 100 лет Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского: сб. науч. тр. Симферополь, 2015. С. 361-371.

Балясный В.И. Мониторинг лесов государственного природного заповедника «Присурский» за 20-летний период // Научные труды Государственного природного заповедника «Присурский». 2014. Т. 29. С. 14-24.

Белкин В.В., Панченко Д.В., Фёдоров Ф.В. Влияние копытных на лесообразующие и подлесочные породы в естественных условиях и при полувольном содержании // Бореальные леса: состояние, динамика, экосистемные услуги. Петрозаводск, 2017. С. 31-32.

Белоусова И.П. Информационно-аналитический обзор и перспективный план дальнейшей деятельности Центрального зубрового питомника при Приокско-Террасном государственном биосферном заповеднике Минприроды России. Данки: Приокско-Террасный государственный биосферный заповедник, 1996. 12 с.

Бухарова Е.В. Организация ботанического мониторинга в Баргузинском заповеднике // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. 2012. № 11. С. 36-38.

Геоботаническое районирование Нечерноземья европейской части РСФСР. Л.: БИН АН СССР, 1989. 63 с.

Голубев О.В., Сипко Т.П., Гусаров И.В., Марзанов Н.С. Анализ особенностей разведения зубра (*Bison bonasus* L.) и американского бизона (*Bison bison* L.) в условиях Приокско-Террасного биосферного заповедника // Проблемы биологии продуктивных животных. 2017. № 3. С. 66-76.

Гостева А.А., Ерунова М.Г., Савченко А.П. Геоинформационное картографирование динамики формационного состава лесов территории заповедника «Столбы» // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2018. Т. 24, № 1. С. 475-484. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-1-24-475-484.

Гусев А.А. Роль диких копытных в функционировании биогеоценозов Центрально-Черноземного заповедника: автореф. дисс. … канд. биол. наук. М., 1984. 19 с.

Демидов В.Э. Использование архивных аэрофотоснимков 1941-1943 для картирования растительности Приокско-Террасного заповедника // Сто лет охраны: уроки заповедания: сб. ст. по итогам работы Всерос. науч. конф., посвящ. 100-летнему юбилею Воронежского заповедника. Воронеж, 2023. С. 291-299. DOI: 10.57007/9785907669338_2023_291.

Евстигнеев О.И., Солонина О.В. Зубр и поддержание биоразнообразия лугов (на примере заповедника Брянский лес) // Бюллетень МОИП. Отдел биологический. 2016. Т. 121, № 2. С. 59-65.

Заблоцкая М.М. Становление Приокско-Террасного биосферного заповедника // Труды Приокско-Террасного заповедника. 2018. Вып. 7. С. 25-44.

Зарипов Ю.В., Белов Л.А., Залесова Е.С., Савин В.В., Шубин Д.А. Влияние диких копытных животных на формирование молодняков // Леса России и хозяйство в них. 2017. № 2(61). С. 4-12.

Заугольнова Л.Б. Оценка и сохранение биоразнообразия лесного покрова в заповедниках Европейской России. М.: Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, 2000. 196 с.

Иванова Н.В., Смирнов В.Э., Ханина Л.Г., Бобровский М.В., Шашков М.П. Трансформация растительности и населения дождевых червей при вольном выпасе зубров *Bison bonasus* в широколиственных лесах заповедника «Калужские Засеки» // Известия РАН. Серия биологическая. 2018. № 1. С. 113-122. DOI: 10.7868/S0002332918010149.

Калякин В.Н., Турубанова С.А. Изменение видового состава и распространения ключевых видов (эдификаторов) мамонтового комплекса Восточной Европы с позднего плейстоцена до позднего голоцена // Восточноевропейские леса: история в голоцене и современность. Кн. 1. М., 2004. С. 96-118.

Ковда В.А., Керженцев А.С., Заболоцкая Л.В., Гордеева Е.В. Пространственная и временная изменчивость природной среды экологического региона Центральной России // Биосферные заповедники. Труды II Советско-американского симпозиума. Л., 1982. С. 162-163.

Козорез А.И., Подошвелев Д.А., Климец Д.А., Буритын В.Н. Кормовая емкость и возможность восстановления мегафауны в природном комплексе «Красный Бор» // Труды БГТУ. 2016. № 1(183): Лесное хозяйство. С. 254-258.

Корочкина Л.Н. Влияние зубров на подрост древесной растительности Беловежской пущи // Беловежская пуща. 1971. Вып. 4. С. 167-176.

Кузьмичев В.В., Бондарев А.И. Динамика лесных экосистем заповедника «Столбы» за 60 лет // Хвойные бореальной зоны. 2009. Т. 26, № 2. С. 173-177.

Лапин П.А., Гуров П.И., Мирзоев Х.Ш. Характеристика поголовья зубров в национальном парке «Орловское полесье» // Вопросы степеведения. 2022. № 1. С. 70-77. DOI: 10.24412/2712-8628-2022-1-70-77.

Лукина Н.В., Гераськина А.П., Горнов А.В., Шевченко Н.Е., Куприн А.В., Чернов Т.И., Чумаченко С.И., Шанин В.Н., Кузнецова А.И., Тебенькова Д.Н., Горнова М.В. Биоразнообразие и климаторегулирующие функции лесов: актуальные вопросы и перспективы исследований // Вопросы лесной науки. 2020. Т. 3, № 4. С. 1-90. DOI: 10.31509/2658-607x-2020-3-4-1-90.

Перерва В.И. Дичеразведение. Прошлое, настоящее и перспективы. М.: Изд-во ИТРК, 2017. 440 с.

Перерва В.И. Историческая значимость Центрального зубрового питомника для спасения европейского зубра (*Bison bonasus* Linnaeus, 1758) // Труды Приокско-Террасного заповедника. 2018. Вып. 7. С. 6-24.

Пилипко Е.Н. Оценка трофической роли лося (*Alces alces* (L. 1758) на вырубках Вологодской области в зимний период // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2018. № 2. С. 211-220.

Потапов С.К. История зубра и зубропарка Мордовского заповедника // Мордовский заповедник. 2012. № 2. С. 4-7.

Потапов С.К., Бородин П.Л. Роль копытных животных в Мордовском заповеднике и на сопредельных территориях // Труды национального парка «Смольный». 2021. № 5. С. 132-190.

Рыжакина Т.П., Новикова Т.В., Шестакова С.В., Гусаров И.В. Влияние различных факторов на формирование паразитофауны вольноживущего зубра в условиях Европейского Севера России // Актуальные вопросы ветеринарной биологии. 2016. № 4(32). С. 23-27.

Савин В.В., Зарипов Ю.В., Белов Л.А., Залесова Е.С., Шубин Д.А. Влияние лося и косули на сохранность лесных культур сосны и ели // Аграрный вестник Урала. 2017. № 9(163). С. 52-57.

Ситникова Е.Ф. Формирование вольной популяции зубра европейского в Брянской области // Перспективы создания вольной популяции зубров в Европейской России. Брянск, 2013. С. 95-104.

Смирнова О.В., Заугольнова Л.Б., Коротков В.Н. Теоретические основы оптимизации функции биоразнообразия лесного покрова // Лесоведение. 2015. № 5. С. 367-378.

Созинов О.В., Сакович А.А., Янчуревич О.В. Лесотипологическая дифференциация запасов древесно-веточных кормов для копытных животных в условиях наличия и отсутствия *Bison b. bonasus* L. (Гродненская область, Беларусь) // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 5: Экономика. Социология. Биология. 2018. Т. 8, № 3. С. 129-144.

Текеев Д.К. Реинтродукция зубра в Тебердинском заповеднике // Мордовский заповедник. 2021. № 20. С. 22-25.

Филонов К.П. Динамика численности копытных животных и заповедность. М.: Лесн. пром-сть, 1977. 231 с.

Федотова А.А. Беловежский зубр (*Bison bonasus bonasus*) как музейный экспонат в XVIII – начале XX вв. // Труды Зоологического института РАН. 2018. Т. 322, № 2. С. 160-184.

Харченко Н.Н., Семенов М.А. Современное состояние сообщества копытных животных Среднерусской лесостепи // Лесотехнический журнал. 2013. № 3(11). С. 50-60.

Цибизова Е.Л. Современное состояние питомника зубров Окского заповедника // Мордовский заповедник. 2021. № 20. С. 36-38.

Чернявин П.В., Лебедев А.В., Гемонов А.В., Чистяков С.А. Изменение характеристик лесного фонда заповедника «Кологривский лес» // Научные труды государственного природного заповедника «Кологривский лес»: сб. науч. тр. Кологрив, 2017. С. 6-12.

Шевченко Н.Е. Роль *Bison bonasus* (Linnaeus, 1758) в формировании мозаики природного лесного покрова Восточной Европы. Сообщение первое. Динамика ареала и особенности трофической и топической деятельности европейского зубра в позднем голоцене на территории Восточной Европы // Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2016. Т. 1, № 2. С. 1-41. DOI: 10.21685/2500-0578-2016-2-3.

Ярыш В.Л., Ярыш Г.Е. Проблемы лесовозобновления в дубовых насаждениях на особо охраняемых территориях // Системы контроля окружающей среды. 2019. № 1(35). С. 130-135. DOI: 10.33075/2220-5861-2019-1-130-135.

Gottlieb L., Schäfer B.A., Buttenschøn R.M. European bison (*Bison bonasus*) increase plant species richness in forest habitats // Forest Ecology and Management. 2024. Vol. 561. Art. no. 121891. DOI: 10.1016/j.foreco.2024.121891.

Mills L.S., Soulé M.E., Doak D.F. The Keystone-Species Concept in Ecology and Conservation: Management and policy must explicitly consider the complexity of interactions in natural systems // BioScience. 1993. Vol. 43. P. 219-224. DOI: 10.2307/1312122.

References

Antonets N.V., Yarysh V.L. Environment-forming activity of wild Artiodactyla at the Karadag nature reserve. *100 years of the Karadag Scientific Station named after T.I. Vyazemsky*. Simferopol, 2015, pp. 361-371. (In Russ.)

Balyasny V.I. Monitoring of forests of the Prisursky State Nature Reserve for a 20-year period. *Scientific works of the Prisursky State Nature Reserve*, 2014, vol. 29, pp. 14-24. (In Russ.)

Belkin V.V., Panchenko D.V., Fedorov F.V. The influence of ungulates on forest-forming and undergrowth species in natural conditions and under semi-free maintenance. *Boreal forests: state, dynamics, ecosystem services*. Petrozavodsk, 2017, pp. 31-32. (In Russ.)

Belousova I.P. Information and analytical review and long-term plan for further activities of the Central Bison Nursery at the Prioksko-Terrasny State Biosphere Reserve of the Ministry of Natural Resources of Russia. Danki: Prioksko-Terrasny State Biosphere Reserve, 1996. 12 p. (In Russ.)

Bukharova E.V. Organization of botanical monitoring in the Barguzinsky Reserve. *Problems of botany of Southern Siberia and Mongolia*, 2012, no. 11, pp. 36-38. (In Russ.)

Chernyavin P.V., Lebedev A.V., Gemonov A.V., Chistyakov S.A. Change in the time of the forest fund of the nature reserve "Kologrivsky forest". *Scientific works of the Kologrivsky Forest State Nature Reserve*. Kologriv, 2017, pp. 6-12. (In Russ.)

Demidov V.E. The use of archive aerial images of 1941-1943 for mapping the vegetation of the Prioksko-Terrasny Nature Reserve. *One Hundred Years of Conservation: Lessons in Preservation*: collection of mat. of All-Russ. sci. conf., dedicated to 100th anniversary of Voronezh Nature Reserve. Voronezh, 2023, pp. 291-299. DOI: 10.57007/9785907669338_2023_291. (In Russ.)

Evstigneev O.I., Solonina O.V. European bison and maintenance of biodiversity of meadows (on the example of Nature Reserve "Bryansky Forest"). *Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Biological Series*, 2016, vol. 121, no. 2, pp. 59-65. (In Russ.)

Fedotova A.A. Bison bonasus bonasus as a museum exhibit in the 18th – early 20th centuries. *Proceedings of the Zoological Institute RAS*, 2018, vol. 322, no. 2, pp. 160-184. (In Russ.)

Filonov K.P. Dynamics of the number of ungulates and protected areas. Moscow: Lesnaya Promyshlennost, 1977. 231 p. (In Russ.)

Geobotanical zoning of the Nechernozemye Region of the European part of the RSFSR. Leningrad: Botanical Institute of the USSR Academy of Sciences, 1989. 63 p. (In Russ.)

Golubev O.V., Sipko T.P., Gusarov I.V., Marzanov N.S. Analysis of features of the breeding of auroch (*Bison bonasus* L.) and american bison (*Bison bison* L.) in the conditions of Prioksko-Terrasny Biospheric Reserve. *Problems of Productive Animal Biology*, 2017, no. 3, pp. 66-76. (In Russ.)

Gosteva A.A., Erunova M.G., Savchenko A.P. Geoinformation mapping of the dynamics of the forest formation composition at the Stolby restricted nature reserves. *Intercarto. Intergis*, 2018, vol. 24, no. 1, pp. 475-484. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-1-24-475-484. (In Russ.)

Gottlieb L., Schäfer B.A., Buttenschøn R.M. European bison (*Bison bonasus*) increase plant species richness in forest habitats. *Forest Ecology and Management*, 2024, vol. 561, art. no. 121891. DOI: 10.1016/j.foreco.2024.121891.

Gusev A.A. The role of wild ungulates in the functioning of biogeocenoses of the Central Black Earth Reserve: author's abstract. Diss. … Cand. Biol. Sci. Moscow, 1984. 19 p. (In Russ.)

Ivanova N.V., Smirnov V.E., Khanina L.G., Bobrovsky M.V., Shashkov M.P. Changes in Vegetation and Earthworm Populations under Free Grazing European Bison (*Bison bonasus*) in Broad-Leaved Forests of the Kaluzhskie Zaseki State Nature Reserve. *Biology Bulletin*, 2018, vol. 45, no. 1, pp. 100-109. DOI: 10.1134/S1062359018010053. (In Russ.)

Kalyakin V.N., Turubanova S.A. Changes in the species composition and distribution of key species (edificators) of the mammoth complex of Eastern Europe from the late Pleistocene to the late Holocene. *East European forests: history in the Holocene and the present*. *Book 1*. Moscow, 2004, pp. 96-118. (In Russ.)

Kharchenko N.N., Semenov M.A. Current status of ungulates community in the Central Russian Forest Steppe. *Forestry Engineering Journal*, 2013, no. 3(11), pp. 50-60. (In Russ.)

Korochkina L.N. The influence of bison on the undergrowth of woody vegetation of Belovezhskaya Pushcha. *Belovezhskaya Pushcha*, 1971, iss. 4, pp. 167-176. (In Russ.)

Kovda V.A., Kerzhentsev A.S., Zabolotskaya L.V., Gordeeva E.V. Spatial and temporal variability of the natural environment of the ecological region of Central Russia. *Biosphere Reserves*: Proceedings of the II Soviet-American Symposium. Leningrad, 1982, pp. 162-163. (In Russ.)

Kozorez A.I., Podoshvelev D.A., Klimets D.A., Burshtyn V.N. Forage capacity and the possibility of restoring megafauna in the natural complex "Krasny Bor". *Proceedings of BSTU*, 2016, no. 1(183): Forestry, pp. 254-258. (In Russ.)

Kuzmichev V.V., Bondarev A.I. Dynamics of forest ecosystems of the Stolby reserve for 60 years. *Conifers of the boreal zone*, 2009, vol. 26, no. 2, pp. 173-177. (In Russ.)

Lapin P., Gurov P., Mirzoev H. Characteristics of the bison population in the Oryol Polesie National Park. *Questions of Steppe Studies*, 2022, no. 1, pp. 70-77. DOI: 10.24412/2712-8628-2022-1-70-77. (In Russ.)

Lukina N.V., Geraskina A.P., Gornov A.V., Shevchenko N.E., Kuprin A.V., Chernov T.I., Chumachenko S.I., Shanin V.N., Kuznetsova A.I., Tebenkova D.N., Gornova M.V. Biodiversity and climate regulating functions of forests: current issues and prospects for research. *Forest Science Issues*, 2020, vol. 3, no. 4, pp. 1-90. DOI: 10.31509/2658-607x-2020-3-4-1-90. (In Russ.)

Mills L.S., Soulé M.E., Doak D.F. The Keystone-Species Concept in Ecology and Conservation: Management and policy must explicitly consider the complexity of interactions in natural systems. *BioScience*, 1993, vol. 43, pp. 219-224. DOI: 10.2307/1312122.

Pererva V.I. Breeding of wild animals. Past, present and prospects. Moscow: ITRK Publishing House, 2017. 440 p. (In Russ.)

Pilipko E.N. Evaluating the trophic role of the elk (*Alces alces* (L. 1758)) on the logging sites of the Vologda region during winter period. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy*, 2018, no. 2, pp. 211-220. (In Russ.)

Potapov S.K. History of the bison and the bison park of the Mordovian Reserve. *Mordovian Reserve*, 2012, no. 2, pp. 4-7. (In Russ.)

Potapov S.K., Borodin P.L. The role of ungulates in the Mordovian Reserve and in adjacent territories. *Proceedings of the Smolny National Park*, 2021, no. 5, pp. 132-190. (In Russ.)

Ryzhakina T.P., Novikova T.V., Shestakova S.V., Gusarov I.V. Influence of various factors on the parasitofauna in wisents living in the wild under conditions of the European North of Russia. *Current issues of veterinary biology*, 2016, no. 4(32), pp. 23-27. (In Russ.)

Savin V.V., Zaripov Yu.V., Belov L.A., Zalesova E.S., Shubin D.A. The influence of elk and roe deer on the preservation of pine and spruce forest plantations. *Agrarian Bulletin of the Urals*, 2017, no. 9 (163), pp. 52-57. (In Russ.)

Shevchenko N.E. The role of *Bison bonasus* (Linnaeus, 1758) in the mosaic formation of natural forest cover in Eastern Europe. First article. The dynamics of the area, and features of the food and topical activity of the European bison in the late Holocene in Eastern Europe. *Russian Journal of Ecosystem Ecology*, 2016, vol. 1, no. 2, pp. 1-41. DOI: 10.21685/2500-0578-2016-2-3. (In Russ.)

Sitnikova E.F. Formation of a free population of European bison in the Bryansk region. *Prospects for the creation of a free population of bison in European Russia*. Bryansk, 2013, pp. 95-104. (In Russ.)

Smirnova O.V., Zaugol'nova L.B., Korotkov V.N. Scientific basis of optimization of biodiversity function of the forest cover. *Lesovedenie*, 2015, no. 5, pp. 367-378. (In Russ.)

Sozinov O.V., Sakovich A.A., Yanchurevich O.V. Forest typological differentiation of wood-fodder stocks for ungulates in the *Bison b. bonasus* L. presence and absence (Grodno region, Belarus). *Vestnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 5: Economics. Sociology. Biology*, 2018, vol. 8, no. 3, pp. 129-144. (In Russ.)

Tekeyev D.K. Reintroduction of bison in the Teberdinsky Reserve. *Mordovian Reserve*, 2021, no. 20, pp. 22-25. (In Russ.)

Tsibizova E.L. Current state of the bison nursery of the Oka Reserve.*Mordovian Reserve*, 2021, no. 20, pp. 36-38. (In Russ.)

Yarysh V.L., Yarysh G.E. Aspects of oak-tree planting reforestation on protected nature reserve. *Environmental Monitoring Systems*, 2019, no. 1(35), pp. 130-135. DOI: 10.33075/2220-5861-2019-1-130-135. (In Russ.)

Zablotskaya M.M. Formation of the Prioksko-Terrasnyi Biosphere Reserve. *Works of the Prioksko-Terrasny Reserve*, 2018, iss. 7, pp. 25-44. (In Russ.)

Zaripov V.U., Belov L.A., Zalesova E.S., Savin V.V., Shubin D.A. Effect of wild hoofed animals on young forest stands formation. *Forests of Russia and Economy in Them*, 2017, no. 2(61), pp. 4-12. (In Russ.)

Zaugolnova L.B. Assessment and conservation of forest cover biodiversity in reserves of European Russia. Moscow: Center for Forest Ecology and Productivity Problems, Russian Academy of Sciences, 2000. 196 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 15.10.2024

Лебедев А.В., Демидов В.Э., Осипов С.А. Оценка изменения древесно-кустарниковой растительности в зубровом питомнике Приокско-Террасного заповедника // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 174–197. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.174-197

Крупные травоядные животные являются активной частью лесных биогеоценозов, участвуя в трофической и топической деятельности, в результате чего они считаются ключевыми видами, так как могут вносить значительные изменения в процессы динамики и функционирования ландшафтов. Цель исследования – выявление долговременных изменений древесно-кустарниковой растительности (древостой, подрост и подлесок) в результате воздействия копытных животных в зубровом питомнике Приокско-Террасного заповедника. Объектом исследования являются лесные земли Приокско-Террасного заповедника. Материалами для исследования послужили данные таксационных описаний на территорию питомника и граничащих с ним участков за 1946 и 2016 гг., визуальных маршрутных обследований. Проведенное исследование позволило численно оценить влияние зубров на количественные характеристики компонентов лесных фитоценозов. В зубровом питомнике с 1946 по 2015 гг. произошло снижение лесопокрытой площади (с 92,4 до 83,2%) и доли насаждений с преобладанием сосны и осины. Выявлено уменьшение площадей с выраженными ярусами подроста и подлеска, а также снижение их видового разнообразия и густоты. Наиболее уязвимыми оказались такие кормовые породы, как ель, крушина, рябина, бересклет. В условиях подавления зубрами

естественного возобновления в ближайшие десятилетия в местах отпада деревьев в перестойных насаждениях будут происходить процессы формирования открытых ландшафтов с единичными деревьями и дальнейшее снижение лесопокрытой площади. Зубры в зоне хвойно-широколиственных лесов оказывают сильное воздействие на состав и структуру растительных сообществ. При реинтродукции зубра в разные почвенно-климатические условия требуется проведение дальнейших исследований по мониторингу их влияния на компоненты лесных биогеоценозов.

Ключевые слова: зубр, зоогенный фактор, лесной фитоценоз, хвойно-широколиственные леса, Приокско-Террасный заповедник.

Lebedev A.V., Demidov V.E., Osipov S.A. Assessment of changes in tree and shrub vegetation in the bison nursery of the Prioksko-Terrasny Nature Reserve. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 174–197 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.174-197

Large herbivores are an active part of forest biogeocenoses, participating in trophic and topical activities, as a result of which they are considered key species, as they can make significant changes in the processes of landscape dynamics and functioning. The aim of the study is to identify long-term changes in tree and shrub vegetation (tree stand, young forest trees and undergrowth) as a result of the impact of ungulates in the bison nursery of the Prioksko-Terrasny Reserve. The object of the study is the forest lands of the Prioksko-Terrasny Reserve. The materials for the study were the data of forest inventory descriptions for the territory of the nursery and adjacent areas for 1946 and 2016, visual route surveys. The study made it possible to assess numerically the impact of bison on the quantitative characteristics of the components of forest phytocenoses. In the bison nursery, from 1946 to 2015, there was a decrease in the forested area (from 92.4 to 83.2%) and the proportion of stands with a predominance of pine and aspen. A decrease in areas with distinct layers of young forest trees and undergrowth, as well as a decrease in their species diversity and density, was revealed. The most vulnerable were such forage species as spruce, buckthorn, rowan, and euonymus. In the conditions of suppression of natural regeneration by bison, in the coming decades, in places of tree loss in overmature stands, processes of formation of open landscapes with single trees and a further decrease in forested area will occur. Bison in the zone of coniferous-broadleaf forests have a strong impact on the composition and structure of plant communities. When reintroducing bison to different soil and climatic conditions, further research is required to monitor their impact on the components of forest biogeocenoses.

Keywords: bison, zoogenic factor, forest phytocenosis, coniferous-broadleaf forests, Prioksko-Terrasny Reserve.

ЛЕБЕДЕВ Александр Вячеславович – доцент кафедры землеустройства и лесоводства Российского государственного аграрного университета – МСХА им. К.А. Тимирязева, доктор сельскохозяйственных наук, доцент. SPIN-код: 5789-5540. ORCID: 0000-0002-8939-942X.

127434, Тимирязевская ул., д. 49, г. Москва, Россия. E-mail: alebedev@rgau-msha.ru

LEBEDEV Aleksandr V. – DSc. (Agriculture), Associate Professor of the Department of Land Management and Forestry, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy. SPIN-code: 5789-5540. ORCID: 0000-0002-8939-942X.

127434. Timiryazevskaya str. 49. Moscow. Russia. E-mail: alebedev@rgau-msha.ru

ДЕМИДОВ Василий Эдуардович – заместитель директора по научной работе ФГБУ «Приокско-Террасный государственный заповедник». SPIN-код: 5416-3534.

142200, местечко Данки, г.о. Серпухов, Московская область, Россия. E-mail: vasdemidov@mail.ru

DEMIDOV Vasiliy E. – Deputy Director for Research at the Prioksko-Terrasny State Reserve. SPIN-code: 5416-3534.

142200. Danki. Serpukhov urban district. Moscow region. Russia. E-mail: vasdemidov@mail.ru

ОСИПОВ Сергей Александрович – студент кафедры землеустройства и лесоводства Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А. Тимирязева.

127434, Тимирязевская ул., д. 49, г. Москва, Россия.

OSIPOV Sergey A. – Student of the Department of Land Management and Forestry, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy.

127434. Timiryazevskaya str. 49. Moscow. Russia.

УДК 574.24, 631.6.02

О.Д. Пожарская, Ю.В. Хомяков

СВОЙСТВА ГИДРОГЕЛЕЙ И ФАКТОРЫ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА СКОРОСТЬ ИХ ДЕГРАДАЦИИ

Введение. Для регулирования водного режима корнеобитаемой среды растения, в том числе для предотвращения водного дефицита, обеспечения длительного и равномерного режима увлажнения почвы применяют суперабсорбирующие полимеры, или гидрогели, которые способны удерживать большой объем воды, превышающий свой собственный в несколько сотен раз. Как правило, применение гидрогеля совмещают с другими мероприятиями по увеличению плодородия почвы, что дает лучший и более пролонгированный результат [Ostrand et al., 2020]. Многочисленные исследования показывают, что применение гидрогеля обеспечивает благоприятные условия для роста и развития пересаживаемого растения [Асаматдинов, 2020; Цепляев, Непокрытый, 2023], например в исследовании [Баканева, 2023] отмечена лучшая приживаемость саженцев дуба черешчатого (*Quercus robur*) на незаливном опытном участке в пойме реки Волга. Гидрогель (полиакрилат калия) вносили в почву в гидратированном (насыщенном водой) виде при посадке саженцев, в каждую лунку вносили по 1 л геля. В исследованиях [Смирнов и др., 2021] показано положительное влияние применяемого гидрогеля на приживаемость ели европейской (*Picea abies*). Гидрогель вносили в почву в набухшем состоянии в концентрации 2 г гидрогеля в сухом виде на одну лунку. Применение гидрогеля в тропических условиях с жарким и влажным климатом и сухим летом, например, в Бразилии способствует улучшению условий роста растений. Например, добавление гидрогеля в концентрациях 1,5, 3,0 и 4,5 г $л^{-1}$ к саженцам эвкалипта (*Eucalyptus urograndis*) привело к большему росту и производству фитомассы по сравнению с контролем без гидрогеля. Обработки, уровни влажности и дозы гидрогеля в данном исследовании были организованы по полностью рандомизированной схеме. Важно подчеркнуть, что гидрогель не может заменить обычные ирригационные системы, он идет в качестве дополнения [Silva et al., 2024]. Исследования, проведенные в Испании на цитрусовых растениях, показали улучшение физиологических параметров саженцев цитрусовых и повышение их жизнеспособности [Arbona et

al., 2005]. Здесь объем гидрогеля составлял 0,2 и 0,4% от использованного объема субстрата, к которому он был дополнительно добавлен в насыщенном состоянии.

Гидрогели, как представители органических соединений, при их применении в качестве почвенного мелиоранта подвергаются воздействию как условий окружающей среды (температура, ультрафиолетовое излучение, циклы «замерзание – оттаивание», «увлажнение – высыхание», химический состав среды), так и воздействию живых организмов (почвенная фауна, почвенные микроорганизмы и др.). Полиакриламиды и полиакрилаты, наиболее распространенные соединения в производстве гидрогелей, могут содержать примеси токсичных мономеров, и есть вероятность их высвобождения в процессе деградации. Помимо химического воздействия после потери своих водопоглощающих свойств образуется твердый остаток из гидрогеля, менее доступный для биодеградации [Buchmann et al., 2024]. Рациональное применение гидрогелей должно обязательно учитывать продолжительность эффекта их применения и скорость деградации до безопасных соединений, для чего необходимо широкое экспериментальное исследование механизмов, скорости, направления деградации таких полимеров в разных условиях.

Материалы и методика исследования. Материалами для настоящего обзора послужили научные публикации российских и зарубежных ученых, находящиеся в открытом доступе.

Результаты исследования. Гидрогели представляют собой трехмерную химически или физически сшитую матрицу из линейных или разветвленных гидрофильных полимеров, где молекулы воды способны занять все доступное пустое пространство в трехмерной сети гидрогеля [Guilherme et al., 2015]. Поэтому гидрогели способны поглощать воду в 500 – 1000 раз больше их собственной сухой массы [Максимова и др., 2023].

По происхождению гидрогели делятся на синтетические, природные и полусинтетические.

Чаще всего используются синтетические гидрогели – полимеры и сополимеры акриламида и акриловой кислоты. Акриловая кислота содержит в своем составе винильный радикал и карбоксильную группу, благодаря чему происходит реакция с электрофильными агентами и свободными радикалами. Полиакрилаты синтезируются методом свободнорадикальной полимеризации из мономеров акриловой кислоты, возможно, также в сочетании с другими мономерами. Для увеличения водоудерживающей спо-

собности различных почв в несколько раз достаточно внести полиакрилатные или полиакриламидные гидрогели в дозе 0,2 – 0,3%. Водопоглощающая способность акриламида зависит как от типа частиц гидрогеля, так и от свойств самой почвы, таких как кислотность, степень засоления, гранулометрический состав [Saha et al., 2021]. В частности, водопоглощающая способность гидрогелей значительно снижается при высоком уровне ионов NO^{3-}, NH^{4+}, Na^{+}, K^{+}, Ca^{2+} или Mg^{2+} в почвенном растворе и давлением почвы на гидрогель [Oksinska et al., 2019]. Стоит отметить, что у набухшего гидрогеля проявляется ухудшение механических свойств. Одним из решений стало использование дополнительных наполнителей в качестве армирующих агентов.

Устойчивость к биодеградации находится в числе основных факторов, ограничивающих использование синтетических гидрогелей [Максимова и др., 2023]. До настоящего времени микробная деградация полиакриламидных и полиакрилатных гидрогелей остается недостаточно исследованной. Известно, что дезаминирование полиакриламида микробами является первым шагом в процессе использования полимера. Полиакрилат, который остается после дезаминирования, по-видимому, более устойчив к биодеградации, чем амидные фрагменты. Тем не менее полиакриламид и полиакрилат обрастали микроорганизмами, способными использовать их в качестве источников углерода [Nyyssola, Ahlgren, 2019]. В свою очередь, в другом исследовании сообщалось, что полиакрилатные гидрогели практически не подвергаются биодеградации и основная цепь полиакрилата разлагается в суглинистых почвах со скоростью не более 0,12-0,24% за 6 месяцев [Wilske et al., 2014].

Небольшое число исследований подтверждают, что штаммы бактерий способны использовать полиакриламид в качестве источника углерода и азота [Matsuoka et al., 2002; Oksinska et al., 2019]. В работе [Oksinska et al., 2019] сшитый полимер акрилата калия подвергается биодеградации со стороны почвенных бактерий, грибов и простейших. Штаммы *Bacillus sphaericus*, *Bacillus cereus* и *Bacillus flexus* могут разлагать полиакриламид и использовать его в качестве единственного источника углерода. Также в данном исследовании была проведена оценка потенциального фитосанитарного риска, связанного с использованием гидрогеля, которая показала, что гидрогель может быть колонизирован фитопатогенными оомицетами из рода *Phytophthora*. В исследовании [Максимова и др., 2017] была изучена амидазная активность почвы при добавлении полиакриламида. При инкубации с аллювиальной почвой в течение 38 недель масса полиакрилами-

да заметно снизилась, до 37%. При инкубации с суглинистой почвой и песчаником никаких изменений массы не наблюдалось. В эксперименте [Liang et al., 2018] отмечалось, что фактическая потеря веса полиакрилата превышала 1,77% в течение двенадцати месяцев эксперимента. Полиакрилат со временем становился рыхлым, и за время эксперимента в него проникли неорганические вещества почвы, металлы, питательные элементы, в связи с чем авторы предположили, что в конечном итоге внесенный полиакрилат может стать элементом почвы.

Абиотические факторы помогают микроорганизмам в разложении синтетических гидрогелей. Из-за поглощения УФ-излучения происходит разрыв связей амидных функциональных групп, после чего короткие отрезки полимера разрушаются микробиотой почвы. В исследовании [Смагин и др., 2014] было рассчитано, что полное разложение полиакрилатного гидрогеля произойдет при температуре 37^{o}C за 1,8 – 4,3 года, в результате того, что эта температура является оптимумом для группы микроорганизмов, осуществляющих разложение.

Постоянные изменения температуры и влажности почвы приводят к тому, что частицы гидрогеля находятся в динамическом состоянии замораживания и оттаивания, высыхания и повторного увлажнения; обработка и уплотнение почвы способствуют образованию твердых остатков гидрогеля [Buchmann et al., 2024]. Мелкие частицы более подвижны в почве и способны переместиться в более глубокие горизонты, но при этом они подвергаются трению и истиранию, и, возможно, происходит их дальнейшая фрагментация [Buchmann et al., 2024].

В работе [Bai et al., 2015] показано как влияют свойства самих гидрогелей на биодоступность. Во-первых, линейная полиакриловая кислота в гидрогелях подвержена большей деградации, чем сшитая полиакриловая кислота, во-вторых, скорость биодеградации удваивается при уменьшении средней молекулярной массы полиакриловой кислоты на 50%.

Природные гидрогели. Природные гидрогели синтезируются на основе полисахаридов: пектина, крахмала, хитина, гуаровой камеди, целлюлозы, альгината, циклодекстрина, ксантана, хитозана, – а также лигнина, сложного полимерного соединения. Такие гидрогели нерастворимы в воде, способны поглощать большой объем воды: например, 1 г гидрогеля, синтезированного из поли(АН)-крахмала, поглощает 563 г дистиллированной воды [Холназаров и др., 2019]; 1 г сухого гидрогеля на основе альгината поглощает 55 г дистиллированной воды [Максимова и др., 2023]. В зависимости от целей использования гидрогелей выбирается более подходя-

щий природный материал и определенным образом адаптируется синтез, поэтому степень набухания гидрогелей из природных компонентов будет различаться в каждом варианте. Проблема использования только природных материалов при производстве гидрогеля заключается в том, что такой гидрогель слишком быстро подвергнется деградации и пролонгированного эффекта не будет, а это главная цель использования гидрогелей. В гидрогели на основе полисахаридов можно добавлять лигнин, его более сложная структура создает проблему для большинства микробных организмов, поэтому он позволит гидрогелю оставаться устойчивым более длительное время [Adjuik et al., 2023]. В зависимости от того, в каких пропорциях в гидрогель добавлены лигнин и, например, крахмал, можно регулировать продолжительность устойчивости к биодеградации. Если вегетационный период длится более 5 месяцев, то можно отдать предпочтение меньшему содержанию крахмала и большему содержанию лигнина; если вегетационный период длится меньше 5 месяцев, то наоборот нужно добавлять меньше лигнина и больше крахмала [Adjuik et al., 2023].

Для гидрогеля из природных компонентов не всегда возможна полная деградация любыми микроорганизмами. В работе [Leštan et al., 1998] проверялась механическая прочность гидрогелевых пленок альгината при температурном воздействии. Стерилизация проводилась в течение 10 мин при 120°С, это приводило к снижению механической прочности гелевых матриц, вероятно, из-за расщепления мономерных единиц гидрогеля, что положительно влияло на рост мицелия *Irpex lacteus*, но при этом стерилизация и pH альгинатного гидрогеля не оказали существенного влияния на рост фрагментов мицелия *Trametes versicolor*.

Полусинтетические гидрогели. Полусинтетические гидрогели синтезируются из составляющих синтетического и природного происхождения: хитозан и полиакриламид, поливиниловый спирт и крахмал и т.д. Слабым звеном в таком объединении компонентов является природное вещество. В работе [Жансенгир, Садыкова, 2023] отмечено, что при производстве гидрогеля на основе поливинилового спирта и крахмала при увеличении содержания крахмала механические свойства гидрогеля снижаются. Полусинтетические гидрогели обладают хорошей водоудерживающей способностью и за счет добавления синтетического материала более устойчивы к биоразложению, чем природные гидрогели.

При добавлении гидрогеля в почву увеличивается ее водопоглощающая способность, уменьшается частота полива за счет снижения испарения и инфильтрации, тем самым предотвращается сток воды и эрозия, а также

увеличивается аэрация почвы и микробная активность [Zohuriaan-Mehr et al., 2010]. Гидрогель используется для иммобилизации регуляторов роста растений, удобрений или защитных агентов для контролируемого высвобождения без потерь в окружающей среде. Все это способствует лучшей приживаемости саженцев древесных растений, укоренению рассады и, соответственно, увеличению биомассы необходимых культур. Гидрогели используются для рекультивации почв или, например, для улучшения песчаных почв, они придают им почти все свойства пахотных земель [Azzam, 1985].

Для чистоты эксперимента по изучению биодоступности гидрогелей необходимо исключить другие факторы воздействия. Открытым остается вопрос, как стерилизовать гидрогель, чтобы это не являлось температурным фактором воздействия [Смагин и др., 2014; Leštan et al., 1998].

Без стерилизации эксперимент может проводиться путем добавления по-разному меченых ^{13}C гидрогелей в пробы почвы. В таком случае процесс деградации измеряется с помощью оттока $^{13}CO_2$ [Wilske et al., 2014; Bai et al., 2015]. Без добавления радиоактивной метки также можно инкубировать пробы и затем измерять поток CO_2, выделяемый в качестве конечного продукта биоминерализации, по которому можно количественно определить биодеградацию, например, лигнина и оксилированного лигнина в гидрогелях [Lars et al., 2015].

Уникальной способностью к деградации лигнина и широкого спектра загрязнителей окружающей среды обладают грибы белой гнили [Bumpus et al., 1985]. Например, гриб белой гнили *Phanerochaete chrysosporium* продуцирует два типа пероксидаз, которые являются лигнин- и марганецзависимыми. Целлобиоза дегидрогеназа является основной внеклеточной редуктазой. Эти ферменты могут использовать марганец, железо и ряд низкомолекулярных метаболитов в качестве медиаторов в последующих окислительно-восстановительных реакциях для катализа деградации загрязняющих веществ. Преимущество такого непрямого механизма окисления заключается в том, что только окислительно-восстановительные медиаторы непосредственно взаимодействуют с активными участками фермента. Непрямой механизм окисления позволяет окислять широкий спектр химических веществ, включая полимеры, поэтому использование культур грибов является еще одним перспективным способом изучения биодеградации гидрогелей [Stahl et al., 2000].

В исследовании [Phang et al., 2011] проводились испытания по биодеградации гидрогеля при погружении его в надосадочную жидкость или

почвенный раствор с добавлением питательных веществ и без. Для стимулирования биодеградации можно дополнительно вносить питательные вещества. В исследовании сравнивались процентные потери веса гидрогеля на основе альгината, включающего термоустойчивые добавки, в первые 10 дней инкубации. Были обнаружены большие различия в скорости деградации между образцами почвы с добавлением и без добавления питательных веществ. Это указывает на то, что при первом добавлении питательных веществ микроорганизмы в образце почвы стали более активными и значительно увеличились в количестве. Однако меньшие различия в скорости деградации наблюдались после 40 дней инкубации. Это было связано с конкуренцией за питательное вещество между популяциями микроорганизмов и, таким образом, подавляло скорость роста микроорганизмов, которые могут деградировать образец полимера. В результате более низкая скорость деградации может наблюдаться в образце с полимерами в присутствии питательного вещества, особенно при длительном периоде инкубации, как это было обнаружено в этом исследовании. Биодеградация оценивалась путем измерения потери веса гидрогеля.

Биодеградацию гидрогелей можно изучать с помощью прямого захоронения гидрогеля в почву [Phang et al., 2011]. В качестве материала для размещения гидрогеля можно использовать мешочки из геотекстиля. Биодеградация может оцениваться путем измерения потери веса гидрогеля в определенный промежуток времени.

Сдерживающим фактором повсеместного использования гидрогеля, в дополнение к пробелам в исследовании его разложения в почве, является его стоимость. Это будет экономически выгодно, только когда стоимость получаемой дополнительной продукции и снижение затрат на орошение превысят затраты на закупку и внесение гидрогеля. При внесении гидрогеля вместе с минеральными удобрениями повышается их эффективность. В работе [Годунова, Оганян, 2023] проведен расчёт экономической окупаемости применения гидрогеля при выращивании сельскохозяйственных культур. Отмечено, что для расширения масштабов использования гидрогеля необходимо снизить его стоимость на 30-40% для окупаемости применения хотя бы малых доз.

Выводы. Такие разные результаты исследований, представленных в обзоре, говорят о том, что в природных системах все взаимосвязано, и даже если полимеры не оказывают прямого негативного воздействия, они всегда могут проявлять косвенное влияние. Такие сети взаимодействий природных компонентов между собой очень сложны для исследования, что делает изу-

чение влияния гидрогелей на природную среду, в частности, на почву, достаточно непростой задачей. Лабораторный эксперимент, который моделирует все факторы, оказывающие влияние на гидрогели в почве в естественных условиях, создать невозможно, поэтому ученые могут проверять воздействие каждого фактора по отдельности. Следует выстроить эксперимент так, чтобы оставить один фактор и исключить другие. На сегодняшний день очевидным является то, что для применения гидрогеля в естественных условиях он должен быть полностью биодоступным. Необходимо проводить дальнейшие исследования по изучению возможных путей деградации гидрогелей в почве, потому что применение гидрогелей действительно является перспективным направлением, и точно определить, является ли такой способ улучшения свойств почвы безопасным с точки зрения защиты окружающей среды и одновременно экономически выгодным.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Асаматдинов, А.О. Влияние гидрогелей на продуктивность саженцев в различных почвах // Природопользование и охрана природы: Охрана памятников природы, биологического и ландшафтного разнообразия Томского Приобья и других регионов России: мат. IX Всерос. с межд. уч. науч.-практ. конф. Томск, 2020. С. 137-143. DOI: 10.17223/978-5-94621-954-9-2020-33.

Баканева А.А. Посадка дуба черешчатого *Quercus robur* L. однолетними и двулетними саженцами с использованием гидрогеля // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2023. Т. 18, №. 4. С. 508-519.

Годунова Е.И., Оганян Л.Р. Экономическая эффективность применения гидрогеля в условиях неустойчивого увлажнения центрального Предкавказья // Земледелие. 2023. №. 5. С. 18-22.

Жансенгир Е., Садыкова Р. Разработка получения полимерных материалов на основе крахмала для фиторемедиации почв // Лучшая исследовательская работа 2023: сб. ст. II Межд. науч.-иссл. конкурса. Петрозаводск, 2023. С. 226-234.

Максимова Ю.Г., Горшкова А.А., Демаков В.А. Биодеградация полиакриламидов почвенной микрофлорой и штаммами амидазосодержащих бактерий //Вестник Пермского университета. Серия: Биология. 2017. №. 2. С. 200-204.

Максимова Ю.Г., Щетко В.А., Максимов А.Ю. Полимерные гидрогели в сельском хозяйстве //Сельскохозяйственная биология. 2023. Т. 58, №. 1. С. 23-42.

Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Смагина М.В. Биодеструкция сильнонабухающих полимерных гидрогелей и ее влияние на водоудерживающую способность почв //Почвоведение. 2014. №. 6. С. 716-723.

Смирнов А.И., Никитин В.Ф., Генералова А.А., Аксенов П.А. Приживаемость и морфологические особенности саженцев ели европейской (*Picea abies*), обработанных низкочастотным электромагнитным полем и посаженных с внесением гидрогеля//Лесной вестник/Forestry bulletin. 2021. Т. 25, №. 5. С. 22-29.

Холназаров Б.А., Тураев Х.Х., Холмуродова С.А., Джалилов А.Т. Синтез и характеристика гидрогелей на основе сополимеров крахмала // Universum: технические науки. 2019. № 11-3(68). С. 62-66.

Цепляев А.Н., Непокрытый Р.А. Энергоресурсосберегающие технологии посадки картофеля в орошаемом земледелии с использованием модернизированной картофелесажалки // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2023. № 1(69). С. 472-482.

Adjuik T.A., Nokes S.E., Montross M.D. Biodegradability of bio-based and synthetic hydrogels as sustainable soil amendments: A review // Journal of Applied Polymer Science. 2023. Vol. 140, no. 12. Art. no. e53655.

Arbona V., Iglesias J.D., Jacas J., Primo-Millo E., Talon M., Gomez-Cadenas A. Hydrogel Substrate Amendment Alleviates Drought Effects on Young Citrus Plants // Plant and Soil. 2005. Vol. 270, no. 1. P. 73–82.

Azzam R.A.I. Tailoring polymeric gels for soil reclamation and hydroponics // Communications in soil science and Plant Analysis. 1985. Vol. 16, no. 10. P. 1123-1138.

Bai M., Wilske B., Buegger F., Esperschütz J., Bach M., Frede H.-G., Breuer L. Relevance of nonfunctional linear polyacrylic acid for the biodegradation of superabsorbent polymer in soils // Environ. Sci. Pollut. Res. 2015. Vol. 22. P. 5444–5452. DOI: 10.1007/s11356-014-3772-0.

Buchmann C., Neff J., Meyer M., Bundschuh M., Steinmetz Z. Superabsorbent polymers in soil: The new microplastics? // Cambridge Prisms: Plastics. 2024. Vol. 2. No. e3. P. 1-14.

Bumpus J.A., Tien M., Wright D., Aust S.D. Oxidation of persistent environmental pollutants by a white rot fungus // Science. 1985. Vol. 228, no. 4706. P. 1434-1436.

Guilherme M.R., Aouada F.A., Fajardo A.R., Martins A.F., Paulino A.T., Davi M.F., Rubira A.F., Muniz E.C. Superabsorbent hydrogels based on polysaccharides for application in agriculture as soil conditioner and nutrient carrier: A review // European Polymer Journal. 2015. Vol. 72. P. 365-385.

Lars P., Till H., Ernst B., Gisela C., Sascha L., Ute H. Biodegradation of Hydrogels from Oxyethylated Lignins in Model Soils // ACS Sustainable Chemistry and Engineering. 2015. Vol. 3, iss. 9. P. 1955-1964.

Leštan D., Leštan M., Lamar R.T. Growth and viability of mycelial fragments of white-rot fungi on some hydrogels // Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology. 1998. Vol. 20, no. 3-4. P. 244-250.

Liang D., Du C., Ma F., Shen Y., Wu K., Zhou J. Degradation of polyacrylate in the outdoor agricultural soil measured by FTIR-PAS and LIBS // Polymers. 2018. Vol. 10, iss. 12. Art. no. 1296. DOI: 10.3390/polym10121296.

Matsuoka H., Ishimura F., Takeda T., Hikuma M. Isolation of polyacrylamide-degrading microorganisms from soil // Biotechnology and bioprocess engineering. 2002. Vol. 7. P. 327-330.

Nyyssola A., Ahlgren J. Microbial degradation of polyacrylamide and the deamination product polyacrylate // International Biodeterioration & Biodegradation. 2019. Vol. 139. P. 24-33.

Ostrand M.S., DeSutter T.M., Aaron L.M.D., Limb R.F., Steele D.D. Superabsorbent polymer characteristics, properties, and applications // Agrosystems, Geosciences & Environment. 2020. Vol. 3, no. 1. Art. no. e20074.

Oksinska M.P., Magnucka E.G., Lejcus K., Jakubiak-Marcinkowska A., Ronka S., Trochimczuk A.W., Pietr S.J. Colonization and biodegradation of the cross-linked potassium polyacrylate component of water absorbing geocomposite by soil microorganisms // Applied Soil Ecology. 2019. Vol. 133. P. 114-123.

Phang Y.N., Chee S.Y., Lee C.O., Teh Y.L. Thermal and microbial degradation of alginate-based superabsorbent polymer // Polymer degradation and stability. 2011. Vol. 96, no. 9. P. 1653-1661.

Saha A., Rattan B., Sekharan S., Manna U. Quantifying the combined effect of pH and salinity on the performance of water absorbing polymers used for drought management // Journal of Polymer Research. 2021. Vol. 28. P. 1-14.

Silva J.S., Braulio C.D.S., Jesus D.S.D., Leite E.D.S., Nóbrega R.S.A., Martins R.P., Nóbrega J.C.A. Hydrogel associated with soil moisture levels in the cultivation of *Eucalyptus urograndis* //Ciência Florestal. 2024. Vol. 34. Art. no. e73403.

Stahl J.D., Cameron M.D., Haselbach J., Aust S.D. Biodegradation of superabsorbent polymers in soil // Environmental Science and Pollution Research. 2000. Vol. 7. P. 83-88.

Wilske B., Bai M., Lindenstruth B., Bach M., Rezaie Z., Frede H.-G., Breuer L. Biodegradability of a polyacrylate superabsorbent in agricultural soil // Environmental Science and Pollution Research. 2014. Vol. 21. P. 9453-9460.

Zohuriaan-Mehr M.J., Omidian H., Doroudiani S., Kabiri K. Advances in non-hygienic applications of superabsorbent hydrogel materials // Journal of materials science. 2010. Vol. 45. P. 5711-5735.

Reference

Adjuik T.A., Nokes S.E., Montross M.D. Biodegradability of bio-based and synthetic hydrogels as sustainable soil amendments: A review. *Journal of Applied Polymer Science*, 2023, vol. 140, no. 12, art. no. e53655.

Arbona V., Iglesias J.D., Jacas J., Primo-Millo E., Talon M., Gomez-Cadenas A. Hydrogel Substrate Amendment Alleviates Drought Effects on Young Citrus Plants. *Plant and Soil*, 2005, vol. 270, no. 1, pp. 73–82.

Asamatdinov A. O. Influence of hydrogels on the productivity of seedlings in various soils. *Nature management and environmental protection: protection of natural*

monuments, biological and landscape diversity of the Tomsk Priobye and other regions of Russia: Proceedings of the IX All-Russ. sci.-pract. conf. with int. part. Tomsk, 2020, pp. 137-143. DOI: 10.17223/978-5-94621-954-9-2020-33. (In Russ.)

Azzam R.A.I. Tailoring polymeric gels for soil reclamation and hydroponics. *Communications in soil science and Plant Analysis*, 1985, vol. 16, no. 10, pp. 1123-1138.

Bai M., Wilske B., Buegger F., Esperschütz J., Bach M., Frede H.-G., Breuer L. Relevance of nonfunctional linear polyacrylic acid for the biodegradation of superabsorbent polymer in soils. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2015, vol. 22, pp. 5444–5452. DOI: 10.1007/s11356-014-3772-0.

Bakaneva A.A. Planting pedunculate oak (*Quercus robur L.*) with one-year-old and two-year-old seedlings using hydrogel. *RUDN: Journal of Agronomy and animal Industries*, 2023, vol. 18, no. 4, pp. 508-519. (In Russ.)

Buchmann C., Neff J., Meyer M., Bundschuh M., Steinmetz Z. Superabsorbent polymers in soil: The new microplastics? *Cambridge Prisms: Plastics*, 2024, vol. 2, no. e3, pp. 1-14.

Bumpus J.A., Tien M., Wright D., Aust S.D. Oxidation of persistent environmental pollutants by a white rot fungus. *Science*, 1985, vol. 228, no. 4706, pp. 1434-1436.

Godunova E.I., Oganyan L.R. Economic efficiency of hydrogel application under unstable moisture conditions in the Central Ciscaucasia. *Agriculture*, 2023, no. 5, pp. 18-22. (In Russ.)

Guilherme M.R., Aouada F.A., Fajardo A.R., Martins A.F., Paulino A.T., Davi M.F., Rubira A.F., Muniz E.C. Superabsorbent hydrogels based on polysaccharides for application in agriculture as soil conditioner and nutrient carrier: A review. *European Polymer Journal*, 2015, vol. 72, pp. 365-385.

Kholnazarov B.A., Turaev K.Kh., Kholmurodova S.A., Jalilov A.T. Synthesis and characterization of hydrogels based on starch copolymers. *Universum: Technical Sciences*, 2019, no. 11-3(68), pp. 62–66. (In Russ.)

Lars P., Till H., Ernst B., Gisela C., Sascha L., Ute H. Biodegradation of Hydrogels from Oxyethylated Lignins in Model Soils. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 2015, vol. 3, iss. 9, pp. 1955-1964.

Leštan D., Leštan M., Lamar R.T. Growth and viability of mycelial fragments of white-rot fungi on some hydrogels. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 1998, vol. 20, no. 3-4, pp. 244-250.

Liang D., Du C., Ma F., Shen Y., Wu K., Zhou J. Degradation of polyacrylate in the outdoor agricultural soil measured by FTIR-PAS and LIBS. *Polymers*, 2018, vol. 10, iss. 12, art. no. 1296. DOI: 10.3390/polym10121296.

Maksimova Y.G., Gorshkova A.A., Demakov V.A. Biodegradation of polyacrylamides by soil microflora and amidase-containing bacterial strains. *Perm University Bulletin. Biology Series*, 2017, no. 2, pp. 200-204. (In Russ.)

Maksimova Y. G., Shchetko V. A., Maksimov A. Y. Polymer hydrogels in agriculture. *Agricultural Biology*, 2023, vol. 58, no. 1, pp. 23–42. (In Russ.)

Matsuoka H., Ishimura F., Takeda T., Hikuma M. Isolation of polyacrylamide-degrading microorganisms from soil. *Biotechnology and bioprocess engineering*, 2002, vol. 7, pp. 327-330.

Nyyssola A., Ahlgren J. Microbial degradation of polyacrylamide and the deamination product polyacrylate. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2019, vol. 139, pp. 24-33.

Oksinska M.P., Magnucka E.G., Lejcus K., Jakubiak-Marcinkowska A., Ronka S., Trochimczuk A.W., Pietr S.J. Colonization and biodegradation of the cross-linked potassium polyacrylate component of water absorbing geocomposite by soil microorganisms. *Applied Soil Ecology*, 2019, vol. 133, pp. 114-123.

Ostrand M.S., DeSutter T.M., Aaron L.M.D., Limb R.F., Steele D.D. Superabsorbent polymer characteristics, properties, and applications. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 2020, vol. 3, no. 1, art. no. e20074.

Phang Y.N., Chee S.Y., Lee C.O., Teh Y.L. Thermal and microbial degradation of alginate-based superabsorbent polymer. *Polymer degradation and stability*, 2011, vol. 96, no. 9, pp. 1653-1661.

Saha A., Rattan B., Sekharan S., Manna U. Quantifying the combined effect of pH and salinity on the performance of water absorbing polymers used for drought management. *Journal of Polymer Research*, 2021, vol. 28, pp. 1-14.

Silva J.S., Braulio C.D.S., Jesus D.S.D., Leite E.D.S., Nóbrega R.S.A., Martins R.P., Nóbrega J.C.A. Hydrogel associated with soil moisture levels in the cultivation of *Eucalyptus urograndis*. *Ciência Florestal*, 2024, vol. 34, art. no. e73403.

Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Smagina M.V. Biodestruction of superabsorbent polymer hydrogels and its impact on the water retention capacity of soils. *Soil Science*, 2014, no. 6, pp. 716-723. (In Russ.)

Smirnov A.I., Nikitin V.F., Generalova A.A., Aksenov P.A. Survival and morphological features of Norway spruce (*Picea abies*) seedlings treated with a low-frequency electromagnetic field and planted with hydrogel application. *Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 5, pp. 22-29. (In Russ.)

Stahl J.D., Cameron M.D., Haselbach J., Aust S.D. Biodegradation of superabsorbent polymers in soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 2000, vol. 7, pp. 83-88.

Tseplyaev A.N., Nepokryty R.A. Energy- and resource-saving technologies for planting potatoes in irrigated agriculture using a modified potato planter. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University complex: science and higher professional education*, 2023, no. 1(69), pp. 472-482. (In Russ.)

Wilske B., Bai M., Lindenstruth B., Bach M., Rezaie Z., Frede H.-G., Breuer L. Biodegradability of a polyacrylate superabsorbent in agricultural soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, vol. 21, pp. 9453-9460.

Zhansengir E., Sadykova R. Development of polymer materials based on starch for phytoremediation of soils. *Best research work 2023*: Proceedings of the II International Research Competition. Petrozavodsk, 2023, pp. 226–234. (In Russ.)

Zohuriaan-Mehr M.J., Omidian H., Doroudiani S., Kabiri K. Advances in non-hygienic applications of superabsorbent hydrogel materials. *Journal of materials science*, 2010, vol. 45, pp. 5711-5735.

Материал поступил в редакцию 15.12.2024

Пожарская О.Д., Хомяков Ю.В. Свойства гидрогелей и факторы внешней среды, влияющие на скорость их деградации // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 198–212. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.198-212

Водный дефицит является глобальной проблемой для многих сфер деятельности, включая сельское хозяйство и лесомелиоративные работы, которые необходимы для улучшения водного режима почв, уменьшения эрозии и увеличения содержания органического вещества в почве. Сельское хозяйство и лесомелиорация нуждаются в технологиях улучшения водообеспеченности культур и саженцев после пересадки. В качестве такой технологии используют суперабсорбирующие полимеры, или гидрогели. Область применения гидрогелей достаточно широкая: помимо перечисленного, они используются в медицине, строительстве, для очистки сточных вод и рекультивации. Находясь в корнеобитаемом слое, гидрогель накапливает влагу, а затем продолжительное время высвобождает ее, тем самым поддерживая водный баланс прикорневой зоны. Необходимо понимать, что гидрогель, внесенный в почву, остается там настолько, насколько он устойчив к микробиологическому разложению. При этом, оставаясь в почве, гидрогель может утратить свои свойства набухания, то есть потенциально может храниться в почве долгое время, потеряв свои свойства, и придется добавлять новую дозу гидрогеля. Учитывая продолжающееся применение гидрогеля и его постоянное попадание в окружающую среду, особенно в почву, крайне важно знать об устойчивости гидрогеля к биодеградации. Поскольку наше текущее понимание фрагментации гидрогелей в почве ограничено и часто основано на теоретических соображениях, крайне важно исследовать конкретные условия окружающей среды, а также свойства самих гидрогелей, которые определяют его судьбу в почве и его влияние на функционирование экосистемы.

Ключевые слова: водный дефицит, гидрогель, почва, микроорганизмы, биодеградация.

Pozharskaya O.D., Khomyakov Yu.V. Properties of Hydrogels and Environmental Factors Affecting Their Degradation Rate. *Izvestia Sankt-*

Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii, 2025, iss. 256, pp. 198–212 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.198-212

Water scarcity represents a critical global issue for many areas of activity, including agriculture and forest reclamation, both of which are pivotal for optimizing soil water regimes, mitigating erosion and enhancing soil organic matter content. For instance, forest reclamation activities require advanced technologies to improve water availability for transplanted seedlings. One such approach involves the application of superabsorbent polymers, commonly referred to as hydrogels. Hydrogels exhibit a broad spectrum of applications, spanning medicine, agriculture, construction, wastewater treatment, and land reclamation. Within the root zone, hydrogels function as moisture reservoirs, absorbing water and releasing it gradually over extended periods, thereby stabilizing the water balance in the rhizosphere. However, it is critical to acknowledge that once introduced into the soil, hydrogels persist for a duration dictated by their resistance to microbial degradation. Over time, they may lose their swelling capacity, potentially remaining in the soil in a degraded state, necessitating the periodic supplementation of new hydrogel doses. Given the continued utilization of hydrogels and their recurrent introduction into the environment, particularly into soils, it is imperative to evaluate their resistance to biodegradation. Considering that our current knowledge regarding hydrogel fragmentation in soils is limited and predominantly theoretical, it is essential to investigate specific environmental conditions and properties of the hydrogels themselves, that govern the fate of hydrogels in soil systems and their implications for ecosystem functionality.

K e y w o r d s : water scarcity, hydrogel, soil, microorganisms, biodegradation.

ПОЖАРСКАЯ Олеся Дмитриевна – аспирант кафедры общей экологии, анатомии и физиологии растений Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194024, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия;

младший научный сотрудник Санкт-Петербургского научного центра РАН. ORCID: 0000-0003-2091-905X.

199034, Университетская наб., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: olesyapozharskaya@yandex.ru

POZHARSKAYA Olesya D. – PhD student of the Ecology, Anatomy and Physiology of Plants Department, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia;

research assistant of St. Petersburg Research Center of the Russian Academy of Science. ORCID: 0000-0003-2091-905X.

199034. Universitetskaya emb. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: olesyapozharskaya@yandex.ru

ХОМЯКОВ Юрий Викторович – доцент кафедры общей экологии, анатомии и физиологии растений Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194024, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия;

заведующий лабораторией биохимии почвенно-растительных систем Агрофизического НИИ. AuthorID: 601515.

195220, Гражданский пр., д. 14, Санкт-Петербург, Россия.

KHOMYAKOV Yuriy V. – Associate Professor of the Ecology, Anatomy and Physiology of Plants Department, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia;

head of the Laboratory of Biochemistry of Soil and Plant Systems of the Agrophysical Research Institute.

195220. Grazhdanskiy av. 14. St. Petersburg. Russia.

УДК 360*2

**Д.Ю. Капиталинин, П.А. Тищенко, В.М. Сидоренков,
Ю.С. Ачиколова, Д.О. Астапов, О.В. Рябцев, Р.В. Щекалев**

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕЙ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ВАЛИДАЦИИ МАТЕРИАЛОВ ЛЕСОУСТРОЙСТВА ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ СЪЁМКИ

Введение. Развитие современных технологий в области искусственного интеллекта приводит к глобальному изменению систем управления в различных сферах народного хозяйства. Одним из перспективных направлений в области лесной таксации является совершенствование технологий получения информации о лесах с использованием данных спутниковой съемки и наземной таксации. В практическом плане нейросети, обучаясь на большом массиве данных, представляют нестандартный подход в решении сложной задачи классификации природных объектов, в том числе определении их количественных и качественных характеристик. Ранее проведённые исследования показывают, что нейросети способны выявлять сложные зависимости и закономерности в данных, которые могут быть не учтены при применении стандартных статистических методов анализа данных [Сидоренков и др., 2018; Марков, Мачука, 2024; Мельников и др., 2024; Abadi, 2016]. По сути, интеграция нейросетей в алгоритмы лесотаксационного дешифрирования данных спутниковой съемки представляет собой следующий шаг в эволюции лесотаксационных технологий.

В настоящее время эффективные системы на базе нейросетей могут использоваться для автоматизации процессов дешифрирования данных спутниковой съемки по выявлению изменений лесной растительности, вызванных воздействием на леса негативных природных (ветровалы, буреломы, пожары, повреждение вредителями или болезнями леса) или антропогенных (вырубки, застройка территорий, геологическое освоение недр) факторов [Богодухов и др., 2024; Иванов и др., 2024; Марков, Мачука, 2024; Мельников и др., 2024; Marques et al., 2024; Brandt et al., 2025]. Приведенные примеры относятся к области решения задач лесопатологического мониторинга лесов, мониторинга воспроизводства и использования лесов.

Использование технологий искусственного интеллекта в прикладном аспекте для проверки данных лесоустройства является частью процесса, который включает элементы разработки нейросети:

- набор данных полевых исследований и их анализ на предмет ошибок с их исключением;
- подбор материалов оптической спутниковой съемки;
- обучение нейросети на материалах полевых исследований, валидация данных лесоустройства;
- апробация технологии по проверке полученных данных.

Перечисленные этапы технологии являются отдельными элементами, которые также должны быть выполнены с четким соблюдением установленных нормативно-законодательных требований к получению полевых данных о лесах, обработке материалов спутниковой съемки, разработке нейросети, её обучению и проведению валидации. Получение полевых данных таксации осуществляется в соответствии с Лесоустроительной инструкцией[1] по методам в зависимости от разряда лесоустройства. Представленные в работе материалы получены по первому разряду таксации с использованием методов инструментальных измерений. Обработка материалов спутниковой съемки осуществлялась по общепринятым методам с проведением геометрической и атмосферной коррекции данных. Геометрическая коррекция данных проводилась по опорным точкам, полученным на местности или с использованием картографического материала.

Методика проведения работ. Основной целью в рамках проведения работы являлось создание технологии валидации данных лесоустройства. Достижение поставленной цели решалось многоступенчатым анализом материалов лесоустройства, которые использовали в работе как основной источник информации. До осуществления проверки исключались насаждения с ветровалами, буреломами и другими негативными процессами природного характера. Их определение проводилось с использованием алгоритмов компьютерного зрения. В дальнейшем эти участки также сравнивались с данными лесоустройства и при несовпадении отмечались как ошибки.

Материалы лесоустройства получены при проведении работ в 2025 г. Для принятия их Департаментом лесного хозяйства по ЦФО были организованы проверочные мероприятия в рамках установленного лесоустроительной

[1] Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ «Об утверждении Лесоустроительной инструкции» от 5 августа 2022 г. №510.

инструкцией регламента. Проверка материалов лесоустройства проведена с учетом отсеивания выбросов, которые невозможно было объяснить с использованием математических моделей роста леса, созданных по таблицам хода роста с учетом изменения таксационных показателей при различном возрасте, полноте, бонитете насаждений. В основу математических моделей заложены алгоритмы множественной полиноминальной регрессии. Взаимосвязи получены с использованием программного обеспечения Statistica 13. В работе использованы математические модели с коэффициентом корреляции между прогнозными значениями и показателями из таблиц хода роста, превышающим значение $R = 0,9$, и коэффициентом значимости $p < 0,05$.

Другой механизм проверки данных был построен на моделях множественной полиномиальной регрессии связи таксационных показателей со спектрально-отражательными характеристиками лесных насаждений. В модели введены также показатели бонитета насаждений, как практически не изменяющегося с течением времени фактора. Основной задачей предварительной обработки данных являлось исключение участков с возможными ошибками для очистки данных таксации и проведения последующего обучения нейросети. Этот процесс – часть технологии, позволяющей осуществить обучение нейросети на данных с минимальным содержанием ошибок.

Результаты предварительного анализа данных показали выбросы, которые в большинстве случаев были связаны с ошибками таксации или особенностями не учитываемых при проведении лесоустройства природных процессов, таких как ветровалы, деградация лесов из-за негативных природных процессов. Последующее обучение нейросети осуществлялось на очищенных данных. Матрица таких данных представляет собой набор таксационных показателей верхнего яруса насаждения, совмещенных со спектрально-отражательными характеристиками снимка. Спектрально-отражательные характеристики рассчитывались как средние значения по выделу. При значительном различии спектрально-отражательных характеристик в пределах выдела (более 30%), например, на прогалинах или фрагментах других насаждений, эти данные исключались. Такая ситуация в процессе проведения лесоустройства иногда складывается при таксации больших выделов, которые могут быть неоднородны, и таксатор может не попасть в часть выдела, где возможен ветровал, бурелом, воздействие вредителей и болезней леса.

Реализация задачи по формированию матрицы данных требовала проведения предварительной подготовки материалов спутниковой съемки. Предварительная подготовка материалов съемки, полученной с отечественных аппаратов, осуществлялась на основе алгоритмов DOS (*Dark Object*

Subtraction) атмосферной коррекции – коррекции по темному объекту [Zhang et al., 2010]. Ключевая идея метода заключается в том, что влияние атмосферы можно приблизительно оценить и вычесть из общего сигнала. На любом спутниковом снимке существуют абсолютно черные объекты (*Dark Objects*) – пиксели, которые имеют практически нулевую отражательную способность в определенном диапазоне длин волн (например, глубокая чистая вода в ближнем инфракрасном диапазоне, густая тень, темные крыши). Любой сигнал от таких пикселей считается следствием рассеяния атмосферы (путь аэрозолей) и должен быть вычтен из всего изображения. К положительным аспектам метода можно отнести простоту использования алгоритма, высокую эффективность расчета по времени. К недостаткам метода относится сильное упрощение при расчетах, так как метод предполагает, что атмосферное рассеивание одинаково по всей сцене, что не всегда бывает так, особенно при сложном рельефе. Возникают также сложности точного обнаружения истинно черного объекта в автоматическом режиме: минимальные значения на гистограмме могут быть обусловлены тенью облаков или ошибкой сенсора. Для минимизации отрицательных моментов использовались данные съемки за один проход.

Работа со съёмкой с иностранных аппаратов Sentinel-2 позволила применить атмосферно скорректированные данные на основе сложного алгоритма Sen2Cor [Main-Knorn et al., 2017], разработанного специалистами Европейского космического агентства.

Основная задача алгоритма Sen2Cor [Sen2Cor…, 2025] – выполнение атмосферной коррекции. Он преобразует данные Top-Of-Atmosphere (TOA) (уровень L1C) в данные Bottom-Of-Atmosphere (BOA) поверхностной отражательной способности (уровень L2A). Это означает удаление влияния атмосферы (рассеяние аэрозолей, водяного пара, озона и др.) для получения «чистых» значений от самой поверхности Земли. Помимо основной атмосферной коррекции, он также создает ряд вспомогательных продуктов, которые включены в сцену L2A:

- карта классификации облаков, теней облаков и снега/льда (Scene Classification Map – SCL). Это один из ключевых выходных продуктов, критически важный для последующего анализа;
- индексы AOT (оптическая толщина аэрозолей) и WVP (содержание водяного пара);
- карты географической привязки (GEOM).

Схема работы алгоритма Sen2Cor представлена на рис. 1.

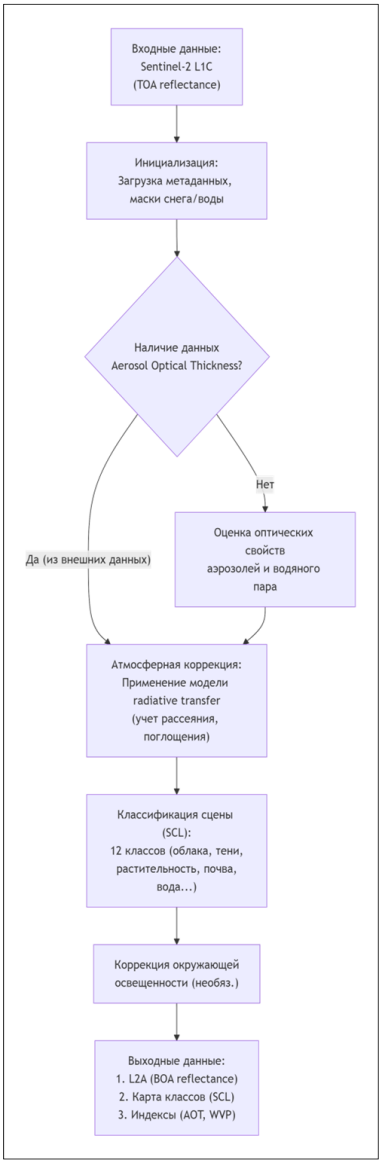


Рис. 1. Схема работы алгоритма Sen2Cor
Fig. 1. Operation scheme of the Sen2Cor algorithm

Sen2Cor является центральным и ключевым звеном полного унифицированного рабочего процесса (pipeline) обработки снимков Sentinel-2 для получения готового к аналитике продукта L2A. Целиком рабочий процесс выглядит так: Level-1C (TOA) → Sen2Cor → Level-2A (BOA + SCL + AOT и др.) → (опционально) дальнейшая обработка (мозаика, обрезка, расчёт индексов и т.д.). Этапы последующей обработки (рис. 2):

1. Передискретизация каналов с 20-метрового пространственного разрешения до 10-метрового (если вы хотите работать с красным, зелёным, синим и ближним инфракрасным диапазонами);
2. Обрезка изображений до области интереса (ROI);
3. Применение карты классификации сцен (SCL) к изображениям с отражательной способностью для маскировки дефектных пикселей.

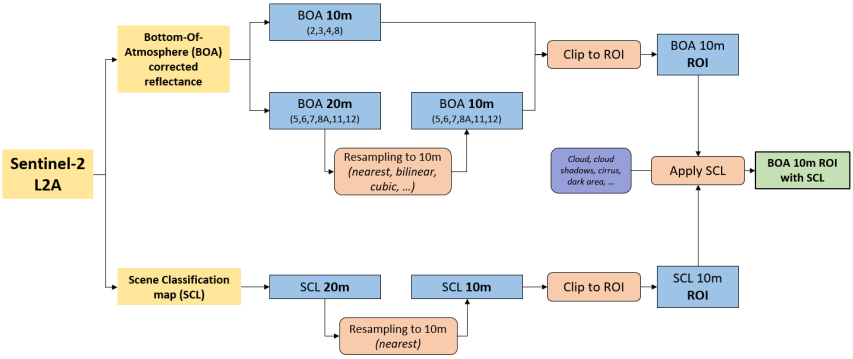


Рис. 2. Схема последующей обработки данных Sentinel-2 уровня L2A
Fig. 2. Sentinel-2 level L2A data post-processing scheme

Результаты обработки спутниковых данных показали, что атмосферно скорректированные данные спутниковой съемки даже за близкие даты не обеспечивают получение количественных и качественных показателей лесов без ошибок. Несмотря на значительные успехи в области теоретической проработки вопроса атмосферной коррекции, в практическом плане он не доведен до использования с учетом точных методов и технологий анализа на основе спектрально-отражательных характеристик объектов. С учетом вышесказанного дешифрирование данных съемки возможно только при обработке сцен, полученных за одну дату (без переноса модели на другие даты). Данная особенность является сдерживающим фактором для экстраполяции технологии на сходные территории. Анализ территории

возможен при наличии наземных данных и оптической спутниковой съемки [Сидоренков и др., 2018, 2022a, b].

Для автоматизации процесса валидации лесотаксационных данных сотрудниками НЦ ОМЗ, ФБУ ВНИИЛМ и ФГБУ «Рослесинфорг» разработано специализированное программное обеспечение, которое в тестовом варианте названо «Геотрон.Лес-валидация». Оно интегрировано с геоинформационной платформой (ГИП) «Геотрон» (разработка АО «Российские космические системы»). Программное обеспечение представляет собой геоинформационный web-сервис с возможностью загрузки данных лесоустройства и материалов спутниковой съёмки через сеть Интернет и их последующей автоматической обработки.

Сервис состоит из модулей, показанных на рис. 3.

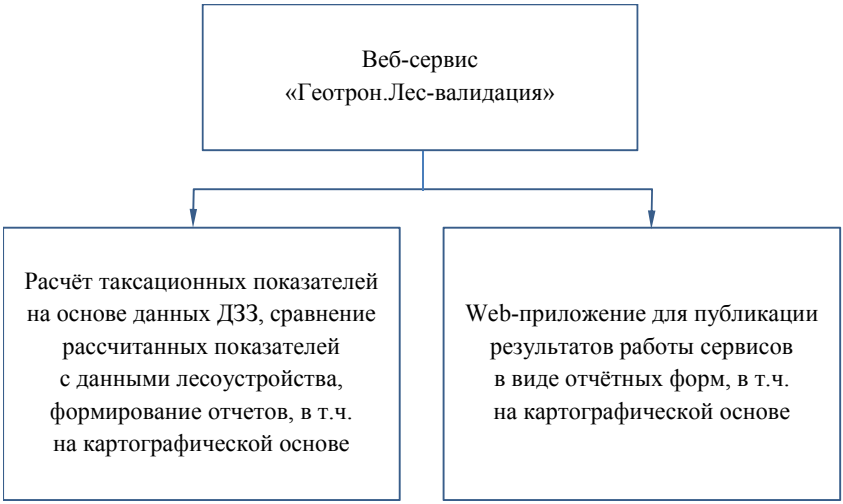


Рис. 3. Схема основных модулей сервиса «Геотрон.Лес-валидация»
Fig. 3. Diagram of the “Geotron.Forest validation” service main modules

При валидации данных лесоустройства рассматриваются следующие параметры насаждения: относительная полнота, запас, возраст, преобладающая порода.

Исходными данными для работы сервиса являются материалы лесоустройства в формате Esri shapefile, содержащие полигоны-границы выделов с привязанной атрибутивной информацией. Атрибуты должны содержать следующие поля:

- KV (номер квартала);

- SKNR (номер выдела);
- VMR (преобладающая порода);
- BON (бонитет);
- AMZ1 (возраст);
- SKAL1 (относительная полнота);
- TUR1H1 (запас яруса на 1 га).

В программное обеспечение можно загрузить данные космической съемки на обследуемую территорию с аппаратов «Канопус-В» с уровнем обработки 2В (мультиспектральные данные), Sentinel-2 с уровнем обработки L2A. Сервис использует для работы 4 канала: R, G, B (видимый диапазон) и NIR (ближний инфракрасный). В случае Sentinel-2 используются каналы видимого спектра и инфракрасный канал с разрешением съемки 10 м.

Интеграция исходных данных в программный комплекс осуществляется с использованием специально разработанного сервиса, в котором происходит проверка данных на корректность ввода и содержания необходимой атрибутивной информации (рис. 4).

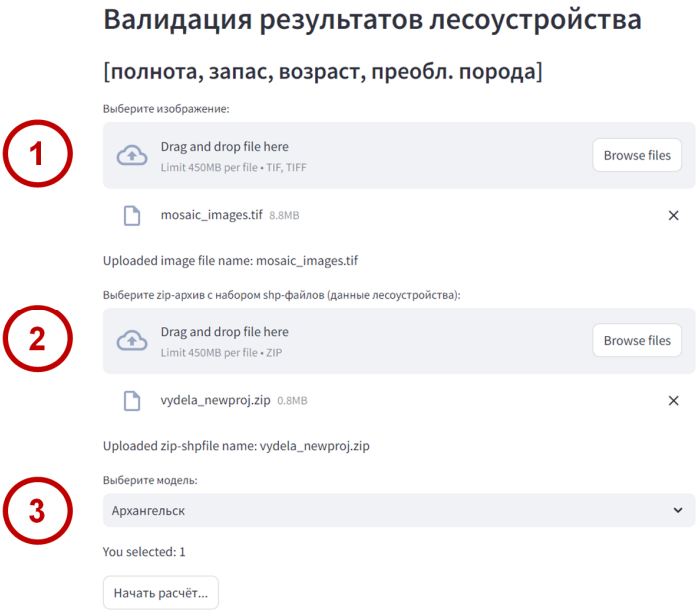


Рис. 4. Форма для внесения исходных данных
Fig. 4. Form for entering initial data

Внесение данных предполагает указание пути к расположению файла или файлов спутниковой съемки на территорию исследований (1), а также расположение архива с данными лесоустройства в формате Esri shapefile (2) и выбор заранее обученной модели при ее наличии (3).

Обучающая выборка состоит из средних значений спектральной яркости в диапазонах видимого и инфракрасного спектра пикселей в границах каждого выдела для каждого канала (т.е. включает четыре значения), а также входных данных – таксационных показателей (бонитет, относительная полнота, запас, возраст насаждений, преобладающая порода). Результат создания обучающей выборки формируется в текстовый файл (рис. 5).

При работе программы в случае отсутствия обученной модели происходит ее генерация. Обучение модели производится на основе созданной матрицы данных, в дальнейшем модель используется в определении основных таксационных показателей. В разработанном программном обеспечении есть возможность автоматической генерации модели, а также подбора параметров экспертом.

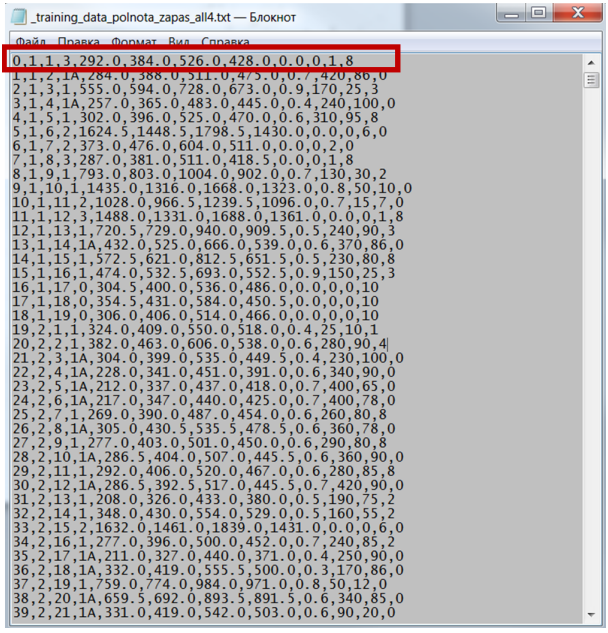


Рис. 5. Обучающая выборка, каждая строка соответствует одному выделу
Fig. 5. Training sample, each line corresponds to one map unit

В качестве основной библиотеки для работы и обучения нейросетевых моделей был использован open-source фреймворк TensorFlow для машинного обучения, разработанный международной корпорацией Google [Abadi, 2016]. Он предоставляет гибкие инструменты для создания, обучения и развёртывания нейронных сетей и других моделей машинного обучения. Также использовался Keras – высокоуровневый API (*Application Programming Interface*, программный интерфейс приложений) для нейронных сетей, изначально разработанный как отдельная библиотека, но со временем интегрированный в TensorFlow. Преимуществом библиотеки Keras является интуитивно понятный и простой API, что позволяет быстро создавать и тестировать различные модели.

После проведения обучения нейросети она используется для определения таксационных показателей, на заключительном этапе рассчитывается «delta» – разница между данными из лесоустроительной документации и данными, рассчитанными с помощью нейросети. Количественная величина различия фактического показателя и показателя, определённого нейросетью, заносится в атрибуты каждого выдела. Таким образом, появляется возможность отобрать данные с отклонениями по запасу, полноте, возрасту насаждений, превышающие определённый порог от средней величины по выделу. При выполнении работ отклонение от средних таксационных показателей по запасу насаждений составило 30%, по относительной полноте насаждения – 0,2 единицы. По преобладающей породе отклонением считалось различие между породой насаждения, прогнозируемой моделью, и установленной при проведении таксации.

Реализация вычислений в геоинформационной системе дает возможность быстрого отображения границ выделов с критическими отклонениями по запасу, относительной полноте, возрасту и породе насаждения (рис. 6). Существует также возможность скачать результат на накопитель данных для дальнейшей верификации при проверке лесоустройства в районе выполнения работ.

Валидация данных лесоустройства выполнена для территории Меленковского участкового лесничества (Владимирская область). Результаты работы программы автоматически выводятся в виде картографического материала, на котором зеленым цветом выделены расчетные значения по модели и желтым – данные лесоустройства (рис. 7–10). Картографический вывод материала дает возможность сразу провести оценку результатов, особенно на территориях с ошибками по полноте (рис. 6) и запасу (рис. 8) насаждений. Значительные отклонения по этим показателям характерны для редин, прогалин, участков, пройденных различными видами выборочных рубок, ветровалов и буреломов.

Рис. 6. Отображение результатов в Геоинтеграционной платформе «Геотрон»
Fig. 6. Display of results in the Geotron software

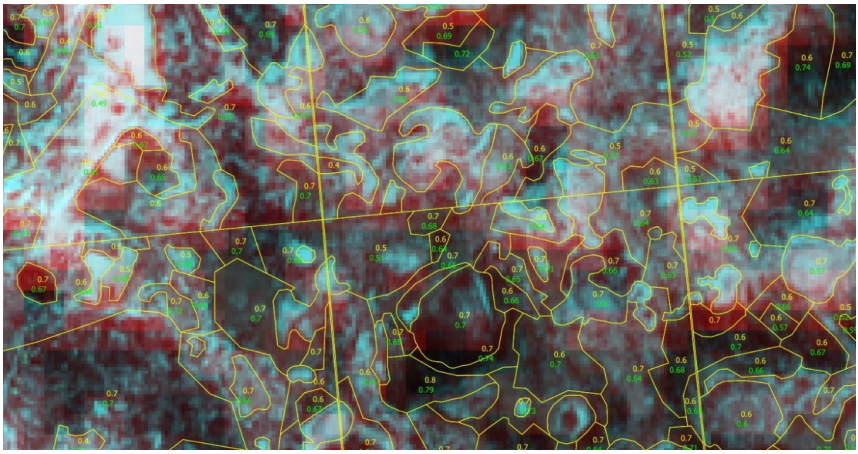


Рис. 7. Пример результатов работы сервиса (Меленковское уч. лесничество). Жёлтым цветом показаны исходные данные лесоустройства (поле «Skal1»), зелёным – рассчитанные с помощью нейросети значения полноты

Fig. 7. Example of the software output (Melenkovskoye forestry district). The initial forest management data (field «Skal1») are shown in yellow, and the forest density values calculated using the neural network are shown in green

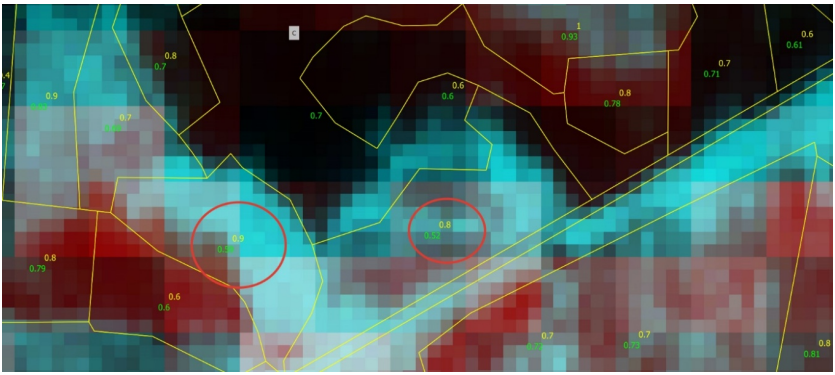


Рис. 8. Пример выявления несоответствий (Меленковское уч. лесничество). Полнота по данным лесоустройства = 0,7

Fig. 8. Example of identifying discrepancies (Melenkovskoye forestry district). Completeness according to forest management data = 0,7

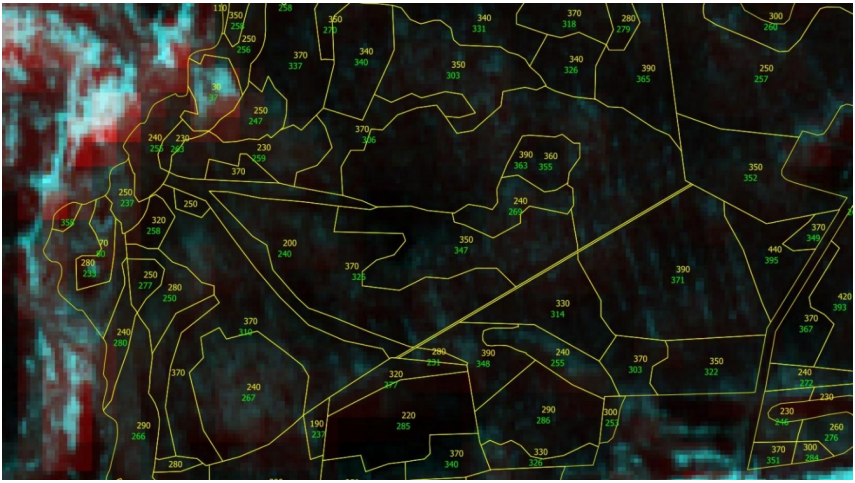


Рис. 9. Пример результатов работы сервиса (Меленковское уч. лесничество). Жёлтым цветом показаны исходные данные лесоустройства, зелёным – рассчитанные с помощью нейросети значения запаса

Fig. 9. Example of the software output (Melenkovskoye forestry district). The initial forest management data (field «TUR1H1») are shown in yellow, and the stock volume values calculated using the neural network are shown in green

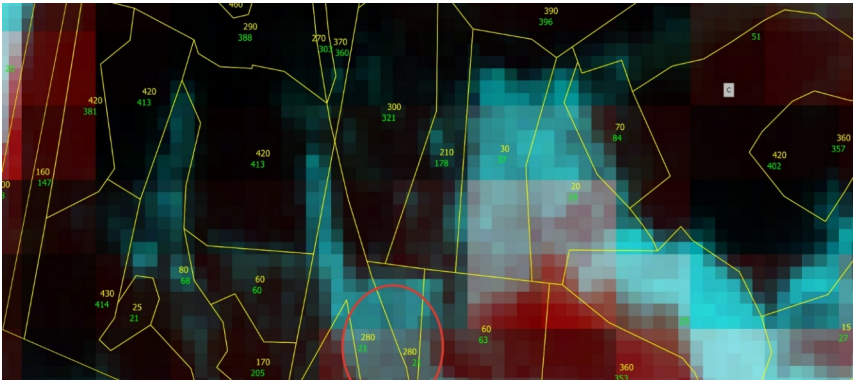


Рис. 10. Пример выявления несоответствий по запасу (Меленковское уч. лесничество), выделено красным

Fig. 10. Example of identifying discrepancies in stock volume (Melenkovskoye forestry district), marked in red

Практическая апробация модели на территории Меленковского лесничества показала, что значительная часть расхождения между материалами лесоустройства и реальной ситуацией в лесу характерна для сложных насаждений, где в составе участвует несколько пород. Большая часть исследуемых участков, где наблюдалось расхождение с материалами лесоустройства, относится к молоднякам и средневозрастным насаждениям, сформированным на местах бывших вырубок, где частично были созданы культуры, а на оставшейся территории в результате естественных процессов возобновились мелколиственные породы. Часто при таксации такие участки из-за разного состава насаждений ошибочно относились или к хвойному, или к лиственному хозяйству. К другому классу объектов, на которых при проведении лесоустройства часто наблюдались ошибки по запасу и полноте, можно отнести редкостойные (с относительной полнотой от 0,3 до 0,5) приспевающие и спелые древостои с различным породным составом первого яруса.

Обсуждение. Результаты анализа проведенного эксперимента по валидации данных лесоустройства на территории Меленковского участкового лесничества Владимирской области показали, что точность обучения и работы нейросети возрастает при использовании данных большого количества выделов. Количество выделов менее одной тысячи штук может при-

водить к некорректному результату. Приемлемые результаты получаются при количестве выделов, превышающем пять тысяч штук. Исходя из числа выделов, разработанная технология позволяет получить хорошие результаты по валидации на территории, превышающей площадь более десяти тысяч гектаров, что сравнимо с площадью одного участкового лесничества в центральной части России.

Исследование технологий на базе систем искусственного интеллекта и эксперименты по их внедрению в практику лесоустройства продемонстрировали сложный путь от разработки алгоритма нейросети, выявления специфики подготовки полевых и спутниковых данных к обучению нейросети и созданию производственной технологии на базе программного обеспечения. Интеграция технологии в практику лесного хозяйства – это сложный процесс, который требует проверки полученных результатов в полевых условиях. Тем не менее технологии искусственного интеллекта становятся неотъемлемой частью системы проведения лесоустроительных работ не только в части проверки данных, но и в части таксации, принятия решений по назначению лесохозяйственных мероприятий. Применение нейросетей в области лесоустройства открывает новые горизонты по развитию направления лесоустройства с использованием данных спутниковой съемки в части автоматизации процессов получения таксационных показателей лесов, выделения территорий, подверженных различным видам повреждений леса из-за воздействия природных и антропогенных факторов. На современном этапе для обучения нейросетей пока еще требуются наземные данные, но с увеличением объема информации, в том числе расширения базы данных материалов лесоустройства, появится возможность использовать обученные нейросети для дешифрирования различных типов лесов. Другим важным направлением, которое требует исследований, является необходимость совершенствования технологии атмосферной коррекции данных спутниковой съемки с целью формирования единой основы массива данных для обучения нейросетей.

В части совершенствования технологии валидации данных лесоустройства с использованием нейросетей планируется доработка программного обеспечения в следующих направлениях:

- объединение разрозненных данных (полевые таксационные описания, аэрофотоснимки, LiDAR, мультиспектральная съёмка, исторические данные, картографические материалы) в единую платформу с чёткой структурой метаданных;

• анализ исторических данных с пометкой ошибок;

• выявление несоответствий границ выделов ситуации, представленной на космическом снимке, и проведение соответствующей коррекции;

• анализ топологии выделов, проверка геометрии (разрывы, самопересечения, наложения, некорректные соседства типов леса и т.д.), устранение ошибок;

• выявление незамеченных гарей, ветровалов, рубок;

• применение методов повышения резкости изображений;

• дополнение обучающей выборки данными по рельефу (уклон, экспозиция, почвенные данные, климатические индексы и т.д.);

• внедрение интерактивных систем обратной связи, позволяющих пользователям оперативно сообщать о возможных ошибках и недостатках автоматически обработанных данных.

Реализация перечисленных рекомендаций позволит значительно повысить качество и надёжность процессов технологии валидации данных лесоустройства, сократить временные затраты на проверку и обработку материалов, а также минимизировать риски возникновения ошибок при принятии управленческих решений в сфере охраны и рационального использования лесных ресурсов.

Заключение. С каждым годом технологии по использованию нейросетей становятся более совершенными, а возможности их применения в решении сложных задач расширяются. Не вызывает сомнений, что уже в ближайшем будущем мы увидим новые алгоритмы, способные решать за-дачи не только таксации лесных экосистем, но и моделирования их роста в зависимости от разных факторов.

Вклад авторов. Капиталинин Д.Ю. – руководство проведением экспериментальных работ, текст статьи; Тищенко П.А. – разработка ПО автоматизации алгоритмов лесотаксационного дешифрирования и валидации данных лесоустройства; Сидоренков В.М. – разработка методики и алгоритмов лесотаксационного дешифрирования и валидации материалов лесоустройства, текст статьи; Ачиколова Ю.С. и Щекалев Р.В. – научно-методическое сопровождение эксперимента, текст статьи; Астапов Д.О. – обработка данных лесоустройства и материалов лесотаксационного дешифрирования, подготовка данных спутниковой съемки к анализу; Рябцев О.В. – апробация материалов эксперимента, закладка пробных площадей в точках с критическим отклонением расчетных данных по модели с материалами лесоустройства.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Богодухов М.А., Барталев С.А., Жарко В.О. Исследование возможностей распознавания преобладающих пород леса с использованием регрессионной оценки долевого участия пород по запасу на основе данных Sentinel-2 и материалов пробных площадей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: мат. 22-й Межд. конф. М., 2024. С. 159.

Иванов С.В., Сидоренков В.М., Ачиколова Ю.С., Астапов Д.О., Тищенко П.А., Буряк Л.В., Рыбкин А.С. Возможности использования данных группировки спутников ДЗЗ стран БРИКС для решения тематических задач получения информации о лесных экосистемах // Лесохозяйственная информация. 2024. № 4. С. 42-55.

Марков Н.Г., Мачука К.Р. Модели и методы глубокого обучения для решения задач дистанционного мониторинга лесных ресурсов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335, № 6. С. 55-74.

Мельников А.В., Полищук Ю.М., Русанов М.А., Аббазов В.Р., Кочергин Г.А., Куприянов М.А., Байсалямова О.А., Соколов О.И. Сравнительный анализ нейросетевых моделей для картографирования лесных рубок по летним космическим снимкам // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 5. С. 806-814.

Сидоренков В.М., Мартынюк А.А., Сережкин А.В. Использование данных спутниковой съемки Sentinel 2 для оценки характеристик лесной растительности таежных лесов // Экологические и биологические основы повышения продуктивности и устойчивости природных и искусственно возобновленных экосистем: мат. межд. науч. конф. Воронеж, 2018. С. 103-115.

Сидоренков В.М., Астапов Д.О., Перфильева О.В., Рябцев О.В., Рыбкин А.С. Определение таксационных показателей чистых насаждений сосны по данным спутника «Канопус-В» // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2022a. Т. 9, № 2. С. 36-43.

Сидоренков В.М., Астапов Д.О., Рыбкин Е.С., Ачиколова Ю.С., Рябцев О.В. Возможности использования спутниковой съемки с космического аппарата Метеор-М для определения количественных и качественных характеристик лесов // Лесохозяйственная информация. 2022b. № 2. С. 5-12.

Abadi M. TensorFlow: learning functions at scale // Proceedings of the 21st ACM SIGPLAN International Conference on Functional Programming: ICFP 2016. N.-Y., 2016. P. 1.

Brandt M., Chave J., Li S., Fensholt R., Ciais P., Wigneron J.-P., Gieseke F., Saatchi S., Tucker C.J., Igel C. High-resolution sensors and deep learning models for tree resource monitoring // Nature Reviews Electrical Engineering. 2025. Vol. 2, no. 1. P. 13-26.

Main-Knorn M., Pflug B., Louis J., Debaecker V., Müller-Wilm U., Gascon F. Sen2Cor for Sentinel-2 // Proceedings of SPIE. 2017. Vol. 10427. P. 37-48.

Marques T., Carreira S., Miragaia R., Ramos J., Pereira A. Applying deep learning to real-time UAV-based forest monitoring: Leveraging multi-sensor imagery for improved results // Expert Systems with Applications. 2024. Vol. 245: Applying deep learning to real-time UAV-based forest monitoring. P. 107-123.

Sen2Cor. Science Toolbox Exploitation Platform // European Space Agency. URL: https://step.esa.int/main/snap-supported-plugins/sen2cor/ (дата обращения: 10.06.2025).

Zhang Z., He G., Wang X. A practical DOS model-based atmospheric correction algorithm // International Journal of Remote Sensing. 2010. Vol. 31. P. 2837-2852.

References

Abadi M. TensorFlow: learning functions at scale. *Proceedings of the 21st ACM SIGPLAN International Conference on Functional Programming: ICFP 2016*. New York, 2016, p. 1.

Bogodukhov M.A., Bartalev S.A., Zharko V.O. Study of the possibilities of recognizing predominant forest species using regression assessment of the share of species by stock based on Sentinel-2 data and materials from sample plots. Current problems in remote sensing of the Earth from space: mat. of 22nd int. conf. Moscow, 2024, p. 159. (In Russ.)

Brandt M., Chave J., Li S., Fensholt R., Ciais P., Wigneron J.-P., Gieseke F., Saatchi S., Tucker C.J., Igel C. High-resolution sensors and deep learning models for tree resource monitoring. *Nature Reviews Electrical Engineering*, 2025, vol. 2, no. 1, pp. 13-26.

Ivanov S.V., Sidorenkov V.M., Achikolova Yu.S., Astapov D.O., Tishchenko P.A., Buryak L.V., Rybkin A.S. Possibilities of using data from the BRICS remote sensing satellite constellation to solve thematic issues of obtaining information on forest ecosystems. *Forestry information*, 2024, no. 4, pp. 42-55. (In Russ.)

Main-Knorn M., Pflug B., Louis J., Debaecker V., Müller-Wilm U., Gascon F. Sen2Cor for Sentinel-2. *Proceedings of SPIE*, 2017, vol. 10427, pp. 37-48.

Markov N.G., Machuka K.R. Deep learning models and methods for solving problems of forest resources remote monitoring. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources engineering*, 2024, vol. 335, no. 6, pp. 55-74. (In Russ.)

Marques T., Carreira S., Miragaia R., Ramos J., Pereira A. Applying deep learning to real-time UAV-based forest monitoring: Leveraging multi-sensor imagery for improved results. *Expert Systems with Applications*, 2024, vol. 245: Applying deep learning to real-time UAV-based forest monitoring, pp. 107-123.

Melnikov A.V., Polischuk Yu.M., Rusanov M.A., Abbazov V.R., Kochergin G.A., Kupriyanov M.A., Baysalyamova O.A., Sokolov O.I. Comparative analysis of neural network models for mapping forest cuttings based on summer space images. *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol.24, no. 5, pp. 806-814.

Sen2Cor. Science Toolbox Exploitation Platform // European Space Agency. URL: https:.step.esa.int/main/snap-supported-plugins/sen2cor/ (accessed June 10, 2025)

Sidorenkov V.M., Martynyuk A.A., Serezhkin A.V. Using Sentinel-2 satellite imagery data to assess the characteristics of forest vegetation in taiga forests. *Ecological and biological foundations for increasing the productivity and sustainability of natural and artificially restored ecosystems*: proceedings of the int. sci. conf. Voronezh, 2018, pp. 103-115. (In Russ.)

Sidorenkov V.M., Astapov D.O., Perfilyeva O.V., Ryabtsev O.V., Rybkin A.S. Determination of forest characteristics of pure pine stands based on Kanopus-V imagery data. *Rocket and Space Instrumentation and Information Systems*, 2022a, vol. 9, no. 2, pp. 36-43. (In Russ.)

Sidorenkov V.M., Astapov D.O., Rybkin E.S., Achikolova I.S., Ryabtsev O.V. Possibilities of using satellite imagery from the Meteor-M spacecraft to determine the quantitative and qualitative forests characteristics. *Forestry information*, 2022b, no. 2, pp. 5-12.

Zhang Z., He G., Wang X. A practical DOS model-based atmospheric correction algorithm. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, vol. 31, pp. 2837-2852.

Материал поступил в редакцию 16.09.2025

Капиталинин Д.Ю., Тищенко П.А., Сидоренков В.М., Ачиколова Ю.С., Астапов Д.О., Рябцев О.В. Щекалев Р.В. Использование нейросетей глубокого обучения для автоматической валидации материалов лесоустройства по данным спутниковой съёмки // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 213–233. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.213-233

В статье рассматривается применение нейросетей глубокого обучения для проверки таксационных показателей лесов, полученных при проведении лесоустройства. Авторами разработана технология верификации данных лесоустройства, основанная на использовании оптических спутниковых снимков высокого разрешения, обработка которых происходит посредством нейросетей. В качестве исходных данных взяты снимки территории Меленковского участкового лесничества Владимирской области с аппаратов Sentinel-2, проведена атмосферная коррекция с помощью алгоритма Sen2Cor. Автоматизация процесса лесотаксационного дешифрирования снимков выполнена в программном обеспечении «Геотрон. Лес-валидация» – специализированном геоинформационном ресурсе, разработанном сотрудниками НЦ ОМЗ, ФБУ ВНИИЛМ и ФГБУ «Рослесинфорг». Для обучения нейросетевых моделей использовались библиотеки TensorFlow и Keras, обучающая выборка основана на средних значениях пикселей в границах каждого выдела для каждого канала. После обучения нейросеть определяет таксационные показатели для каждого выдела, а также выдает разницу между данными из лесоустроительной документации и рассчитанными с помощью

нейросети, что позволяет выявить отклонения по запасу, полноте, возрасту насаждений. Работа модели продемонстрировала, что значительная часть неточных данных по лесоустройству характерна для сложных насаждений с несколькими породами в составе, а также для редкостойных приспевающих и спелых древостоев с различным породным составом первого яруса. Результат проведенного эксперимента показал, что точность обучения и работы нейросети напрямую зависит от объема данных, в частности, количества выделов, по которым происходит обучение. Приемлемые результаты получаются при количестве выделов, превышающем 5000 штук. Исходя из этого, разработанная технология позволяет получить хорошие результаты по валидации результатов лесоустройства на территории, превышающей площадь 10 тысяч гектаров, что сравнимо со средней площадью одного участкового лесничества в центральной части России.

Ключевые слова: лесоустройство, таксационные показатели, глубокое обучение, нейросеть, спутниковая съемка, TensorFlow, Keras.

Kapitalinin D.Yu., Tishchenko P.A., Sidorenkov V.M., Achikolova I.S., Astapov D.O., Ryabtsev O.V. Shchekalev R.V. Applying deep learning neural networks for automatic validation of forest management materials based on satellite imagery. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 213–233 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.213-233

The article discusses the use of deep learning neural networks to verify forest taxation indicators obtained during forest management. The authors have designed a technology for verifying forest management data based on the high-resolution optical satellite images processed applying neural networks. The initial data were images of the Melenkovskoye forestry district in the Vladimir region taken from Sentinel-2 satellites; atmospheric correction was performed with the Sen2Cor algorithm. The process of forest taxation interpretation of images was automated with the «Geotron. Forest Validation» software, a specialized geoinformation resource developed by the NC OMZ, FBU VNIILM and FGBU “Roslesinforg”. The TensorFlow and Keras libraries were used to train the neural network models; the training sample was based on the average pixel values within the boundaries of each plot for every channel. After training, the neural network determined forest characteristics for each section, and also gave the difference between the forest management documentation data and those calculated by the neural network; this allowed identifying deviations in the stock volume, forest density, and stands age. The model's operation demonstrated that a significant portion of inaccurate forest management data is typical for complex stands with several species in the composition, as well as for sparse maturing and mature stands with different species composition of the first tier. The study result showed that the accuracy of neural network training and operating directly depends on the of data amount, in particular, the number of sections for which training occurs. Acceptable results are obtained with a sections number exceeding 5,000 pieces. Considering this, the developed technology allows obtaining good results in validating

forest management data on an area exceeding 10 thousand hectares, which is comparable to the average area of one forestry district in the central part of Russia.

Keywords: forest management, forest characteristics, deep learning, neural network, satellite imagery, TensorFlow, Keras.

КАПИТАЛИНИН Дмитрий Юрьевич – и.о. директора ФГБУ «Рослесинфорг». ORCID: 0009-0001-5489-9192.

109316, Волгоградский пр., д. 45, стр. 1, г. Москва, Россия. E-mail: kapitalinin.d@yandex.ru

KAPITALININ Dmitry Yu. – Acting Director of the Federal State Budgetary Institution «Roslesinforg». ORCID: 0009-0001-5489-9192.

109316. Volgogradsky av. 45, build. 1. E-mail: kapitalinin.d@yandex.ru

ТИЩЕНКО Павел Александрович – начальник сектора НЦ ОМЗ АО «Российские космические системы»

27490, ул. Декабристов, вл. 51, стр. 25, г. Москва, Россия. E-mail: tishenko_pa@ntsomz.ru

TISHCHENKO Pavel A. – Head of department, NC OMZ, JSC Russian Space Systems.

27490. Dekabristov str. 51, build. 25. Moscow. Russia. E-mail: tishenko_pa@ntsomz.ru

СИДОРЕНКОВ Виктор Михайлович – и. о. директора Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства, кандидат сельскохозяйственных наук. ORCID: 0000-0003-4189-1906. SPIN-код: 6071-2570.

141202, Институтская ул., д. 15, г. Пушкино, Московская обл., Россия. E-mail: lesvn@yandex.ru

SIDORENKOV Viktor M. – PhD (Agriculture), Acting Director of the All-Russian Scientific Research Institute of Forestry and Forestry Mechanization. ORCID: 0000-0003-4189-1906. SPIN-code: 6071-2570.

141202. Institutskaya str. 15. Pushkino. Moscow region. Russia. E-mail: lesvn@yandex.ru

АЧИКОЛОВА Юлия Сергеевна – заведующая лабораторией динамики леса Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства, кандидат сельскохозяйственных наук. ORCID: 0000-0002-7937-5061. SPIN-код: 2270-4644.

141202, Институтская ул., д. 15, г. Пушкино, Московская обл., Россия. E-mail: pipintook@yandex.ru

ACHIKOLOVA Iuliia S. – Head of Forest Dynamics Laboratory of the All-Russian Scientific Research Institute of Forestry and Forestry Mechanization. ORCID: 0000-0002-7937-5061. SPIN-code: 2270-4644.

141202. Institutskaya str. 15. Pushkino. Moscow region. Russia. E-mail: pipintook@yandex.ru

АСТАПОВ Даниил Олегович – заведующий лабораторией лесоустройства и лесной таксации Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства. ORCID: 0000-0003-4189-1906. SPIN-код: 6489-9193.

141202, Институтская ул., д. 15, г. Пушкино, Московская обл., Россия. E-mail: astdann09@yandex.ru

ASTAPOV Daniil O. – Head of the Laboratory of forest management and forest taxation of the All-Russian Scientific Research Institute of Forestry and Forestry Mechanization. ORCID: 0000-0003-4189-1906. SPIN-code: 6489-9193.

141202. Institutskaya str. 15. Pushkino. Moscow region. Russia. E-mail: astdann09@yandex.ru

РЯБЦЕВ Олег Викторович – заведующий отделом инновационных технологий, внедрения и лесного проектирования Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства, кандидат сельскохозяйственных наук. ORCID: 0000-0003-4189-1906. SPIN-код: 6803-9857.

141202, Институтская ул., д. 15, г. Пушкино, Московская обл., Россия. E-mail: sektorles@yandex.ru

RYABTSEV Oleg V. – PhD (Agriculture), Head of Department of innovative technologies, implementation and forest design of the All-Russian Scientific Research Institute of Forestry and Forestry Mechanization. ORCID: 0000-0003-4189-1906. SPIN-code: 6803-9857.

141202. Institutskaya str. 15. Pushkino. Moscow region. Russia. E-mail: sektorles@yandex.ru

ЩЕКАЛЕВ Роман Викторович – профессор кафедры почвоведения Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С.М. Кирова, доктор сельскохозяйственных наук. ORCID: 0000-0001-7657-1705. SPIN-код: 5826-3852.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: schekalevrv@yandex.ru

SHCHEKALEV Roman V. – DSc (Agriculture), Professor of Soil Science Department, St. Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0000-0001-7657-1705. SPIN-code: 5826-3852.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: schekalevrv@yandex.ru

УДК 582.632.1(470.22)

С.А. Шибанов, Л.В. Орлова, В.Ю. Нешатаев, А.С. Голованкова

ЛИСТВЕННИЦА НА ЕЛАГИНОМ ОСТРОВЕ (ЦПКИО ИМ. С.М. КИРОВА, САНКТ-ПЕТЕРБУРГ)

Введение. Настоящая работа по уточнению таксономического состава лиственниц, произрастающих в парке на Елагином острове (ЦПКиО им. С.М. Кирова) в Санкт-Петербурге, была проведена нами в 2019–2020 гг. в рамках проекта «Инвентаризация и биологическая оценка зеленых насаждений, находящихся на территории Центрального парка культуры и отдыха им. С.М. Кирова», а также многолетних исследований по ревизии таксономического состава древесных и травянистых растений г. Санкт-Петербурга [Булыгин и др., 1989, 1991; Цвелёв, Макарова, 2007; Фирсов, Орлова, 2008, 2019; Егоров, Орлова, 2011; Егоров и др., 2011; Фирсов и др., 2016; Бялт и др., 2019; Бялт и др., 2024; Игнатьева и др., 2024; Орлова и др., 2024]. Необходимо отметить, что основные результаты флористического исследования парка на Елагином острове ранее уже были довольно подробно освещены Н.Н. Цвелёвым и М.А. Макаровой [2007] в комплексной сводке по Елагину острову. Поэтому основной задачей нашего исследования было уточнение таксономического состава лиственниц ЦПКиО на основе их подеревного учёта. Другой задачей являлась разработка определительного ключа лиственниц парка.

Анализ исследований прежних лет. Первым фундаментальным исследованием растительности Елагина острова была работа ученого садовода Д.М. Залесского, составившего в 1946 г. картосхему с 25 выделами, содержание которых включало описания древесной (с указанием возраста), кустарниковой и травянистой растительности [Залесский, 1946]. В 1946 г. общее число деревьев на Елагином острове составляло 12 348 экз., преобладали дуб (17%), липа (12,2%), клен (12,2%); в меньшем количестве росли ясень, вяз, лиственница, береза, ольха черная, ивы и другие породы. Д.М. Залесский определял возраст самых старых деревьев на 1946 г. в 230–260 лет. В дальнейшем посадки здесь были проведены во второй половине XVIII в. и первой половине XIX в. и имели возраст, соответственно, 230–260 лет, а также 150–180 и 110–130 лет. Более молодые насаждения в парке имеют возраст 70–140 лет [Залесский, 1946].

В 1991 г. трое сотрудников научно-производственного центра «Эко-Сервис» В.Ю. Нешатаева, В.Ю. Нешатаев и И.В. Коновалова обследовали состояние травяного покрова парка [Обследование…, 1991]. Были даны характеристики всех выделов, намеченных Д.М. Залесским. В этой работе проанализированы некоторые изменения в растительном покрове, происходившие при его реконструкции (например, исчезновение фрагмента евтрофного болотного сообщества при засыпании заболоченной низины к северу от 3-го Южного пруда). Авторами сделан важный вывод о целесообразности сохранения естественных растительных сообществ, дающих представление о характере растительности, когда-то существовавшей на острове. В целом дендрофлору Елагина острова можно считать достаточно богатой и разнообразной. Среди деревьев имеется много старых и толстоствольных, хорошо сохранившихся особей, которые существенно украшают парк. Это, главным образом, дубы, липы, вязы и лиственницы, реже встречаются крупные деревья ясеня, клёна, ольхи чёрной, ивы белой и ломкой, тополей серебристого и канадского. Возле дворца находятся самые крупные и самые старовозрастные из парковых деревьев – дубы возрастом свыше 300 лет [Природа…, 2007].

Н.Н. Цвелёвым и М.А. Макаровой [2007] при проведении инвентаризации флоры Елагина острова в 2005–2006 гг. было выявлено 518 таксонов сосудистых растений, относящихся к 292 родам и 95 семействам, в том числе 4 вида лиственниц. Наиболее широко распространенными были признаны лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.) и л. архангельская, или Сукачёва (*Larix archangelica* Lawson), на Плантариуме [Larix…, 2025] указана как синоним *L. sibirica*, имеются отдельные экземпляры л. европейской (*L. decidua* Mill.) и л. лиственничной, или американской (*L. laricina* (Du Roi) K. Koch).

Природные и исторические особенности Центрального парка культуры и отдыха (*ЦПКиО*). Парк расположен на Елагином острове в Петроградском районе Санкт-Петербурга на территории муниципального образования «Чкаловское». Елагин остров – самый северный из островов устья р. Невы. С севера его омывает р. Большая Невка, на юге и юго-востоке р. Средняя Невка отделяет его от Крестовского и Каменного островов; на западе он узким мысом вдаётся в Финский залив. Площадь острова – 96,8 га. Протяжённость с востока на запад – 2,1 км, с севера на юг – 0,75 км.

ЦПКиО был открыт в 1932 г., имя С.М. Кирова присвоено ему в 1934 г. Природный комплекс Елагина острова постановлением Правительства Санкт-Петербурга от 26 июня 2016 г. № 647 объявлен памятником приро-

ды регионального значения в целях сохранения ландшафтного и биологического разнообразия на территории Санкт-Петербурга, создания условий для развития экологического и культурного просвещения, улучшения состояния окружающей среды на территории города [Природа…, 2007].

Впервые остров отмечен на шведских картах в 1643 г. Первоначальное финское название острова – «Мистулансаари», русское – «Мишин остров», по созвучию или, по легенде, по водившимся в лесу медведям.

До 1917 г. остров был во владении русского императорского дома, предназначался для вдовствующей императрицы Марии Фёдоровны, являлся одной из царских резиденций. С 1826 г. в парк был открыт публичный доступ, с 1917 г. он стал общественным достоянием.

В 1918–1929 гг. в Елагином дворце располагался «Музей истории и быта», с 1930 г. – филиал Института растениеводства Академии наук. В 1920-х гг. произведена перепланировка западной оконечности Елагина острова (арх. Л.А. Ильин, инженер Б.Д. Васильев), возведена двухъярусная терраса с площадкой, обрамлённой парапетом из светло-розового гранита, по краям которого были установлены каменные львы, перенесённые от Строгановской дачи. В период Великой Отечественной войны павильоны и интерьеры дворца были сильно повреждены. Растительный покров парка был сильно вытоптан еще до войны массовыми гуляниями и во время войны военнослужащими формируемых воинских частей [Залесский, 1946]. Восстановительные работы начались сразу после войны. Парк был открыт заново в 1961 г., реставрация была продолжена в 1980–1990-х гг. В 1987 г. во дворце был открыт «Музей русского декоративно-прикладного искусства и интерьера XVIII–XX вв.». В 1991 г. в одном из фрейлинских корпусов была открыта Школа садово-паркового искусства и ландшафтной архитектуры.

Рельеф Елагина острова представляет собой слабоволнистую поверхность Литориновой аккумулятивной террасы с диапазоном абсолютных высот от 0 до 3,4 м. До начала насыпных работ поверхность острова, по-видимому, была не выше 2 м над уровнем моря. Максимальные абсолютные отметки имеют участки с мощным слоем насыпного грунта, в том числе западный мыс (Стрелка). Небольшие повышения и береговые валы с относительной высотой до 2 м также в основном искусственного происхождения – из грунта, вынутого при создании прудов.

Водная сеть острова представлена искусственными прудами, соединенными каналами: пять прудов с островками образуют северную цепь и четыре – южную. Их общая площадь – 20 га, что составляет пятую часть

площади памятника острова. Уровень воды контролируется водопропускными устройствами на каналах, соединяющих водоемы с Большой и Средней Невками.

Грунты и почвенный покров в ходе окультуривания и формирования парка претерпели большие изменения. Естественные почвы Елагина острова были торфяно- и торфянисто-глеевыми. В настоящее время преобладают варианты дерновых почв с различной мощностью гумусового горизонта, сформировавшиеся на насыпных грунтах [Елагин…, 2024].

В марте 1958 г. в ЦПКиО был приглашен садовод А.Р. Метс, работавший ранее в Ботаническом саду АН СССР под руководством С.Я. Соколова. В 1966 г. впервые за историю ЦПКиО получены данные о качестве почвы: очень бедная гумусом, закисленная, с дефицитом элементов питания растений. Почва требовала известкования. Как оказалось, последние органические удобрения в парке вносились еще до 1917 г., а в годы советской власти удобряли лишь цветники. Метс категорически отказался заключать договоры на химическую обработку растений и почвы, которая могла погубить достаточно интересную фауну парка. Он прекратил уборку листового опада и проводил известкование почв. Проведенные им мероприятия привели к восстановлению почвенного плодородия зелёных насаждений парка и формированию сомкнутого травяного покрова [Обследование…, 1991].

Парк решен в пейзажном стиле, имеются прямые широкие аллеи. Основные древесные растения: лиственные – береза повислая (*Betula pendula* Roth), дубы красный (*Quercus rubra* L.) и черешчатый (*Q. robur* L.), ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior* L.), клён остролистный (*Acer platanoides* L.), ивы белая (*Salix alba* L.) и ломкая (*S. fragilis* L.), конский каштан обыкновенный (*Aesculus hippocastanum* L.), ольха чёрная (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) и серая (*A. incana* (L.) Moench), липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill.); хвойные – ель обыкновенная (*Picea abies* (L.) H. Karst.), лиственницы европейская (*Larix decidua* Mill.) и сибирская (*L. sibirica* Ledeb.), пихта бальзамическая (*Abies balsamea* (L.) Mill.) и сибирская (*A. sibirica* Ledeb.), сосна румелийская (*Pinus peuce* Griseb.). Основные кустарники – лещина обыкновенная (*Corylus avellana* (L.) H. Karst.), свидина белая (*Swida alba* (L.) Opiz), пузыреплодник калинолистный (*Physocarpus opulifolius* (L.) Maxim.)**,** спирея дубровколистная (*Spiraea chamaedryfolia* L.) и др.

Парк разделен на 24 участка (выдела).

Характеристика рода лиственница – основного объекта исследования. Лиственница (*Larix* Mill.) – хвойное растение, относящееся к отделу

Pinophyta, классу Pinopsida, порядку Pinales, семейству Pinaceae. Это однодомное дерево до 30 (60) м высотой, быстрорастущее, с мощной корневой системой. Ветвление неправильно-мутовчатое. Кора молодых побегов светлая желтовато-коричневая, оранжево- или красновато-светло-коричневая, голая или опушённая, на старых стволах большей частью толстая, глубокобороздчатая, отделяющаяся большими пластинками, серовато-бурая. Верхушечные почки мелкие, с многочисленными, черепитчато расположенными чешуями. Хвоя, опадающая на зиму, расположена спирально – на многолетних удлиненных побегах и в пучках по 20–50 хвоинок на укороченных побегах (брахибластах), узколинейная, 10–60 мм длиной, мягкая, уплощённая, по краям цельная, с верхней стороны желобчатая, с нижней – с хорошо заметным продольным килем, на верхушке закруглённая или притуплённая, с одной или с двух сторон с устьичными линиями, иногда с хорошо заметным белым восковым налётом, светло- или сизо-зелёная. Период плодоношения начинается у лиственниц с 15-20 лет, в зависимости от вида. Шишки – одни из самых маленьких у хвойных, от 1 до 10 см длиной. Живет до 300–500 и более лет. Устойчива к неблагоприятным климатическим воздействиям и малотребовательна к богатству и влажности почв, хорошо переносит задымление. Крайне светолюбива [Деревья…, 1949; Орлова, 2012a, b, 2021; Фирсов, Орлова, 2008, 2019; Фирсов и др., 2020].

Ветви лиственниц называют «парусами». Весной, когда многие древесно-листопадные растения ещё не оделись в листву (например, липа, клён, ясень, вяз), на их фоне лиственница, как красавица, одета в светло-зелёное «платье», летом в зелёное «платье», осенью – в жёлтое (золотистое) «платье».

В состав рода лиственница (*Larix* Mill.) входит от 9–11 [Ostenfeld, Syrach Larsen, 1930; Farjon, 2001, 2010; Grimshaw, Bayton, 2009] до 20 видов [Колесников, 1946; Урусов и др., 2007] из северного полушария. В.Н. Сукачёв [1924] рассматривает в составе рода 14 видов лиственниц, Е.Г. Бобров [1972] – 16 видов. В пределах России по данным Е.Г. Боброва [1978] произрастает 9 дикорастущих видов, на территории Восточной Европы – только 2 дикорастущих (*Larix decidua* Mill. subsp. *polonica* (Racib.) Domin и *L. archangelica* Lawson) и 11 культивируемых видов [Орлова, 2012a, b]. Особо отметим современную трактовку рода *Larix*, принятую в базе данных Королевского ботанического сада Кью [*Larix* …, 2024]. В ней из 10 видов, указанных A.Farjon [2010] для мира, на территории РФ признано только 4 вида: *Larix* × *czekanowskii* Szafer, *L. gmelinii* (Rupr.) Göpp., *L. potaninii* Batalin, *L. sibirica* Ledeb. С такой трактовкой разнообразия видов лиственницы

вряд ли можно согласиться. На Северо-Запад европейской части России (юго-восточная и западная Карелия) заходит лишь небольшая часть ареала лиственницы архангельской (*Larix archangelica* Lawson) [Кравченко, 2007; Орлова, 2012a, b]. В Санкт-Петербурге, где лиственница встречается только в культуре, по последним данным [Бялт и др., 2024] встречается 16 видов р. *Larix*.

Материал и методика. В летнее время в 2019–2020 гг. было проведено детальное обследование парка ЦПКиО с целью выявления деревьев лиственницы. Со всех деревьев были взяты побеги и шишки. На основании собранных образцов и литературных данных [Бялт и др., 2024] построен ключ для определения видов лиственницы. В понимании объёма вида авторы придерживаются концепции академика В.Л. Комарова [2020], выделяя дробные виды и их гибриды.

После определения видовой принадлежности 974 лиственниц были построены таблицы встречаемости видов и их гибридов по участкам парка.

Результаты исследования. Ниже приведён оригинальный ключ, разработанный одним из авторов (Орловой Л.В.), для определения видов лиственниц, произрастающих в настоящее время в парке на Елагином острове.

Ключ для определения видов рода *Larix* Елагина острова

1. Семенные чешуи многочисленные, красновато-светло-коричневые, с заметно отогнутым наружу волнистым краем, короткоопушённые. Шишки 2–3,5 см дл., 1,5–2(2,5) см толщ., широкояйцевидные. Молодые побеги розовато-светло-коричневые, часто с сизоватым налётом, заметно опушённые, двух-трёхлетние – красновато-коричневые. Хвоинки 15–30 (до 60) мм дл., широкие (1–1,5 мм шир.), сизовато-зелёные, слегка саблевидно-изогнутые, туповатые. Кора старых деревьев пластинчато-бороздчатая, с крупными прилегающими широкими продолговатыми пластинами. ***L. kaempferi* (Lamb.) Carr. (Л. Кемпфера, л. тонкочешуйная).** Интродуцент: Япония, вулканические горные склоны острова Хонсю.

+ Семенные чешуи коричневые или светло-коричневые, по краю не отогнутые заметно наружу. Хвоинки более узкие ..... 2.

2. Шишки мелкие (1–2 см дл., 1–2 см толщ.), продолговато-яйцевидные. Семенные чешуи немногочисленные (в числе 10–20), расположены в 3–4 ряда, выпуклые, голые, по верхнему краю слегка загнутые внутрь, часто мелкозубчатые. Молодые побеги голые или слегка опушённые, красновато- или оранжево-коричневые, с сизоватым налётом, двух-трёхлетние – серовато- или тёмно-коричневые. Хвоинки (12)15–20(25) мм

дл., 0,5–1 мм шир., сизовато-зелёные, слегка саблевидно изогнутые, закруглённые. Кора старых деревьев пластинчатая, с б.м. мелкими, отстающими широкими ромбическими или яйцевидными пластинами. ***L.laricina*** **(Du Roi) K. Koch (Л. лиственничная, л. американская).** Интродуцент: С. Америка, в природе ареал вида охватывает всю территорию Канады и северо-восточные районы США. Произрастает от тундры на севере до широколиственных лесов и прерий на юге.

+ Шишки крупнее, с большим количеством чешуй и рядов. Молодые побеги желтовато-светло-коричневые, голые или слабо опушённые; хвоинки более длинные, зелёные или светло-зелёные. Кора старых деревьев пластинчато-бороздчатая ..... 3.

3. Дерево с повисающими ветвями; кора старых деревьев с крупными прилегающими узкими продолговатыми пластинами. Шишки продолговато-яйцевидные. Семенные чешуи молодых шишек по верхнему краю слабо волнистые, у зрелых – широкозакруглённые, продольно-штриховатые по спинке, голые. Кроющие чешуи равны не менее 2/3 длины семенных или слегка превышают их длину (при основании шишки). Хвоинки сверху с 1–2 беловатыми устьичными линиями по обе стороны от киля, снизу с незначительно выраженным беловатым восковым налётом и с 3–4 беловатыми устьичными линиями. ***L.decidua*** **Mill. (Л. европейская).** Интродуцент: горы Центральной и Средней Европы (Альпы, Карпаты).

+ Дерево с горизонтальными или канделябровидными ветвями, верхушки которых приподняты вверх. Хвоинки с 2–3 беловатыми устьичными линиями с каждой стороны от киля с верхней и нижней стороны. Шишки яйцевидные до почти шаровидных. Кроющие чешуи очень мелкие (до ¼ высоты семенных) и заметны только у основания шишки..... 4.

4. Листья зелёные. Двух-трёхлетние побеги серые. Семенные чешуи зрелых шишек 12–20 мм шир., отчётливо ложковидные, по верхнему краю широкозакруглённые, часто немного усечённые, при основании шишки гораздо более крупные, чем остальные чешуи; у старых шишек часто приобретают фиолетовый оттенок и остаются цельными. Кора старых деревьев с крупными отстающими широкими продолговатыми пластинами. ***L. archangelica*** **Lawson** (syn. *L. sukaczewii* Dylis) **(Л. архангельская, Л. Сукачева)**. Интродуцент: Северо-Восточная Европа.

+ Листья сизовато-зелёные. Двух-трёхлетние побеги сероватокоричневые. Семенные чешуи более узкие (6–14 мм шир.), б. м. прямые или неясно ложковидные, по верхнему краю закруглённые, все чешуи

в шишке примерно одного размера. Кора старых деревьев с крупными отстающими широкоромбическими пластинами. ***L. sibirica*** **Ledeb. (Л. сибирская).** Интродуцент; широко распространена в азиатской части России, а также в Казахстане, Монголии и Китае, Северо-Восточной Европе.

В парке встречаются отдельные деревья ***L. czekanowskii*** **Szafer** (*L. dahurica* × *L. sibirica*) **(Лиственница Чекановского)**, природного гибрида между лиственницей даурской (Гмелина) и лиственницей сибирской, с горизонтальными, широко распростёртыми ветвями, кора старых деревьев с крупными прилегающими продолговатыми пластинами. Шишки, как правило, разного размера (1–2,6(3) см дл.), даже в пределах одного побега; возможны формы с преимущественно крупными (2–2,6(3) см дл.) шишками и закруглёнными, но голыми чешуями (форма, близкая к *L. sibirica*) или с мелкими шишками (1–1,5 см дл.) и усеченными чешуями (форма, близкая к *L. dahurica*).

Полученные данные по лиственницам представлены в табл. 1.

Таблица 1

Количество особей по видам лиственниц на Елагином острове в 2019–2020 гг.

Number of individuals by species of larches on the Elagin Island in 2019–2020

Вид	Номер участка												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
L. archangelica	1	17	5	–	–	8	–	–	–	–	–	–	–
L. archangelica x *L. decidua*	2	–	5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
L. czekanowskii	–	3	–	–	2	4	15	–	–	–	–	–	–
L. decidua	19	18	–	–	–	6	–	1	68	74	23	18	6
L. decidua x *L. archangelica*	1	7	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
L. decidua x *L. sibirica*	–	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
L. laricina	–	–	–	–	–	3	–	–	–	–	2	–	–
L. kaempferi	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
L. sibirica x *L. decidua*	–	1	–	–		–	–	–	–	–	–	–	–
L. sibirica	–	–	–	–	8	2	38	–	15	18	12	11	103
Итого:	23	47	10	–	10	23	53	1	83	92	37	29	109

Окончание табл. 1

Вид	Номер участка												Всего
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
L. archangelica	–	–	–	–	–	–	19	–	–	–	–	–	50
L. archangelica x *L. decidua*	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	7
L.czekanowskii	–	–	–	–	–	8	–	6	–	–	2	8	48
L. decidua	6	–	–	–	7	5	68	–	–	6	1	58	384
L. decidua x *L. archangelica*	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	8
L. decidua x *L. sibirica*	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1
L. laricina	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1	–	6
L. kaempferi	–	–	–	–	–	1	–	2	–	–	1	–	4
L. sibirica x *L. decidua*	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1
L. sibirica	3	1	–	–	23	23	76	10	34	25	21	42	465
Итого :	9	1	–	–	30	37	163	18	34	31	26	108	974

Выводы. 1. Согласно результатам наших исследований коллекция лиственниц в ЦПКиО им. С.М. Кирова включает 6 видов (*Larix archangelica* Laws., *L. czekanowskii* Szafer, *L. decidua* Mill, *L. laricina* (Du Roi) K. Koch, *L. kaempferi* (Lamb.) Carr., *Larix sibirica* Ledeb.), произрастающих почти на всех участках парка. В основном это виды, широко распространенные в озеленении в Санкт-Петербурге и в целом на Северо-Западе европейской части России. Всего насчитывается 974 экз. лиственниц;

2. Встречаются также культурные гибриды лиственницы архангельской, или Сукачева, и лиственницы европейской (*L. archangelica* × *L. decidua*) и лиственницы европейской и лиственницы сибирской (*L. decidua* × *L. sibirica*) с промежуточными между родительскими видами признаками (участки 1, 2, 3).

Благодарности. Выражаем благодарность С.А. Иванову за большую помощь в работе по инвентаризации лиственниц по ЦПКиО им. С.М. Кирова.

Статья представляет собой вклад в выполнение государственного задания Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН, в рамках проекта БИН РАН, «Систематика, флора и растительные ресурсы сосудистых растений Евразии» 1021071912888-8-1.6.11.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Бобров Е.Г. История и систематика лиственниц (Комаровские чтения XXV). Л.: Наука. Ленинградское отделение, 1972. 96 с.

Бобров Е.Г. Лесообразующие хвойные СССР. Л.: Наука, 1978. 188 с.

Булыгин Н.Е., *Фирсов Г.А.*, *Комарова В.Н.* Основные результаты и перспективы дальнейшей интродукции хвойных на Северо-Западе России. Рукопись представлена Ленингр. лесотехн. акад. Деп. в ВИНИТИ 15.06.1989. No 3983 – В 89. 142 с.

Булыгин Н.Е., *Связева О.А.*, *Фирсов Г.А.* Дендрологические фонды садов и парков Ленинграда. Рукопись представлена Ботан. ин-том им. В. Л. Комарова АН СССР. Деп. в ВИНИТИ 28.06.1991. No 2790 – В 91. 66 с.

Бялт В.В., *Фирсов Г.А.*, *Бялт А.В.*, *Орлова Л.В.* Обзор культурной флоры Санкт-Петербурга (Россия): монография / отв. ред. д. б. н., проф. В.Т. Ярмишко; Ботанический ин-т им. В.Л. Комарова РАН. М.: Изд-во РОСА, 2019. 180 с.

Бялт В.В., *Фирсов Г.А.*, *Орлова Л.В.*, *Егоров А.А.*, *Бялт А.В.* Иллюстрированный конспект культурной флоры Санкт-Петербурга (Россия). СПб., 2024. 503 с.

Деревья и кустарники СССР. Т. 1: Голосеменные. М.-Л.: АН СССР, 1949. 432 с.

Егоров А.А., *Орлова Л.В.* История интродукции и использование в озеленении лиственниц (*Larix* Mill.) в Санкт-Петербурге // Вестник Иркутской государственной сельскохозяйственной академии. 2011. Т. 44-1. С. 50–57.

Егоров А.А., *Фирсов Г.А.*, *Фадеева И.В.*, *Бялт В.В.*, *Орлова Л.В.*, *Волчанская А.В.* Проблемы совершенствования современного ассортимента древесных растений в городских зелёных насаждениях Санкт-Петербурга // Известия Иркут. Унив., Сер. биол., экол. 2011. Т. 4, № 2. С. 23–31.

Елагин остров // Википедия. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Елагин_ остров (дата обращения: 10.12.2024)

Залесский Д.М. Современное состояние зелёных насаждений парка Елагина острова. Отчёт: рукопись / Архив ГИОП. 1946. 96 с.

Игнатьева О.В., *Орлова Л.В.*, *Бялт В.В.* Дендрофлора Удельного парка (г. Санкт-Петербург, Россия): учеб. пособие. СПб.: СПбГЛТУ, 2024. 120 с.

Колесников Б.П. К систематике и истории развития лиственниц секции Pauciseriales Patschke // Материалы по истории флоры и растительности СССР. М.; Л., 1946. С. 321–364.

Комаров В.Л. Учение о виде у растений. М.: Юрайт, 2020. 223 с.

Кравченко А.В. Конспект флоры Карелии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 403 с.

Обследование состояния травянистого покрова Елагина острова. Отчёт по договору N 50; отв. исп. Нешатаева В.Ю. исп. Коновалова И.В., Нешатаев В.Ю.: рукопись / Архив ЦПКиО. СПб., 1991. 230 с.

Орлова Л.В. Конспект дикорастущих и некоторых интродуцированных видов рода *Larix* Mill. (Pinaceae) флоры Восточной Европы // Новости систематики высших растений. 2012a. Т. 43. С. 5–19.

Орлова Л.В. Отдел 4. *Pinophyta* – Голосеменные // Конспект флоры Восточной Европы. М.; СПб., 2012b. Т. 1. С. 49–90.

Орлова Л.В. Отдел *Pinophyta*. Голосеменные // Атлас сосудистых растений Северо-Запада европейской части России. М., 2021. Т. 1. С. 48–75.

Орлова Л.В., *Бялт В.В.*, *Фирсов Г.А*. *Larix sibirica* Ledeb. f. *candelabriformis* L.V. Orlova, V. V. Byalt et G. A. Firsov, forma nova – новая форма лиственницы сибирской из Санкт-Петербурга // Hortus Botanicus. 2024. Т. 19. С. 19–29. DOI: 10.15393/j4.art.YYYY.9005

Природа Елагина острова / ред. Е.А. Волкова, Г.А. Исаченко, В.Н. Храмцов. СПб., 2007. 108 с.

Сукачев В.Н. К истории развития лиственниц // Лесное дело: сб. ст. Л.- М., 1924. С. 12-44.

Урусов В.М., Лобанова И.И., Варченко Л.И. Хвойные российского Дальнего Востока – ценные объекты изучения, охраны, разведения и использования. Владивосток, 2007. 440 с.

Фирсов Г.А., *Орлова Л.В*. Хвойные в Санкт-Петербурге. СПб.: Росток, 2008. 336 с.

Фирсов Г.А., *Орлова Л.В*. Хвойные в Санкт-Петербурге. 2-е изд., расшир. и перераб. СПб: Дом садовой литературы, 2019. 492 с.

Фирсов Г.А., *Орлова Л.В*., *Хмарик А.Г*. Род Лиственница (*Larix* Mill., Pinaceae) в Ботаническом саду Петра Великого // Вестн. Волгогр. гос. ун-та. Сер. 11, Естеств. науки. 2016. № 1 (15). С. 6–15. DOI: 10.15688/jvolsu11.2016.1.1.

Фирсов Г.А., *Орлова Л.В*., *Волчанская А.В*. Аннотированный каталог голосеменных растений парка-дендрария Ботанического сада Петра Великого БИН РАН. СПб.: Первый ИПХ, 2020. 208 с.

Цвелёв Н.Н., *Макарова М.А*. Сосудистые растения // Природа Елагина острова / ред. Е. А. Волкова, Г. А. Исаченко, В. Н. Храмцов. СПб., 2007. С. 33–52.

Farjon A. World Checklist and Bibliography of Conifers. 2nd ed. Kew, 2001. 309 p.

Farjon A. A Handbook of the World's Conifers. Vol. 1. BRILL, 2010. 544 p.

Grimshaw J., *Bayton R*. New Trees: Recent Introductions to Cultivation. Richmond, Surrey: Kew Publishing, 2009. 976 p.

Larix Mill // Plants of the World Online. URL: https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:30017099-2 (дата обращения: 10.12.2024).

Larix sukaczewii Dylis // Плантариум. Растения и лишайники России и сопредельных стран: открытый онлайн атлас и определитель растений. URL: https://www.plantarium.ru/page/view/item/22098.html (дата обращения: 02.07.2025).

Ostenfeld C.H., *Syrach Larsen C.* The species of the genus *Larix* and their geographical distribution // Kongelige Danske Videnskabernes-Selskabs. Biologiske Meddelelser. 1930. Bd. 9, hf. 2. P. 1-107.

References

Bobrov E.G. History and taxonomy of larches (Komarov readings XXV). Leningrad: Nauka. Leningrad branch, 1972. 96 p. (In Russ.)

Bobrov E.G. Forest-forming conifers of the USSR. Leningrad: Nauka, 1978. 188 p. (In Russ.)

Buligin N.E., *Firsov G.A*., *Komarova V.N*. Main results and prospects of further introduction of conifers at North-West of Russia. Depon. in VINITI 15.06.1989. N 3983 – B89. 142 p.

Bulygin N.E., *Svyazeva O.A*., *Firsov G.A*. Dendrological Foundations of Gardens and Parks of Leningrad. Manuscript by V. L. Komarov Botan. Inst. Academy of Sciences of the USSR. Dep. in VINITI 28.06.1991. No. 2790 – B 91. 66 p.

Byalt V.V., *Firsov G.A*., *Byalt A.V*., *Orlova L.V*. Overview of the cultural flora of St. Petersburg (Russia): monograph / ed. in chief prof. V.T. Yarmishko; Russian Academy of Sciences; V.L. Komarov Botanical Institute. Moscow: ROSA, 2019. 180 p. (In Russ.)

Byalt V.V., *Firsov G.A*., *Orlova L.V*., *Egorov A.A*., *Byalt A.V*. Illustrated checklist of the cultural flora of St. Petersburg (Russia) / Illustrated summary of the cultural flora of St. Petersburg (Russia). St. Petersburg, 2024. 503 p. (In Russ.)

Egorov A.A., *Orlova L.V*. History of introduction and use in landscaping of larches (*Larix* Mill.) in St. Petersburg. *Bulletin of the Irkutsk State Agricultural Academy*, 2011, vol. 44-1, pp. 50–57. (In Russ.)

Egorov A.A., *Firsov G.A*., *Fadeeva I.V*., *Byalt V.V*., *Orlova L.V*., *Volchanskaya A.V*. Problems of improving of the modern assortment of arboreal plants in urban green areas of St. Petersburg. *Izvestia Irkutsk. Univ., Ser. biol., ekol*., 2011, vol. 4, no. 2, pp. 23–31. (In Russ.)

Farjon A. World Checklist and Bibliography of Conifers. 2nd ed. Kew, 2001. 309 p.

Farjon A. A Handbook of the World's Conifers. Vol. 1. BRILL, 2010. 544 p.

Firsov G.A., *Orlova L.V*. Conifers in St. Petersburg. St. Petersburg: Rostok, 2008. 336 p. (In Russ.)

Firsov G.A., *Orlova L.V*. Conifers in St. Petersburg. 2nd ed., exp. and rev. St. Petersburg: House of Garden Literature, 2019. 492 p. (In Russ.)

Firsov G.A., *Orlova L.V*., *Khmarik A.G*. Genus Larch (*Larix* Mill., Pinaceae) in the Peter the Great Botanical Garden. *Vestn. Volgograd State University. Ser. 11, Natural Sciences*, 2016, no. 1 (15), pp. 6–15. DOI: 10.15688/jvolsu11.2016.1.1. (In Russ.)

Firsov G.A., *Orlova L.V*., *Volchanskaya A.V*. Annotated catalog of gymnosperms of the arboretum park of the Peter the Great Botanical Garden of the Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences. St. Petersburg: First IPH, 2020. 208 p. (In Russ.)

Grimshaw J., *Bayton R.* New Trees: Recent Introductions to Cultivation. Richmond, Surrey: Kew Publishing, 2009. 976 p.

Ignatyeva O.V., *Orlova L.V.*, *Byalt V.V.* Dendroflora of Udelny Park (St. Petersburg, Russia): a textbook. St. Petersburg: SPbGLTU, 2024. 120 p. (In Russ.)

Kolesnikov B.P. On the systematics and history of development of larches of the section Pauciseriales Patschke. *Materials on the history of flora and vegetation of the USSR*. Moscow; Leningrad, 1946, pp. 321–364. (In Russ.)

Komarov V.L. The Theory of Plant Species. Moscow: Yurayt, 2020. 223 p. (In Russ.)

Kravchenko A.V. Compendium of Karelian flora (vascular plants). Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2007. 403 p. (In Russ.)

Larix Mill. *Plants of the World Online*. URL: https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:30017099-2 (accessed December 10, 2024).

Larix sukaczewii Dylis. *Plantarium*. Plants and lichens of Russia and neighboring countries: open online galleries and plant identification guide. URL: https://www.plantarium.ru/lang/en/page/view/item/22098.html (accessed: 02.07.2025).

Nature of Elagin Island / ed. E.A. Volkova, G.A. Isachenko, V.N. Khramtsov. St. Petersburg, 2007. 108 p. (In Russ.)

Survey of the state of the grass cover of Elagin Island. Report on contract No. 50; responsible performer Neshataeva V.Yu., performers Konovalova I.V., Neshataev V.Yu.: manuscript. St. Petersburg, 1991. 230 p. (In Russ.)

Orlova L.V. Abstract of wild and some introduced species of the genus *Larix* Mill. (Pinaceae) of flora of Eastern Europe. *Novitates Systematicae Plantarum Vascularium*, 2012a, vol. 43, pp. 5–19. (In Russ.)

Orlova L.V. Section 4. *Pinophyta* – Gymnosperms. *Abstract of the Flora of Eastern Europe*. Moscow; St. Petersburg, 2012b, vol. 1, pp. 49–90. (In Russ.)

Orlova L.V. Department *Pinophyta.* Gymnosperms. *Atlas of vascular plants of the North-West of the European part of Russia. Vol. 1*. Moscow, 2021, pp. 47–76. (In Russ.)

Orlova L.V., Byalt V.V., Firsov G.A. *Larix sibirica* Ledeb. f. *candelabriformis* L.V. Orlova, V.V. Byalt et G.A. Firsov, forma nova – a new form of Siberian larch from St. Petersburg. *Hortus Botanicus*, 2024, vol. 19, pp. 19–29. (In Russ.)

Ostenfeld C.H., Syrach Larsen C. The species of the genus *Larix* and their geographical distribution. *Kongelige Danske Videnskabernes-Selskabs. Biologiske Meddelelser,* 1930, bd. 9, hf. 2, pp. 1-107.

Sykachev V.N. On the History of Larch Development. *Forestry*: collection of articles. Leningrad-Moscow, 1924, pp. 14-44. (In Russ.)

Trees and shrubs of the USSR. Vol. 1: Gymnosperms. Moscow-Leningrad: USSR Academy of Sciences, 1949. 432 p. (In Russ.)

Tsvelev N.N., *Makarova M.A*. Vascular plants. *Nature of Elagin Island* / ed. E.A. Volkova, G.A. Isachenko, V.N. Khramtsov. St. Petersburg, 2007, pp. 33–52. (In Russ.)

Urusov V.M., Lobanova I.I., Varchenko L.I. Conifers of the Russian Far East – valuable objects of study, protection, cultivation and use. Vladivostok, 2007. 440 p.

Yelagin island // Wkipedia. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Елагин_остров (accessed: 10.12.2024) (In Russ.)

Zalessky D.M. Current state of green spaces of the Elagin Island Park. Report: manuscript / GIOP Archive. 1946. 96 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 17.01.2025

Шибанов С.А., ОрловаЛ.В., Нешатаев В.Ю., Голованкова А.С. Лиственница на Елагином острове (ЦПКиО им С.М. Кирова, Санкт-Петербург) // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 234–249. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.234-249

Статья посвящена инвентаризации лиственниц (*Larix* Mill.), которая была осуществлена авторами в 2019–2020 гг. на Елагином острове (ЦПКиО им. С.М. Кирова) для уточнения таксономического состава коллекции, и явилась продолжением ранее проведенного всестороннего исследования флоры парка. Общее количество лиственниц – 974 экз. В основном это старовозрастные лиственницы. Больше всего *L. sibirica* – 465 экз. – и *L. decidua* – 384 экз. На втором месте – *L. archangelica* (50 экз.) и *L. czekanowskii* (48 экз.). Данные виды хорошо себя зарекомендовали и успешно произрастают на территории парка «Елагин остров». Кроме того, в парке иногда встречаются отдельные деревья лиственницы Чекановского, природного гибрида между лиственницей даурской, или Гмелина, и лиственницей сибирской (*L. czekanowskii* (*L. dahurica* × *L. sibirica*)) с горизонтальными, широко распростёртыми ветвями; кора старых деревьев с крупными прилегающими продолговатыми пластинами. Шишки, как правило, разного размера, даже в пределах одного побега; возможны формы с преимущественно крупными шишками и закруглёнными, но голыми чешуями (форма, близкая к *L. sibirica*) или с мелкими шишками и усеченными чешуями (форма, близкая к *L. dahurica*). Встречаются также культурные гибриды лиственницы Сукачева, или архангельской, и лиственницы европейской (*L. archangelica* × *L. decidua*) и лиственницы европейской и лиственницы сибирской (*L. decidua* × *L. sibirica*) с промежуточными между родительскими видами признаками.

Ключевые слова: *Larix*, лиственница, Елагин остров, ЦПКиО, Санкт-Петербург.

Shibanov S.A., Orlova L.V., Neshataev V.Yu., Golovankova A.S. Larch on Elagin Island (S.M. Kirov Central Park of Culture and Leisure, St. Petersburg). *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 234–249 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.234-249

The article is devoted to the inventory of larches (*Larix* Mill.), which was made by the authors in 2019–2020 on Elagin Island (S.M. Kirov Central Park of Culture and Leisure) to clarify the taxonomical composition of the collection, and was a continuation of a previously conducted comprehensive study of the park's flora. The total number of larches is 974 specimens. These are mainly old-growth larches. *L. sibirica* (465 specimens) and *L. decidua* (384 specimens) prevail. *L. archangelica* (50 specimens) and *L. czekanowskii* (48 specimens) have the second place. These species have proven themselves well and successfully grow on the territory of park "Elagin Island". In addition, in the park, there are some individual trees of the Czekanowskii larch, a natural hybrid between the Dahurian larch, or Gmelin's larch, and the Siberian larch (*L. czekanowskii* (*L. dahurica* × *L. sibirica*)) with horizontal, widely spreading branches; the bark of old trees has large adjacent oblong plates. The cones usually differ in size, even within the same shoot; there are forms with predominantly large cones and rounded, but naked scales (a form close to *L. sibirica*) or with small cones and truncated scales (a form close to *L. dahurica*). There are also cultivated hybrids of Sukachev, or Arkhangelsk larch, and European larch (*L. archangelica* × *L. decidua*) and European larch and Siberian larch (*L. decidua* × *L. sibirica*) with intermediate characteristics between the parental species.

Keywords: *Larix*, Larch, Elagin Island, Central Park of Culture, St. Petersburg.

ШИБАНОВ Сергей Александрович – заведующий отделом Дендросад Ботанического сада Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург Россия. E-mail: s.schibanov2017@yandex.ru

SHIBANOV Sergey A. – Head of the Arboretum Department, Botanical Garden of St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: s.schibanov2017@yandex.ru

ОРЛОВА Лариса Владимировна – научный сотрудник отдела Гербарий высших растений Ботанического института им. В.Л. Комарова Российской академии наук.

197022, ул. Профессора Попова, д. 2П, лит. В, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: orlarix@mail.ru

ORLOVA Larisa V. – Researcher at the Department of Herbarium of Higher Plants of the V.L. Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences.

197022. Professora Popova str. 2P. Let. B. St. Petersburg. Russia. E-mail: orlarix@mail.ru

НЕШАТАЕВ Василий Юрьевич – профессор Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор биологических наук, доцент.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: vn1872@yandex.ru

NESHATAEV Vasily Yu. – DSc (Biological), Professor of St.Petersburg State Forest Technical University, Associate Professor.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: vn1872@yandex.ru

ГОЛОВАНКОВА Анна Сергеевна – главный хранитель парка Центрального парка культуры и отдыха им. С.М. Кирова.

197110, Елагин остров, д. 4, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: Any2go@yandex.ru

GOLOVANKOVA Anna S. – Chief park keeper of the Central Park of Culture and Recreation named after S.M. Kirov.

197110. Elagin Island 4. St. Petersburg. Russia. E-mail: Any2go@yandex.ru

УДК 630*2

А.С. Сергеева

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПОЧВЕННЫХ УСЛОВИЙ И ЧИСЛЕННОСТИ ЕЛОВОГО ПОДРОСТА В СПЕЛЫХ СОСНОВО-ЕЛОВЫХ ДРЕВОСТОЯХ ГАТЧИНСКОГО РАЙОНА ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Введение. Почвенные условия наравне с составом материнского древостоя влияют на функционирование экосистемы, обеспечивают устойчивое развитие насаждения [Гусев и др., 2002; Косумов, Демельханов, 2016]. Разнообразие почвенных условий способствует созданию мозаичной структуры растительного покрова, который в свою очередь также влияет на различия агрохимических характеристик даже на незначительных по размеру территориях [Сукачев, 1972].

Ряд известных авторов еще в XX веке говорили о необходимости комплексного изучения формирования лесных фитоценозов [Высоцкий, 1904; Морозов, 1913, 1949; Дылис, 1969; Миркин, Розенберг, 1978; Работнов, 1978]. На рубеже 40-50-х гг. прошлого столетия исследователи стали более активно обращать внимание на взаимодействие почвы и растительного сообщества [Раменский, 1938; Морозов, 1949]. Активно изучалось возобновление ели в ельниках Ленинградской области [Декатов, 1931; Гусев, Третьяков, 1988; Грязькин, 1999, 2001; Новиков, 1999; Шаньгина и др., 2010; Беляева, 2013].

Целью данного исследования было выявление взаимосвязей между почвенными условиями, численностью елового подроста в спелых сосново-еловых древостоях. В задачи входило проанализировать параметры возобновительного процесса ели европейской, протекающего под пологом сосновых древостоев с учетом их парцеллярной структуры, выявить степень влияния агрохимических характеристик на возобновительный процесс.

Исследование проводилось в 2021-2024 гг. Объектами исследования стали спелые сосново-еловые древостои, с участием в их составе сосны от 6 до 8 единиц, а также ели европейской (*Pícea ábies* (L.) H. Karst.) от 1 до 3 единиц, расположенные в Ленинградской области Гатчинского района, относящиеся к Балтийско-Белозерскому таежному лесорастительному

району[1] и к Лужско-Оредежскому ландшафту в районе Оредежского плато [Благовидов, 1946]. Пробные площади закладывались в лесах, не затронутых хозяйственной деятельностью человека длительное время.

Материалы и методика исследования. Пробные площади закладывались в наиболее однородных и схожих между собой участках. Размер каждой пробной площади составил 0.25 га, всего было заложено 10 пробных площадей. Внутри каждой пробной площади дополнительно закладывали квадраты 10х10 м по центральной оси пробы.

Для описания почв и изучения почвенных условий в каждом квадрате 10х10м закладывались почвенные прикопки. Описания и названия почв приводились по классификации почв 1977 г. [Классификация…, 1977].

Определялись следующие агрохимические показатели: содержание гумуса, показатели обменной и актуальной кислотности, степень обеспеченности подвижным азотом. Агрохимическая характеристика проводилась только для корнеобитаемого горизонта (верхние 15-25 см), так как именно показатели верхних слоев почв максимально отражают доступные растениям вещества, особенно для молодого возобновления.

Содержание гумуса определялось по методу И.В. Тюрина [1937]. Содержание в почве нитратного азота (степень обеспеченности подвижным азотом) определялось дисульфофеноловым методом (метод Грандваля-Ляжу) [Агрохимия…, 2018]. Величина pH почв определялась измерением разности потенциалов индикаторного электрода и электрода сравнения. Для сравнения использовались водная и солевая (KCl) суспензии[2].

Для изучения взаимосвязи почвенных условий и численности елового подроста учет последнего был проведен сплошным перечетом на учетных площадках 10х10м. Отмечались следующие параметры: высота, диаметр, возраст, категория состояния (жизнеспособный, нежизнеспособный, сухой), количество, численность на гектар [Сеннов, 2005].

Также на квадратах 10х10 м проводилось геоботаническое описание с выделением парцелл и составлением карт парцеллярной структуры.

Результаты исследования. Анализ получившихся описаний почвенных прикопок показал, что почвы на исследуемых территориях представлены болотным, подзолистым и подзолисто-болотным типами.

[1] Приказ Минприроды России от 18.08.2014 N 367 (ред. от 02.08.2023) «Об утверждении Перечня лесорастительных зон Российской Федерации и Перечня лесных районов Российской Федерации»

[2] ГОСТ 26483-85. Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1986. 6 с.

На рис.1 можно проследить высотный перепад в диапазоне от 77 до 85 м над уровнем моря. Так, выше всех расположены пробные участки №1 и №2, ниже всех – пробные площади №9 и №10. За счет присутствия микропонижений происходит избыточное и периодически застойное увлажнение, что приводит к развитию таких двух процессов, как глееобразование и торфонакопление. При наличии иллювиального горизонта, а также в оглеенных горизонтах наблюдается значительное количество вкраплений – железистых новообразований. Стоит отметить, что подзолообразовательный процесс выражен в разной степени, так как изменяется от скрытоподзолистого типа до подзола.

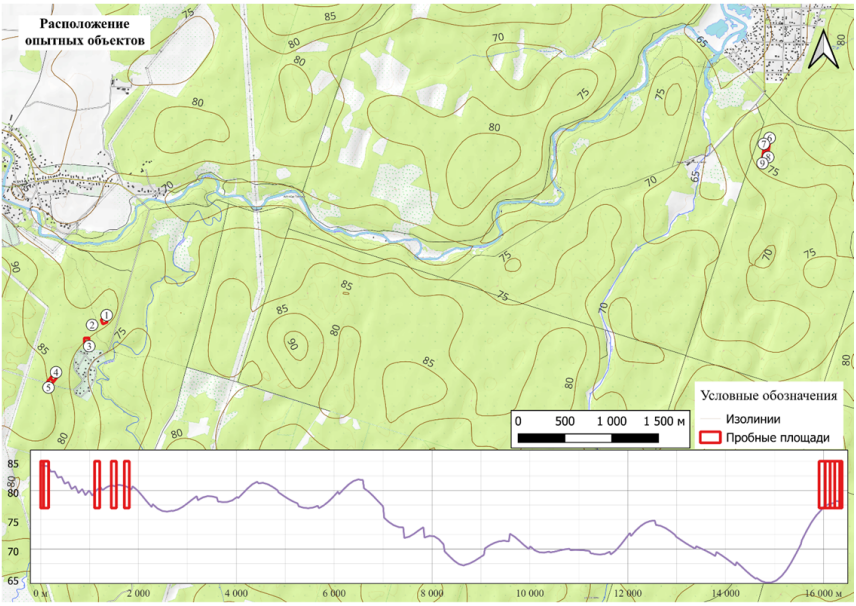


Рис. 1. Распределение пробных площадей относительно изогипс местности
Fig. 1. Distribution of sample plots relative to the terrain contours

На пробных площадях № 1, 4, 7, 8, 9, 10 почвы можно отнести к осушенным, так как в относительной близости от них располагаются старые осушительные каналы, построенные вдоль просек.

Агрохимические показатели верхних горизонтов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Агрохимические показатели верхних горизонтов на исследуемых территориях

Agrochemical indicators of upper horizons in the studied areas

Проба	Горизонт	Мощность, см	Содержание гумуса,%	pH		Содержание мг на 100 г почвы NO3
				H_2O	KCl	
1-1	T	4-12	46,35	4,17	3,29	6,972
1-2	T	4-10	46,00	4,2	3,13	5,412
1-3	T	4-8	46,04	4,48	3,36	2,106
2-1	A_0A_1	4-10	3,585	4,43	3,20	0,218
2-2	A_0A_1	10-13	8,743	3,87	2,84	0,459
2-3	A_0A_1	4-7	26,122	4,16	2,93	1,505
3-1	T	4-8	39,63	3,72	2,86	3,696
3-2	A_1	3-6	9,192	4,23	2,98	1,872
3-3	A_1	8-16	10,846	3,38	2,72	1,675
4-1	A_1	4-10	4,793	4,68	3,22	1,387
4-2	A_0A_1	2-9	13,13	4,28	2,97	1,993
4-3	A_1	4-14	11,119	4,28	3,15	1,613
5-1	A_1	5-13	8,063	4,36	3,11	1,704
5-2	A_1	3-7	12,865	3,83	2,96	1,624
5-3	A_1	5-10	24,563	4,2	2,98	2,08
6-1	T_3	16-28	25,653	4,59	3,72	5,372
6-2	T_2	13-20	44,28	4,89	3,62	2,917
6-3	T_2	10-18	31,16	4,55	3,52	3,394
7-1	A_0A_1	2-15	32,89	4,67	3,73	3,122
7-2	T_2	8-14	14,805	4,9	3,86	2,758
7-3	T_2	3-15	18,684	5,14	4,00	3,11
8-1	A_0A_1	1-12	25,702	5,2	3,95	3,246
8-2	A_0A_1	5-15	41,24	5,12	3,96	3,084
8-3	A_0A_1	8-13	23,04	4,52	3,67	3,616
9-1	A_0A_1	8-15	17,36	5,15	3,79	3,61
9-2	A_1	2-8	21,501	5,01	3,72	3,178
9-3	T_3	2-20	23,76	4,65	4,16	3,394
10-1	T_3	21-41	24,024	5,08	4,23	2,658
10-2	T_1	4-10	13,31	4,74	3,68	3,694
10-3	T_2	4-10	14,643	4,85	4,09	1,663

Примечание: здесь и далее по тексту пробная площадь обозначается следующим образом: ПП №2-1, где первая цифра – это номер пробной площади, а вторая цифра – номер квадрата размером 10х10 м внутри пробной площади, либо ПП №2 – при указании всей пробной площади).

Благодаря перегнойным и торфянистым горизонтам, образовавшимся в результате периодического избыточного увлажнения, по содержанию гумуса большинство почв относятся к хорошо обеспеченным, к среднеобеспеченным относится почва на пробной площади №2, в 1 квадрате.

По показателю обменной кислотности почвы имеют очень сильнокислую и сильнокислую (ПП № 7-3, 9-3, 10-1, 10-3) реакцию среды. По показателю актуальной кислотности почвы на большинстве проб имеют кислую реакцию среды, но есть и среднекислые почвы (ПП № 7-3, 8-1, 8-2, 9-1, 10-1), и сильнокислые (ПП №2-2, 3-1, 3-3, 5-2).

Степень обеспеченности почв подвижным азотом очень низкая (<3.0) или низкая (3.1-5.0), однако на пробных площадях №1-1, 1-2 и 6-1 показатель поднимается до градации средней обеспеченности (5.1-7.0).

Характеристики подроста, полученные в результате проведения сплошного перечета на учетных квадратах 10х10 м, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристика подроста на площадках 10х10 м

Characteristics of undergrowth on 10x10 m sites

Пробная площадь	Средний возраст, А, лет	Средняя высота, Н, м	Распределение елового подроста по категориям высоты, экз.			Итоговая численность, экз.	Численность на 1 га (экз./га)
			Мелкий (до 0,5 м)	Средний (от 0,51 до 1,5 м)	Крупный (выше 1,5 м)		
1-1	13,38	2,29	0	8	16	24	2240
1-2	13,28	1,6	4	34	19	57	4820
1-3	10,67	1,3	10	29	13	52	4120
2-1	41	9	0	0	2	2	200
2-2	6	0,65	0	1	0	1	80
2-3	5	0,45	2	0	0	2	100
3-1	12,05	1,79	15	1	4	20	1230
3-2	22,5	3,09	3	1	2	6	430
3-3	8,17	0,77	3	2	1	6	410
4-1	18,53	2,5	2	9	4	15	1220
4-2	28,88	4,17	1	0	7	8	750
4-3	37,5	6,13	0	1	3	4	380
5-1	31,5	4,56	1	0	3	4	350
5-2	19,27	2,54	3	4	8	15	1270
5-3	21,25	3,37	3	1	4	8	630
6-1	12,44	1,77	8	4	4	16	1120

Окончание табл. 2

Пробная площадь	Средний возраст, А, лет	Средняя высота, Н, м	Распределение елового подроста по категориям высоты, экз.			Итоговая численность, экз.	Численность на 1 га (экз./га)
			Мелкий (до 0,5 м)	Средний (от 0,51 до 1,5 м)	Крупный (выше 1,5 м)		
6-2	14	1,87	6	10	6	22	1700
6-3	25,8	4,5	5	0	5	10	750
7-1	15,91	2,32	5	3	3	11	790
7-2	9,59	1,14	13	10	4	27	1850
7-3	10,67	1,05	4	11	6	21	1680
8-1	11,09	1,55	8	1	2	11	680
8-2	6	0,55	0	1	0	1	80
8-3	51	8,17	0	0	3	3	300
9-1	30,36	4,85	1	3	7	11	990
9-2	26,89	4,47	2	1	6	9	780
9-3	21,64	3,51	8	1	5	14	980
10-1	11,3	1,62	28	6	9	43	2780
10-2	6,4	0,82	53	6	4	63	3530
10-3	12,05	1,79	15	1	4	20	1230

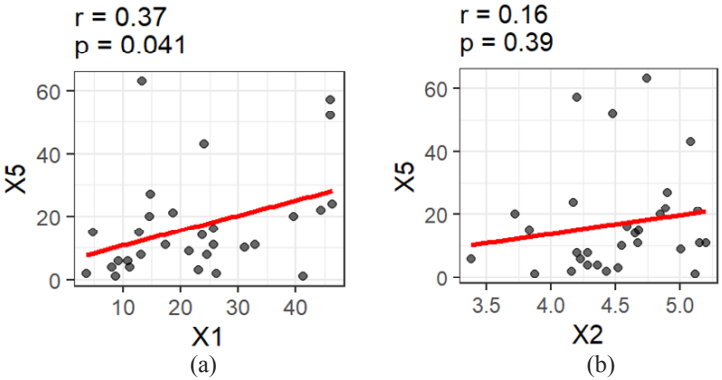
В результате корреляционного анализа была выявлена статистически значимая (достоверность/P-value<0,05) слабая положительная (корреляция/Correlation (R)<0,5) корреляция количества экземпляров елового подроста и содержания гумуса, %(X1), а также содержания NO_3 (X4).Значение численности подроста на рис. 2, 3 обозначено значением (X5). Результаты представлены в табл. 3 и на рис. 2, 3).

Таблица 3

Результаты корреляционного анализа численности подроста и почвенных характеристик

Results of correlation analysis of the number of undergrowth and soil characteristics

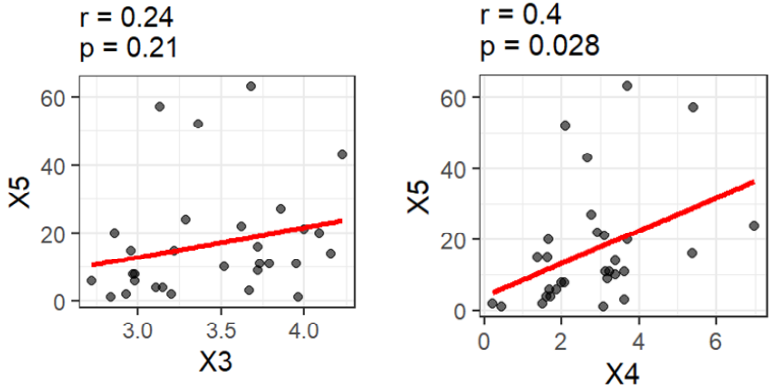
№	Почвенный параметр	Присвоенное обозначение	Корреляция, R	Достоверность, P
1	Содержание гумуса,%	X1	0.37	0.041
2	Актуальная кислотность, pH_{H2O}	X2	0.16	0.393
3	Обменная кислотность, pH_{KCl}	X3	0.24	0.211
4	Содержание мг на 100 г почвы NO_3	X4	0.40	0.028



(a) (b)

Рис. 2. a – взаимосвязь численности подроста и содержания гумуса; b – взаимосвязь численности подроста и актуальной кислотности почв

Fig. 2. a – relationship between the number of undergrowth and humus content; b –relationship between the number of undergrowth and actual soil acidity



(a) (b)

Рис. 3. a – взаимосвязь численности подроста и обменной кислотностью почв; b – взаимосвязь численности подроста и содержанием мг на 100 г почвы NO_3

Fig. 3. a – relationship between the number of undergrowth and exchangeable acidity of soils; b – relationship between the number of undergrowth and the content of mg per 100 g of soil NO3

По результатам расчета проективного покрытия на пробных площадях показатели доли мохового яруса на исследуемых объектах составляют от 32,8% (ПП №8) до 48.8% (ПП №4).

Анализируя карты парцеллярной структуры объектов исследования, можно отметить, что еловый подрост в основном располагается на следующих коренных парцеллах: сосново-сфагновой, сосново-зеленомошной, сосново-кисличной, сосново-майниковой, сосново-черничной и сосново-мертвопокровной. При этом на группу моховых парцелл приходится 26.61% от всей площади с подростом.

Заключение. Почвы на исследуемых объектах относятся к трем типам почв: подзолистому, подзолисто-болотному и болотному.

Вследствие избыточного и периодически застойного увлажнения исследуемых территорий, за счет присутствия микропонижений (перепад между разными участками находится в диапазоне от 77 до 85 м над уровнем моря) происходит развитие глеевого процесса и процесса торфонакопления, характерное для болотно-подзолистых и болотных почв, что влияет на долю сфагновых мхов.

Корреляционный анализ взаимосвязи показателей почвенных условий с количеством елового подроста дает возможность говорить о незначительном влиянии таких почвенных характеристик, как содержание гумуса, обменная и актуальная кислотность, обеспеченность подвижным азотом, на естественное возобновление ели по сравнению с условиями, создаваемыми непосредственно элементами растительного сообщества.

Отмечается существенный вклад особенностей рельефа в процесс формирования елового подроста.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Агрохимия: лабораторный практикум. СПб.: СПбГЛТУ, 2018. 48 с.

Беляева Н.В. Закономерности изменения структуры и состояния молодого поколения ели в условиях интенсивного хозяйственного воздействия: дисс. … д-ра с.-х. наук. СПб.: СПбГЛТУ, 2013. 431 с.

Благовидов Н.Л. Почвы Ленинградской области. Л.: Лениздат, 1946. 144 с.

Высоцкий Г.Н. О карте типов местопроизрастания // Современные вопросы русского сельского хозяйства. СПб., 1904. С. 81-94.

Грязькин А.В. Структурная организация фитоценозов южной тайги (на примере ельников зеленомошной группы типов леса). СПб.: СПбГЛТА, 1999. 136 с.

Грязькин А.В. Возобновительный потенциал таежных лесов (на примере ельников Северо-Запада России): монография. СПб.: СПбГЛТА, 2001. 188 с.

Гусев И.И., Третьяков С.В. Сезонный рост еловых молодняков под пологом сосновых древостоев // ИВУЗ. Лесной журнал. 1988. №3. С. 5-9.

Гусев М.В., Мелохова О.П., Романова Э.П. Сохранение и восстановление биоразнообразия. М., 2002. 286 с.

Декатов Н.Е. Возобновление ели в Дружносельском и Орлинском районах Сиверского опытного лесхоза в связи с прежним хозяйством // Труды и исследования по лесному хозяйству и лесной промышленности. 1931. Вып.12. С. 1-49.

Дылис Н.В. Структура лесного биогеоценоза. М.: Наука, 1969. 55 с.

Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 224 с.

Косумов Р.С., Демельханов М.Д. Лесные экосистемы как стабилизирующие факторы антропогенного воздействия на окружающую среду // Молодой ученый. 2016. № 3 (107). С. 415-420.

Миркин Б.М., Розенберг Г.С. Фитоценология: принципы и методы. М.: Наука, 1978. 212 с.

Морозов Г.Ф. Исследование лесов Воронежской губернии // Лесной журнал. 1913. Вып. 3-4. С. 461.

Морозов Г.Ф. Учение о лесе / ред. Нестеров В.Г. Л.: Гослесбумиздат, 1949. 456 с.

Новиков А.В. Возобновление ели в различных парцеллах ельника черничного // Современные проблемы и эффективность регулирования фитоценозов в лесном хозяйстве: сб. научн. тр. СПбНИИЛХ. СПб., 1999. С. 163-165.

Работнов Т.А. Фитоценология. М.: Изд-во МГУ, 1978. 384 с.

Раменский Л.Г. Введение в комплексное почвенно-геоботаническое исследование земель. М.: Сельхозгиз, 1938. 620 с.

Сеннов С.Н. Лесоведение и лесоводство. М.: Академия, 2005. 256 с.

Сукачев В.Н. Основы лесной геоботаники // Избранные труды в 3 т. Л., 1972. Т. 1: Основы лесной типологии и биогеоценологии. С. 142-200.

Тюрин И.В. Органическое вещество почв и его роль в почвообразовании и плодородии. М.: Сельхозгиз, 1937. 288 с.

Шаньгина Н.П., Феклистов П.А., Кузнецова А.А. Возобновление ели под пологом ельников в зависимости от напочвенного покрова // Экологические проблемы севера: межвуз. сб. науч. тр. 2010. Вып. 13. С. 27-30.

References

Agrochemistry: laboratory practical training. St. Petersburg: St. Petersburg State Forest Technical University, 2018. 48 p. (In Russ.)

Belyaeva N.V. Patterns of change in the structure and condition of the young generation of spruce under intensive economic impact: diss. … Doctor of Agricultural Sciences. St. Petersburg: SPbGLTU, 2013. 431 p. (In Russ.)

Blagovidov N.L. Soils of the Leningrad region. Leningrad: Lenizdat, 1946. 144 p. (In Russ.)

Classification and diagnostics of soils of the USSR. Moscow: Kolos, 1977. 224 p. (In Russ.)

Dekatov N.E. Renewal of spruce in Druzhnoselsky and Orlinsky districts of the Siversky experimental forestry enterprise in connection with the previous farm. *Works and research on forestry and forest industry*, 1931, iss. 12, pp. 1-49. (In Russ.)

Dylis N.V. Structure of forest biogeocenosis. Moscow: Nauka, 1969. 55 p. (In Russ.)

Gryazkin A.V. Structural organization of phytocenoses of the southern taiga (on the example of spruce forests of the green moss group of forest types). St. Petersburg: SPbGLTA, 1999. 136 p. (In Russ.)

Gryazkin A.V. Renewable potential of taiga forests (on the example of spruce forests of the North-West of Russia): monograph. St. Petersburg: SPbGLTA, 2001. 188 p. (In Russ.)

Gusev I.I., Tretyakov S.V. Seasonal growth of spruce young forests under the canopy of pine stands. *IVUZ. Forestry journal*, 1988, no. 3, pp. 5-9. (In Russ.)

Gusev M.V., Melokhova O.P., Romanova E.P. Conservation and restoration of biodiversity. Moscow, 2002. 286 p. (In Russ.)

Kosumov R.S., Demelkhanov M.D. Forest ecosystems as stabilizing factors of anthropogenic impact on the environment. *Young scientist*, 2016, no. 3 (107), pp. 415-420. (In Russ.)

Mirkin B.M., Rosenberg G.S. Phytocenology: principles and methods. Moscow: Nauka, 1978. 212 p. (In Russ.)

Morozov G.F. Study of forests of the Voronezh province. *Forestry journal*, 1913, iss. 3-4, p. 461. (In Russ.)

Morozov G.F. The study of the forest / ed. Nesterov V.G. Leningrad: Goslesbumizdat, 1949. 456 p. (In Russ.)

Novikov A.V. Regeneration of spruce in various parcels of blueberry spruce forest. *Modern problems and efficiency of phytocenosis regulation in forestry*: collection of scientific papers of St. Petersburg Research Institute of Forestry. St. Petersburg, 1999, pp. 163-165. (In Russ.)

Rabotnov T.A. Phytocenology. Moscow: MSU Publishing House, 1978. 384 p. (In Russ.)

Ramensky L.G. Introduction to complex soil-geobotanical study of lands. Moscow: Selkhozgiz, 1938. 620 p.

Sennov S.N. Forest science and forestry. Moscow: Akademiya, 2005. 256 p. (In Russ.)

Shangina N.P., Feklistov P.A., Kuznetsova A.A. Regeneration of spruce under the canopy of spruce forests depending on the ground cover. *Ecological problems of the north*: interuniversity collection of scientific papers, 2010, iss. 13, pp. 27-30. (In Russ.)

Sukachev V.N. Fundamentals of forest geobotany. *Selected works in 3 volumes.* Leningrad, 1972, vol. 1: Fundamentals of forest typology and biogeocenology, pp. 142-200. (In Russ.)

Tyurin I.V. Soil organic matter and its role in soil formation and fertility. Moscow: Selkhozgiz, 1937. 288 p. (In Russ.)

Vysotsky G.N. On the map of habitat types. // *Modern issues of Russian agriculture*. St. Petersburg, 1904, pp. 81-94. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 17.09.2024

Сергеева А.С. Взаимосвязь почвенных условий и численности елового подроста в спелых сосново-еловых древостоях Гатчинского района Ленинградской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 250–261. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.250-261

Исследование проведено в 2021-2024 гг. на Северо-Западе России (Ленинградская область Гатчинский район). Объектами исследования стали спелые сосново-еловые древостои, с участием в их составе сосны от 6 до 8 единиц, а также ели европейской (*Pícea ábies*) от 1 до 3 единиц, относящиеся к Балтийско-Белозерскому таежному лесорастительному району и к Лужско-Оредежскому ландшафту в районе Оредежского плато. Пробные площади заложены в лесах, не затронутых хозяйственной деятельностью человека длительное время. На 10 пробных площадях были заложены квадраты 10х10 м, для которых проведен сплошной перечет подроста, выполнено геоботаническое описание живого напочвенного покрова, заложены почвенные прикопки с дальнейшим агрохимическим анализом верхних горизонтов. Составлены картографические материалы парцеллярной структуры квадратами 10х10 м, выделенными на исследуемых объектах, с нанесенными деревьями основного древесного яруса, подростом и подлеском. В статье отражено распределение елового подроста по основным коренным парцеллам, выявленным в сосново-еловых лесах. Определены агрохимические показатели: содержание гумуса, показатели обменной и актуальной кислотности, степень обеспеченности подвижным азотом. Проведен корреляционный анализ взаимосвязи агрохимических показателей с численностью елового возобновления, показавший их незначительное влияние на возобновление ели европейской по сравнению с влиянием растительных элементов. Выявлено существенное влияние рельефа на процессы естественного возобновления путем формирования мохового яруса. Полученные результаты могут быть использованы для более точной оценки успешности естественного возобновления при проведении лесохозяйственных мероприятий, для восстановления и сохранения лесов юга Ленинградской области.

Ключевые слова: ель европейская, *Picea abies*, сосново-еловые древостои, парцелла, подрост, почвенные условия.

Sergeeva A.S. The relationship between soil conditions and the number of spruce undergrowth in mature pine-spruce stands of the Gatchina district of the Leningrad region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 250–261 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.250-261

The study was conducted in 2021-2024 in the North-West of Russia (Leningrad region, Gatchina district). The objects of the study were mature pine-spruce stands, with 6 to 8 units of pine and 1 to 3 units of European spruce (*Pícea ábies*), belonging to the Baltic-Belozersky taiga forest growth region of the Luga-Oredezh landscape in the Oredezh plateau area. Sample plots were laid out in forests that have not been affected by human economic activity for a long time. On 10 sample plots, 10x10 m squares were laid out, for which a continuous census of undergrowth was carried out, a geobotanical description of the living ground cover was made, soil pits were laid with subsequent agrochemical analysis of the upper horizons. Cartographic materials of parcel structure in 10x10 m squares allocated on the studied objects with marked trees of the main tree layer, undergrowth and underbrush have been compiled. The article reflects the distribution of spruce undergrowth by the main root parcels identified in pine-spruce forests. Agrochemical indicators have been determined: humus content, exchange and actual acidity indicators, degree of provision with mobile nitrogen. A correlation analysis of the relationship of agrochemical indicators with the number of spruce regeneration has been carried out, which showed their insignificant influence on the regeneration of European spruce, compared with the influence of plant elements. A significant influence of relief on the processes of natural regeneration by forming a moss layer has been revealed. The obtained results can be used for a more accurate assessment of the success of natural regeneration during forestry measures, for restoration and conservation of forests in the south of the Leningrad Region.

Keywords: Norway spruce, *Picea abies*, pine-spruce stands, parcel, undergrowth, soil conditions.

СЕРГЕЕВА Анастасия Сергеевна – аспирант кафедры лесоводства, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова. SPIN-код: 7341-0916.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: sergeeva838025@gmail.com

SERGEEVA Anastasia S. – PhD student of the Department of Forestry, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 7341-0916.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: sergeeva838025@gmail.com

УДК 632.1: 632.7

О.И. Гаврилова, А.В. Грязькин, Е.А. Гурылёва, А.П. Смирнов

ДИГРЕССИЯ ПРИДОРОЖНЫХ ЕЛЬНИКОВ ЮЖНОЙ КАРЕЛИИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ

Введение. В промышленно развитых регионах все леса испытывают существенную антропогенную нагрузку. Нередко лесные экосистемы быстро деградируют под воздействием комплекса негативных факторов, включая выбросы автотранспорта [Павлов, 2005; Алябьев, 2013; Беляева и др., 2015; Артемьев, Россинина, 2019; Белых, 2022; Евдокимов, Ярмишко, 2023]. Характерным примером такого воздействия являются ельники, произрастающие вдоль автомагистрали Санкт-Петербург–Мурманск. Ель обыкновенная в лесном фонде Республики Карелии занимает второе место по занимаемой площади [Грязькин, 2001; Гаврилова и др., 2017; Стороженко, 2017].

Известно, что степень антропогенного воздействия на лесные фитоценозы снижается с удалением от объектов техногенного загрязнения [Трунов, 2001; Малахова, Крылов, 2012; Евдокимов, Ярмишко, 2023]. В публикациях исследователей из разных регионов отмечается интенсивная дигрессия растительных сообществ в непосредственной близости от промышленных предприятий [Малахова, Крылов, 2012; Алябьев, 2013; Артемьев, Россинина, 2019; Евдокимов, Ярмишко, 2023]. В первую очередь негативное воздействие антропогенных факторов испытывает растительность нижних ярусов – живой напочвенный покров, подрост, подлесок [Гуталь, 2014; Беляева и др., 2015; Кази, 2016; Белых, 2022; Schneider, Roeder, 1993]. Заселение деревьев энтомовредителями, заражение древоразрушающими грибами, массовое усыхание ели наблюдается на втором этапе деградации лесных экосистем [Фёдоров, Сарнацкий, 2001; Маслов, 2010; Малахова, Крылов, 2012; Алябьев, 2013].

Опубликованные данные свидетельствуют о том, что наиболее крупные деревья испытывают более интенсивное антропогенное воздействие, что связано с максимальным накоплением поллютантов в кроне деревьев, составляющих верхний ярус древостоя [Фёдоров, Сарнацкий, 2001; Маслов, 2010; Малахова, Крылов, 2012; Алябьев, 2013]. Из состава лесных фитоценозов на ранних стадиях антропогенного воздействия выпадают виды, неустойчивые к промышленным выбросам. Из состава живого напочвенного покрова к

наиболее устойчивым видам относятся злаки, ситники и другие синантропные виды [Федулов и др., 2015; Белых, 2022]. Основная часть малоустойчивых видов относится к травяно-кустарничковому ярусу [Белых, 2022].

Цель исследования – выявление особенностей дигрессии основных компонентов лесных фитоценозов, произрастающих вдоль магистрали с интенсивным автомобильным движением в условиях южной Карелии. Исследование причин массового усыхания ели – шаг вперёд на пути познания биологии ели и экологии ельников в целом.

Материалы и методика исследования. Объект исследования – ельники, произрастающие вдоль федеральной трассы Мурманск–Санкт-Петербург. Для исследования были выбраны участки ельников на разном удалении от трассы, испытывающие разную степень влияния антропогенного воздействия (рис. 1), включая интенсивную рекреационную нагрузку со стороны городского населения (рис. 2).

Рис. 1. Массовый ветровал в распадающемся ельнике, произрастающем вдоль трассы Мурманск–Сант-Петербург

Fig. 1. Massive windthrow in a decaying spruce forest growing along the Murmansk–St. Petersburg highway

Рис. 2. Последствие рекреационного воздействия на ельники, произрастающие вдоль автомобильной трассы Мурманск–Санкт-Петербург

Fig. 2. The consequence of recreational exposure to spruce forests growing along the Murmansk–St. Petersburg highway

Этапы сукцессии на участках опытных ельников устанавливали в окнах, образовавшихся после полного разрушения основного компонента леса – древостоя. В окнах разного размера наглядно проявляются этапы смены пород и восстановления растительности всех компонентов лесного фитоценоза. В качестве контроля использовали ельники, произрастающие на максимальном удалении от трассы (более 200 м). Оценку видового состава и состояния растительности нижних ярусов проводили на круговых учетных площадках по 10 $м^2$ в соответствии с патентом РФ № 2084129 [Грязькин, 1997]. Количество учётных площадок зависело от размеров окна и составляло от 15 до 30. Для живого напочвенного покрова указывали видовой состав, встречаемость и проективное покрытие. Для подроста и подлеска учитывали численность, состав, высоту и жизнеспособность. Жизнеспособность растений устанавливали с учетом воздействия комплекса факторов, включая рекреационную нагрузку.

Почвы на объектах исследования среднеподзолистые модергумусные на валунном суглинке. Почвы маломощные, что хорошо видно на местах ветровала с вывороченными корнями (рис. 3).

Рис. 3. Общая характеристика почвы в ветровальной воронке и на вывороченных корнях

Fig. 3. General characteristics of the soil in the wind funnel and on the upturned roots

Результаты исследования. Ельники, произрастающие вдоль указанной автомагистрали, характеризуются однородным составом и небольшой дифференциацией деревьев по возрасту и диаметру стволов. Средний возраст древостоев составляет около 80 лет. Древостои произрастают по I-III классам бонитета.

Древостои на объектах исследования интенсивно распадаются. Доля сухостоя – более 27%. Это сопровождается массовым поражением стволов энтомовредителями и заражением древоразрушающими грибами (рис. 4). Воздействие энтомовредителей и древоразрушающих грибов приводит к образованию сухостоя, ветровала и бурелома.

Поврежденные деревья ели подвержены ветровалу и усыхают большими куртинами (рис. 5). В результате развала сухостоя образуются окна, диаметр которых варьирует от 10-15 м до 60-80 м.

Основные характеристики растительности на опытных участках представлены в табл. 1. Состав древостоев на контрольных опытных участках установлен по запасу, а в окнах – по количеству деревьев (молодняки).

Рис. 4. Заселение ослабленных деревьев ели короедами
Fig. 4. Colonization of weakened spruce trees by bark beetles

Рис. 5. Куртина сухостоя на объекте исследования (окно № 3)
Fig. 5. Deadwood curtain at the research object (window No. 3)

Таблица 1

Основные характеристики древостоев на объектах исследования

Main characteristics of forest stands at the study sites

Номер объекта	Тип леса	Состав древесной растительности верхнего яруса, %	Густота экз./га	Размеры окна, м	Элемент рельефа, уклон
1К	Екис.	100Е	560	–	плато
2К	Едол.	94Е4Олс2Б	630	–	подножье склона
3	Екис	94Ряб4Ивк2Б	1100	35	склон 15-20°
4	Бдол	51Б18Олс19Ивк9С3Ос	970	50-60	подножье склона
5	Екис	77Ряб12Б8Ивк 3Олс	1320	20	плато
6	Екис	49Ряб42Ивк9Б	1400	15-20	склон 10-15°
7	Ечер	72Ивк24Б4Ряб	780	10	склон 5-10°
8	Ечер	52Ряб28Ивк15Олс5Б	2800	30×80	склон 5-10°
9	Бчер	51Б42Ивк5Ос2С	830	30×60	подножье склона

Примечание. Здесь и далее: К – контроль, Екис – ельник кисличный, Едол – ельник долгомошный, Ечер – ельник черничный, Бдол – березняк долгомошный, Бчер – березняк черничный. Б – береза, Д – дуб, Е – ель, Ивк – ива козья, Олс – ольха серая, Ос – осина, Ряб – рябина, С – сосна

Для сравнения характеристик растительности использованы два участка с еловым древостоем двух типов леса в качестве контроля. Ельник кисличный на плато представлен древостоем, чистым по составу. Контрольный древостой у подножья склона на переувлажнённой почве в небольшом количестве включает ольху серую и березу пушистую.

Состав древесной растительности на объектах исследования в окнах характеризуется преобладанием рябины (*Sorbus aucuparia* L.) и ивы козьей (*Salix caprea* L.), что свидетельствует о смене пород на первом этапе сукцессии. Практически одновременно под пологом лиственно-хвойных молодняков в большинстве случаев появляется подрост ели (*Picea abies* (L.) H. Karst.), единично встречается дуб (*Quercus robur* L.), т.е. происходит вторичная стадия сукцессии – восстановление главной породы (табл. 2).

Таблица 2

Основные характеристики подроста на объектах исследования

The main characteristics of the undergrowth at the research sites

Номер объекта	Состав подроста, %	Общая густота подроста, экз./га	Средняя высота, см	Доля жизнеспособного, %
1К	96Е4Д	560	62	81
2К	94Е4Олс2Б	420	54	90
3	82Е12Б6Ос	1660	114	76
4	68Е14Б12С4Ос	820	60	62
5	88Е12Б	860	48	94
6	91Е6Б3Ос	3100	46	83
7	89Е10Б1Ос	2920	61	86
8	69Е17Б12Олс2Д	1020	170	74
9	67Е19Б12Ос2С	980	162	70

Окна, образовавшиеся после распада ельников, интенсивно заселяются травянистой и древесной растительностью. В составе подроста на всех опытных участках преобладает ель – от 67 до 96%. Доля жизнеспособного подроста в окнах составляет 76-95% и зависит от типа леса. На объектах с относительно богатыми почвами в составе подроста, кроме ели, произрастают дуб, береза и осина. На переувлажненных почвах в составе подроста встречается ольха серая (объекты 2 и 8).

В целом молодое поколение лесообразующих пород характеризуется преобладанием жизнеспособного подроста. Доля жизнеспособного выше у елового подроста – от 62 до 94%. На объекте 4 на избыточно увлажненных почвах доля сухого подроста достигает 42%.

На первом этапе зарастания окон в составе верхнего яруса преобладают ива козья, рябина обыкновенная, ольха серая (*Alnus incana* L.). Одновременно с подростом окна интенсивно заселяются подлесочными породами, такими как: рябина обыкновенная, ивы козья и ушастая (*Salix aurita* L.), черемуха обыкновенная (*Prunus padus* L.,), жимолость обыкновенная (*Lonicera xylosteum* L.), крушина ломкая (*Frangula alnus* Mill.), шиповник иглистый (*Rosa acicularis* Lindl.,), смородина красная (*Ribes rubrum* L.) (табл. 3).

Таблица 3

Основные характеристики подлеска на объектах исследования

The main characteristics of the shrub layer at the research sites

Номер объекта	Состав, %	Общая густота, экз./га	Средняя высота, см
1К	97Ряб2Шип1Жим	1476	106
2К	86Ряб12Ивк2Иву	824	110
3	76Ряб20Ивк3Чер1Смк	615	77
4	80Ряб18Крш2Шип	670	81
5	88Ряб9Крш3Жим	472	88
6	48Ряб28Ивк9Крш8Чер7Буз	580	110
7	90Ряб4Крш3Чер3Шип	1000	122
8	58 Ряб21Ивк9Чер7Буз5Смк	400	108
9	62Ряб32Крш6Шип	410	98

Примечание. Буз – бузина красная, Жим – жимолость обыкновенная, Ивк – ива козья, Иву – ива ушастая, Крш – крушина ломкая, Ряб – рябина обыкновенная, Смк – смородина красная, Шип – шиповник иглистый

В составе подлеска чаще всего встречаются рябина обыкновенная, ива козья и крушина ломкая. Доля других видов в составе подлеска не превышает 15% (суммарно). Численность подлеска под пологом верхнего яруса варьирует в пределах от 400 до 1480 экз./га. По средней высоте различия минимальны – от 77 до 122 см.

Живой напочвенный покров характеризуется большим разнообразием, однако представлен преимущественно теневыносливыми видами, относящимися к мезофитам и гигрофитам (табл. 4).

Наибольший показатель встречаемости видов в составе живого напочвенного покрова характерен для 3-5 видов: черники обыкновенной, кислицы обыкновенной, щитовника иглистого, майника двулистного и седмичника европейского. При этом проективное покрытие отдельных видов не превышает 31% (кислица обыкновенная) и 36% (черника обыкновенная). Большинство видов травяно-кустарничкового яруса занимают не более 10% площади опытного участка. Проективное покрытие мхов в целом выше, чем у отдельных видов травянистых растений, например, сфагнумы покрывают до 43% площади опытного участка (объект № 2), а кукушкин лен – 62% (объект № 4). Зеленые мхи занимают не более 32%. В их составе выделены представители четырех родов – дикранумы (*Dicranum* sp. Hedw.), плеурициум (*Pleurozium* sp. Mitt.), ритидиадельфус (*Rhytidiadelphus* sp. Warnst.) и гилокомиевые (*Hylocomium* sp. Hedw.).

Таблица 4

Видовой состав и проективное покрытие живого напочвенного покрова на опытных объектах

Species composition and projective coverage of living ground cover at experimental sites

Название вида	Проективное покрытие, %								
	1К	2К	3	4	5	6	7	8	9
Брусника – *Vaccinium vitis-idaea* L.	+	+	12	–	+	10	14	8	6
Вейник наземный – *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth	+	–	+	+	10	8	8	13	11
Голокучник Линнея – *Gymnocarpium dryopteris* (L.) Newman	+	–	+		+	6	+	+	–
Иван-чай узколистный – *Chamaenerion angustifolium* (L.) Holub	+	–	+	–	+	+	+	–	–
Зеленые мхи – Bryidae sp.	19	+	12	+	12	25	32	+	23
Земляника лесная – *Fragaria vesca* L.	+	–	+	–	+	+	+	–	+
Кислица обыкновенная – *Oxalis acetosella* L.	23	–	31	–	28	21	10	+	+
Кукушкин лен – *Polytrichum commune* Hedw.	–	46	–	62	–	+	–	–	22
Линнея северная – *Linnaea borealis* L.	–	+	–	+	–	+	+	+	+
Луговик извилистый – *Avenella flexuosa* L.	11	–	+	–	8	9	+	12	+
Луговик дернистый – *Deschampsia cespitosa* (L.) P.Beauv.	+		+		+	+	+	8	–
Майник двулистный – *Maianthemum bifolium* (L.) F.W.Schmidt	+	+	+	–	+	+	+	6	+
Малина – *Rubus idaeus* L.	+	–	+	–	+	+	–	+	–
Марьянник лесной – *Melampyrum sylvaticum* L.	6	–	3	–	4	7	+	4	–
Мятлик обыкновенный – *Poa trivialis* L.	+	–	+	–	+	+	–	–	–
Ожика волосистая – *Luzula pilosa* (L.) Willd.	+	–	+	–	+	+	+	+	+
Плаун годичный – *Lycopodium annotinum* L.	–	+	–	+	–	+	–	–	–
Седмичник европейский –*Trientalis europaea* L.	+	+	+	–	+	+	+	+	+
Ситник развесистый – *Juncus effusus* L.	–	+	–	+	–	–	–	+	–
Сфагнумы – *Sphagnum* sp.	–	43	–	19	–	–	–	–	+
Фиалка собачья – *Viola canina* L.	–	+	+	+	+	–	+	+	+
Хвощ лесной – *Equisetum sylvaticum* L.	–	+	–	29	+	–	+	+	8
Черника обыкновенная– *Vaccinium myrtillus* L.	32	15	15	11	14	9	28	36	19
Щитовник игольчатый – *Dryopteris carthusiana* (Vill.) H.P.Fuchs	11	+	+	+	14	12	+	13	–
Итого видов	17	13	18	11	19	20	18	18	15

Примечание. Знак «+» означает присутствие вида на учётной площадке при проективном покрытии менее 5%, а знак «–» – отсутствие вида на учётной площадке

Обсуждение. По мнению некоторых исследователей, ельники европейской части России подвержены массовому усыханию с давних времён. Ещё в 1766 году в своей знаменитой монографии «Описании естественного состояния растущих в северных российских странах лесов», учёный-лесовод Фердинанд Габриель Фокель отмечал: «…что до состояния долговременности еловых дерев касается, то… такие леса целыми местами засыхают, ветер их вышатывает, и черви точат» [Фокель, 1766]. Массовому усыханию подвержены не только ельники, но и сосняки, на что указывают М.И. Трунов [2001], И.Н. Павлов [2005], Ю.П. Федулов и др. [2015].

В качестве основных причин усыхания насаждений указываются засухи [Малахова, Крылов, 2012; Алябьев, 2013; Белых, 2022], очаги интенсивного размножения короеда-типографа [Маслов, 2010; Малахова, Крылов, 2012; Алябьев, 2013], антропогенное воздействие (основная часть территории Северо-Запада России представлена лесами, испытывающими постоянную антропогенную нагрузку) [Олейникова, Зиновьева, 2012; Алябьев, 2013; Евдокимов, Ярмишко, 2023; Tjoelker et al., 2007]. Н.И. Федоров и В.В. Сарнацкий [2001] указывают на периодическое массовое усыхание ельников на территории Республики Беларусь под воздействием природных и антропогенных факторов.

Очаговое усыхание ельников отмечается и на территории Ленинградской области, причем на протяжении многих десятилетий. Об этом свидетельствуют результаты специальных исследований, проведенных в разных лесничествах области в разные годы [Грязькин, 2001; Гуталь, 2014; Беляева и др., 2015; Кази, 2016]. Для предотвращения массового усыхания возникающие очаги сухостойных ельников необходимо своевременно ликвидировать. С государственной точки зрения предупредительные мероприятия такого рода необходимы.

Заключение. Установлено, что еловые фитоценозы в условиях интенсивного воздействия рекреантов и выбросов автотранспорта характеризуются ускоренной деградацией. Средний возраст древостоев в стадии интенсивного распада составляет не более 80 лет. При этом проявляется тенденция к быстрому восстановлению ельников через короткую стадию смены ели лиственными породами.

В окнах, образовавшихся после распада древостоя, быстро появляются подрост и подлесок. Молодое поколение лесообразующих пород характеризуется преобладанием жизнеспособного подроста. Лишь в от-

дельных случаях доля сухого подроста ели может достигать 42%. Состав живого напочвенного покрова включает не только лесные виды, но и синантропные.

Вклад авторов. Вклад каждого автора в подготовке статьи равнозначный.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Алябьев А.Ф. Усыхание ельников Подмосковья // Лесной вестник / Forestry bulletin. 2013. № 6. С. 159-166.

Артемьев О.С., Россинина А.А. Динамика численности деревьев хвойных пород в условиях крупного промышленного центра (на примере города Красноярска) // Хвойные бореальной зоны. 2019. № 2. С. 6-12.

Беляева Н.В., Григорьева О.И., Ароян К.А. Возобновление ели под пологом древостоя в условиях Ленинградской области // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 6 (17). С. 123-130.

Белых О.А. Прогнозирование динамики лесных экосистем в условиях загрязнения промышленными аэровыбросами по состоянию травянистых растений // Известия КГТУ. 2022. № 66. С. 19-29.

Гаврилова О.И., Пак К.А., Морозова И.В., Юрьева А.Л. Формирование искусственных сосновых древостоев в условиях карельской таежной зоны // ИВУЗ. Лесной журнал. 2017. № 4 (358). С. 23-33.

Грязькин А.В. Способ учета подроста. Патент РФ № 2084129 Российская Федерация, МКИ С 6 А 01 G 23/00. № 94022328/13; заявл. 10.06.94; опубл. 20.07.97, Бюл. № 20.

Грязькин А.В. Возобновительный потенциал таежных лесов (на примере ельников Северо-Запада России): монография. СПб.: СПбГЛТА, 2001. 188 с.

Гуталь М. Жизнеспособность и структура подроста ели под пологом древостоев и на вырубках: автореф. дис. … канд. биол. наук. СПб., 2014. 19 с.

Евдокимов А.С., Ярмишко В.Т. Структура древесного яруса лесных сообществ центральной части Кольского полуострова, формируемая при снижении аэротехногенной эмиссии // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2023. № 1. С. 32-39.

Кази И.А. Исследование конкурентных отношений между древосто-ем и подростом в насаждениях, сформированных рубками ухода: автореф. дисс. … канд. с.-х. наук. СПб., 2016. 20 с.

Малахова Е.Г., Крылов А.М. Усыхание ельников в Клинском лесни-честве Московской области // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14, № 1 (8). С. 175-178.

Маслов А.Д. Короед-типограф и усыхание еловых лесов. М.: ВНИИЛМ, 2010. 138 с.

Олейникова Е.В., Зиновьева И.С. Антропогенное воздействие на леса // Успехи современного естествознания. 2012. № 4. С. 191-193.

Павлов И.Н. Древесные растения в условиях техногенного загрязнения. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2005. 360 с.

Стороженко В.Г. Естественное возобновление в коренных разновозрастных ельниках европейской тайги России // Сибирский лесной журнал. 2017. № 3. С. 87-92. DOI: 10.15372/SJFS20170309.

Трунов М.И. Жизненное состояние сосновых насаждений под влиянием техногенного загрязнения атмосферы // География и природопользование Сибири. 2001. № 4. С. 207-214

Федулов Ю.П., Котляров В.В., Доценко К.А. Устойчивость растений к неблагоприятным факторам среды. Краснодар: КубГАУ, 2015. 64 с.

Фёдоров Н.И., Сарнацкий В.В. Особенности формирования лесов Белоруссии в связи с их периодическим массовым усыханием. Минск: Тэхна-логія, 2001. 179 с.

Фокель Ф.Г. Описание естественного состояния растущих в северных Российских странах лесов с различными примечаниями и наставлениями как оные разводить. СПб.: Морской Шляхетский Кадетский Корпус, 1766. 375 с.

Schneider B., Roeder A. Dynamics of Natural Regeneration of Norway Spruce under Shelters of Old Stands // Allgemeine Forst-Zeitschrift. 1993. Vol. 48 Extent: v. 57-60 (2). P. 37-43.

Tjoelker M.G., Boratynski A., Bugała W. Biology and Ecology of Norway Spruce. Springer Netherlands, 2007. 474 p.

References

Alyabyev A.F. Drying of spruce forests in the Moscow region. *Forestry bulletin*, 2013, no. 6, pp. 159-166. (In Russ.)

Artemyev, O.S., Rossinina A.A. Dynamics of the number of coniferous trees in a large industrial center (on the example of the city of Krasnoyarsk). *Conifers of boreal zone,* 2019, no. 2, pp. 6-12. (In Russ.)

Belyaeva N.V., Grigorieva O.I., Aroyan K.A. Renewal of spruce un-der the canopy of a stand in the conditions of the Leningrad region. *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice,* 2015, vol. 3, no. 6 (17), pp. 123-130. (In Russ.)

Belykh O.A. Forecasting the dynamics of forest ecosystems in conditions of pollution by industrial air emissions based on the state of herbaceous plants. *KSTU News*, 2022, no. 66, pp. 19-29. (In Russ.)

Evdokimov A.S., Yarmishko V.T. The structure of the tree layer of forest communities in the central part of the Kola Peninsula, formed with a decrease in aerotechnogenic emissions. *Bulletin of the RUDN. Series: Ecology and life safety*, 2023, no. 1, pp. 32-39. (In Russ.)

Fedorov N.I., Sarnatsky V.V. Features of the formation of forests in Belarus in connection with their periodic mass drying out. Minsk: Tekhnalogya, 2001. 179 p. (In Russ.)

Fedulov Yu.P., Kotlyarov V.V., Dotsenko K.A. Plant resistance to adverse environmental factors. Krasnodar: KubGAU, 2015. 64 p. (In Russ.)

Fokel F.G. Description of the natural state of forests growing in northern Russian countries with various notes and instructions on how to plant them. St. Petersburg: Marine Noble Cadet Corps, 1766. 375 pp. (In Russ.)

Gavrilova O.I., Pak K.A., Morozova I.V., Yuryeva A.L. Formation of artificial pine stands in the conditions of the Karelian taiga zone. *IVUZ. Forest magazine*, 2017, no. 4 (358), pp. 23-33. (In Russ.)

Gryazkin A.V. The method of accounting for undergrowth. Patent of the Russian Federation No. 2084129 Russian Federation, MCI C 6 A 01 G 23/00. - No. 94022328/13; Application. 10.06.94; Pub. 07/20/97, Byul, no. 20. (In Russ.)

Gryazkin A.V. The renewable potential of taiga forests (on the example of spruce forests in the North-West of Russia): monograph. St. Petersburg: SPbGLTA, 2001. 188 p. (In Russ.)

Gutal M. Viability and structure of spruce undergrowth under the canopy of stands and in cuttings: author's abstract. Diss. … Cand. Biol. Sci. St. Petersburg, 2014. 19 p. (In Russ.)

Kazi I.A. A Study of the competitive relationship between a stand and a teenager in plantations formed by logging. Diss. … Cand. Agr. Sci. St. Petersburg, 2016. 20 p. (In Russ.)

Malakhova E.G., Krylov A.M. Drying of spruce forests in the Klin forestry of the Moscow region. *News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2012, vol. 14, no. 1 (8), pp. 175-178. (In Russ.)

Maslov A.D. The bark beetle and the drying out of spruce forests. Moscow: VNIILM, 2010. 138 p. (In Russ.)

Oleinikova E.V., Zinovieva I.S. Anthropogenic impact on forests. *Successes of modern natural science*, 2012, no. 4, pp. 191-193. (In Russ.)

Pavlov I.N. Woody plants in conditions of technogenic pollution. Ulan-Ude: BNC SB RAS, 2005. 360 p. (In Russ.)

Schneider B., Roeder A. Dynamics of Natural Regeneration of Norway Spruce under Shelters of Old Stands. *Allgemeine Forst-Zeitschrift*, 1993, vol. 48 Extent: vol. 57–60 (2), pp. 37-43.

Storozhenko V.G. Natural renewal in indigenous spruce forests of the European taiga of Russia. *Siberian forest journal*, 2017, no. 3, pp. 87-92. DOI: 10.15372/SJFS20170309. (In Russ.)

Tjoelker M.G., Boratynski A., Bugała W. Biology and Ecology of Norway Spruce. Springer Netherlands, 2007. 474 p.

Trunov M.I. Vital state of pine plantations under the influence of man-made atmospheric pollution. *Geography and nature management of Siberia*, 2001, no. 4, pp. 207-214. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 17.10.2024

Гаврилова О.И., Грязькин А.В., Гурылёва Е.А., Смирнов А.П. Дигрессия придорожных ельников южной Карелии под воздействием антропогенных факторов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 262–277. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.262-277

Представлены экспериментальные данные по составу растительности на лесных участках, подверженных комплексному воздействию антропогенных факторов. Объект исследования – деградирующие ельники, средний возраст которых около 80 лет. Ельники произрастают на юго-западной окраине г. Петрозаводска. Установлено, что ельники, произрастающие вдоль федеральной трассы Мурманск–Санкт-Петербург на территории Республики Карелии, разрушаются с образованием окон разного размера на месте распадающихся древостоев. Деградация придорожных ельников усугубляется под воздействием интенсивной рекреационной нагрузки. Диаметр окон – от 10 до 80 м. Показано, что окна быстро зарастают лиственными породами, представленными преимущественно березой, осиной, ольхой серой, рябиной, ивой козьей. Густота молодняков достигает 2800 экз./га. Показано, что средняя высота молодняков зависит от состава древесных пород, среднего возраста деревьев, диаметра окна и составляет от 4 до 7 м. Одновременно под пологом сформировавшихся лиственных молодняков появляется подрост ели. Общая численность подроста может составлять до 3100 экз./га. Преобладает подрост категории «жизнеспособный» – от 62 до 94% от общей численности. Средняя высота подроста ели – от 0,5 до 1,7 м. В составе живого напочвенного покрова выявлено 22 вида сосудистых растений и не менее 6 видов мхов. В составе подлеска выявлено 8 видов: бузина красная, жимолость обыкновенная, ива козья, ива ушастая, крушина ломкая, рябина обыкновенная, смородина красная, шиповник иглистый. Общая численность подлесочных пород достигает 1500 экз./га. Из травянистых растений максимальное проективное покрытие имеют вейник наземный – до 13%, кислица обыкновенная – до 31%, черника обыкновенная – до 36% и щитовник иглистый – до 14%. Величина встречаемости этих видов составляет от 80 до 100%. Зелеными мхами в целом покрыто до 32% площади. Проективное покрытие кукушкиным льном на отдельных учетных площадках составляет 62%.

Ключевые слова: Республика Карелия, структура фитоценоза, ель европейская, антропогенное воздействие, видовой состав.

Gavrilova O.I., Gryazkin A.V., Guryleva E.A., Smirnov A.P. Digression of the roadside spruce forests of south Karelia under the influence of anthropogenic factors. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 262–277 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.262-277

Experimental data on the composition of vegetation in forest areas subject to the complex influence of anthropogenic factors are presented. The object of the study is degrading spruce forests, the average age of which is about 80 years. Spruce forests grow on the southwestern outskirts of Petrozavodsk. It has been established that spruce forests growing along the federal highway Murmansk-St. Petersburg on the territory of the Republic of Karelia are destroyed with the formation of windows of different sizes in the place of decaying forest stands. The degradation of roadside spruce forests is aggravated under the influence of intense recreational load. The diameter of the windows varies from 10 to 80 m. It is shown that the windows are quickly overgrown with deciduous trees, represented mainly by birch, aspen, gray alder, rowan, and goat willow. The density of young growth reaches 2800 ind./ha. It is shown that the average height of young stands depends on the composition of tree species, the average age of the trees, the diameter of the window and ranges from 4 to 7 m. At the same time, under the canopy of the formed deciduous young stands, spruce regrowth appears. The total number of undergrowth can be 3100 ind./ha. Teenagers of the "viable" category predominate – from 62 to 94% of the total number. The average height of spruce undergrowth varies from 0.5 to 1.7 m. 22 species of vascular plants and at least 6 species of mosses were identified as part of the living ground cover. Eight species were identified as part of the undergrowth: red elderberry, common honeysuckle, goat willow, long-eared willow, brittle buckthorn, common rowan, red currant, and needle hips. The total number of undergrowth species reaches 1500 ind./ha. Of the herbaceous plants, the maximum coverage is *Calamagrostis arundinacea* (L.) Roth, – up to 13%, *Oxalis acetosella* L. – up to 31%, *Vaccinium myrtillus* L., – up to 36% and *Dryopteris carthusiana* (Vill.) H.P.Fuchs – up to 14%. In general, up to 32% of the area is covered with green mosses. The projected coverage with *Polytrichum commune* Hedw. on individual accounting sites is 62%.

Keywords: Republic of Karelia, structure of phytocenosis, Norway spruce, anthropogenic impact, species composition.

ГАВРИЛОВА Ольга Ивановна – профессор кафедры технологии и организации лесного комплекса Петрозаводского государственного университета, доктор сельскохозяйственных наук. ORCID: 0000-0002-1717-3085. SPIN-код: 5256-1690. AuthorID: 495775. ResearcherID: AAF-6295-2019.

185910, пр. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Россия. E-mail: ogavril@mail.ru

GAVRILOVA Olga I. – DSc (Agricultural), Professor of the Department of Technology and Organization of the Forest Complex, Petrozavodsk State University. ORCID: 0000-0002-1717-3085. SPIN-code: 5256-1690. AuthorID: 495775. ResearcherID: AAF-6295-2019.

185910. Lenin av. 33. Petrozavodsk. Russia. E-mail: ogavril@mail.ru

ГРЯЗЬКИН Анатолий Васильевич – профессор кафедры лесоводства Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор биологических наук. SPIN-код: 7206-1050. ResearcherID: C-6699-2018. ORCID: 0000-0002-3497-9312. SCOPUS AuthorID: 55988504200.

194024, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: lesovod@bk.ru

GRYAZKIN Anatoly V. – DSc (Biological), Professor of the Department of Forestry, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 7206-1050. Researcher ID: C-6699-2018. ORCID: 0000-0002-3497-9312. SCOPUS AuthorID: 55988504200.

194024. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: lesovod@bk.ru

ГУРЫЛЕВА Екатерина Андреевна – магистрант Петрозаводского государственного университета.

185910, пр. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Россия.

GURYLEVA Ekaterina A. – master's student, Petrozavodsk State University.

185910. Lenin av. 33. Petrozavodsk. Russia.

СМИРНОВ Александр Петрович – профессор кафедры лесоводства Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 9945-4870, ORCID: 0000-0001-7720-216X.

194024, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: frontera12@gmail.com

SMIRNOV Alexander P. – DSc (Agricultural), Professor of the Department of Forestry of the St.Petersburg State Forestry University. SPIN-code: 9945-4870, ORCID: 0000-0001-7720-216X.

194024. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: frontera12@gmail.com

УДК 630*181

Д.В. Логунов

ПЕРСПЕКТИВЫ ИНТРОДУКЦИИ РАЗЛИЧНЫХ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ РОДА ЛИСТВЕННИЦА (*LARIX* MILL.) В НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ

Введение. Воспроизводство и рациональное использование лесных экосистем, проведение озеленительных работ, создание искусственных насаждений на новых природных территориях, подверженных сильным антропогенным нагрузкам, – важнейшие задачи лесного хозяйства и современной лесной экологии. Леса являются одним из основных средств экологической стабилизации антропогенно нарушенных территорий. Одна из актуальных задач, стоящих перед лесным хозяйством, – повышение продуктивности и качества лесов путем внедрения новых хозяйственно ценных быстрорастущих древесных пород. Важным направлением в искусственном лесовыращивании является интродукция растений, которая выступает важнейшим конструктивным механизмом для повышения уровня биологического разнообразия. В Нижегородской области, как показал многолетний опыт, для повышения продуктивности и обогащения растительных ресурсов значительный интерес представляет лиственница [Логунов, 2002; Ибрагимов и др., 2006; Улитин, Бессчетнов, 2020].

По данным многих исследователей [Хлюстов, Корешков, 2017; Логунов, 2018; Мерзленко и др., 2022], лиственница долговечна, устойчива против вредных климатических воздействий и пожаров, повреждения насекомыми и грибами, обладает почвозащитными, а также водоохранными, эстетическими и санитарно-гигиеническими функциями; ее древесина имеет высокие механические качества.

Ключевым свойством древесных растений, характеризующим их состояние и определяющим успешность роста и развития, является способность производить жизнеспособные семена в условиях сильного техногенного воздействия [Брынцев, Лавренов, 2019; Кищенко, 2021; Боровикова, Антонов, 2022].

Правильная оценка интродукционных возможностей видов данного рода и выбор из них наиболее перспективных позволит создавать продуктивные насаждения различного целевого назначения, в том числе зеленые насаждения на территориях, подверженных сильным антропогенным нагрузкам [Барченков и др., 2023; Корякина и др., 2024; Николаева и др., 2024].

Общая площадь, занимаемая лиственничными насаждениями в Нижегородской области, незначительна [Бессчетнов и др., 2018; Есичев и др., 2021; Логунов, 2022], в связи с чем проведенное исследование, связанное с оценкой перспектив интродукции различных видов лиственницы в условиях Нижегородской области, выглядит весьма актуальным.

Объектами исследования были 8 видов лиственницы, произрастающих в ботаническом саду Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. Это лиственницы европейская (*Larix decidua* Mill.), Сукачева (*Larix sukaczewii* Dylis), даурская (*Larix dahurica* Turcz. ex Trautv.), японская (*Larix leptolepis* (Siebold & Zucc.) Gordon), широкочешуйчатая (*Larix ×eurolepis* A. Henry), повислая (*Larix pendula* (Aiton) Salisb.), Любарского (*Larix ×lubarskii* Sukaczev) и польская (*Larix ×polonica* Racib.). Образцы семян исследуемых видов были получены из следующих пунктов интродукции: лиственница европейская – из г. Санкт-Петербурга (возраст 50 лет); лиственница Сукачева – аборигенный вид (возраст 46 лет); лиственница даурская – из г. Хабаровска (возраст 47 лет); лиственница японская – из Республики Украина (возраст 47 лет); лиственница широкочешуйчатая – из г. Москвы (возраст 47 лет); лиственница плакучая – из Республики Украина (возраст 40 лет); лиственница Любарского – из г. Таллинна (возраст 39 лет); лиственница польская – из г. Каунаса (возраст 45 лет).

Цель исследования – сравнительная оценка жизнеспособности и перспектив дальнейшего хозяйственного использования различных представителей рода Лиственница в условиях Нижегородской области.

Материалы и методика исследования. Каждый изучаемый вид лиственницы представлен групповой и аллейной посадкой из 3-20 деревьев. Размещение и густота посадок в каждой группе идентичны. Исследуемые виды располагались в относительно сходных условиях среды (режимы водного и минерального питания, почвенные условия и степень освещенности), поэтому влияние факторов внешней среды на проявление различий сведено к минимуму [Мамаев, 1969].

Сравнительная оценка жизнеспособности и перспектив интродукции видов проводилась по данным визуальных наблюдений с учетом существующих методических разработок [Лапин, Сиднева, 1973].

Для оценки жизнеспособности и перспективности растений приняты 7 основных показателей (табл. 1), которые определялись путём систематических визуальных наблюдений за общим и сезонным развитием растений и вместе с тем могут характеризовать состояние и возможность существования этих растений в данных условиях.

Таблица 1

Показатели для оценки жизнеспособности растений в районе интродукции

Indicators for assessing the viability of plants in the area of introduction

Показатели	*Баллы*
1. одревеснение побегов	
100% длины	20
75% длины	15
50% длины	10
25% длины	5
не одревесневают	1
2. зимостойкость	
повреждений нет	25
обмерзает не более 50% длины однолетних побегов	20
обмерзает 50-100% длины однолетних побегов	15
обмерзают двухлетние и более старые части растений	10
обмерзает крона до уровня снегового покрова	5
обмерзает вся надземная часть	3
растения вымерзают целиком	1
3. сохранение формы роста	
сохраняется	10
восстанавливается	5
не восстанавливается	1
4. побегообразовательная способность	
высокая – 6 и более побегов на 1 двухлетний побег	5
средняя – 3-5 побегов на 1 двухлетний побег	3
низкая – 1-2 побегов на 1 двухлетний побег	1
5. прирост в высоту	
ежегодный	5
не ежегодный	2
6. способность к генеративному развитию	
семена созревают	25
семена не созревают	20
цветёт, не плодоносит	15
не цветёт	1
7. способы размножения в культуре	
самосев	10
искусственный посев	7
естественное вегетативное размножение	5
искусственное вегетативное размножение	3
повторное привлечение извне	1

Путем суммирования баллов по всем оценочным показателям жизнеспособности определялась группа перспективности для каждого исследуемого вида лиственницы. Для этой цели использовали шкалу оценки перспективности интродукции (табл. 2).

Перспективность интродукции растений в каком-либо районе зависит от их жизнеспособности в новых условиях существования. Жизнеспособность проявляется в особенностях в полноте прохождения растениями циклов сезонного и онтогенетического развития. Большие или меньшие отклонения в указанных циклах развития позволяют судить о пригодности растений для практического использования в районе интродукции.

Результаты исследования. Оценка жизнеспособности сравниваемых видов рода Лиственница по данным визуальных наблюдений представлена в табл. 3.

Таблица 2

Шкала оценки перспективности интродукции взрослых растений

A scale for assessing the prospects of introducing adult plants

№ п.п.	Группа перспективности	Соответствующая сумма балов
1	вполне перспективные	91-100
2	перспективные	76-90
3	менее перспективные	61-75
4	малоперспективные	41-60
5	неперспективные	21-40
6	абсолютно непригодные	5-20

Таблица 3

Оценка жизнеспособности видов по данным визуальных наблюдений

Assessment of species viability based on visual observations

Показатель	Баллы жизнеспособности видов лиственницы							
	европейская	Сукачева	даурская	японская	широкочешуйчатая	повислая	Любарского	польская
Одревеснение побегов	20	20	20	20	20	20	20	20
Зимостойкость	25	25	25	25	25	25	25	25
Сохранение формы роста	10	10	10	10	10	10	10	10
Побего-образовательная способность	5	5	1	3	3	3	1	1
Прирост в высоту	5	5	5	5	5	5	5	5
Способность к генеративному развитию	25	25	25	25	25	25	25	25
Способы размножения	10	10	7	7	7	7	7	7

Как свидетельствуют данные табл. 3, сравниваемые виды рода Лиственница при оценке их жизнеспособности по большинству анализируемых показателей (по данным визуальных наблюдений) имеют высший балл жизнеспособности. Так, у анализируемых видов происходит полное одревеснение всего годичного прироста, в течение зимнего периода не обмерзают годичные побеги, сохраняется форма роста в культуре. Кроме того, исследуемые виды лиственницы имеют ежегодный прирост в высоту и способны к созреванию семян.

Согласно полученным данным (табл. 3), сравниваемые виды лиственницы имеют индивидуальные особенности по ряду анализируемых показателей. Так, лиственницы европейская и Сукачева характеризуются самой высокой побегообразовательной способностью, которая составила 5 баллов (6 и более побегов на один двухлетний побег). Самую низкую побегообразовательную способность имеют лиственницы даурская, польская и Любарского: она оценивается 1 баллом (1-2 побега на один двухлетний побег). Лиственницы японская, широкочешуйчатая и повислая занимают промежуточное положение.

Сравниваемые виды лиственницы неоднородны по такому важнейшему показателю, как способность размножения в культуре (табл. 3). Лиственница Сукачева и лиственница европейская по данному показателю имеют более высокий балл жизнеспособности, чем другие виды. Данные виды способны давать жизнеспособное потомство самосевом. Все исследуемые виды лиственницы способны размножаться путем искусственного посева.

Оценка перспективности интродукции сравниваемых видов лиственницы по данным визуальных наблюдений приведена в табл. 4.

Таблица 4

Перспективность интродукции видов лиственницы

Prospects for the introduction of larch species

№ п.п.	Вид	Сумма балов	Оценка перспективности
1	Лиственница европейская	100	Вполне перспективная
2	Лиственница Сукачева	100	Вполне перспективная
3	Лиственница даурская	93	Вполне перспективная
4	Лиственница японская	95	Вполне перспективная
5	Лиственница широкочешуйчатая	95	Вполне перспективная
6	Лиственница повислая	95	Вполне перспективная
7	Лиственница Любарского	93	Вполне перспективная
8	Лиственница польская	93	Вполне перспективная

Как свидетельствуют данные табл. 4, наивысшую сумму баллов жизнеспособности (100) имеют лиственница европейская и лиственница Сукачева (аборигенный вид). Лиственницы японская, широкочешуйчатая и повислая имеют более низкий балл жизнеспособности (95), однако также отнесены нами к группе вполне перспективных видов. Наименьший балл жизнеспособности (93) по данным визуальных наблюдений имеют лиственницы даурская, Любарского и польская. Таким образом, все исследованные виды лиственницы являются вполне перспективными для интродукции их в Нижегородскую область.

Обсуждение. Сравниваемые виды рода Лиственница при оценке их жизнеспособности по большинству анализируемых показателей (по данным визуальных наблюдений) имеют высший балл жизнеспособности. Так, у анализируемых видов происходит полное одревеснение всего годичного прироста, в течение зимнего периода не обмерзают годичные побеги, сохраняется форма роста в культуре. Кроме того, исследуемые виды лиственницы имеют ежегодный прирост в высоту и способны к созреванию семян.

Общая площадь лиственничных насаждений в Нижегородской области составляет около 15 тысяч гектаров, что является весьма скромным показателем. Благодаря высокой экологической и хозяйственной значимости данной породы она заслуживает более широкого использования в искусственном лесовыращивании. Лиственница Сукачева должна широко применяться в лесокультурном производстве, а интродуценты данного рода – в создании плантационных и ландшафтных культур, защитном лесоразведении, озеленении населенных пунктов.

В настоящее время лиственница весьма ограниченно представлена в озеленительных посадках г. Нижнего Новгорода, несмотря на ее высокие декоративные, эстетические и санитарно-гигиенические свойства. Научных исследований, посвященных интродукции лиственницы в Нижегородской области, крайне мало. Все это предопределяет большие возможности для проведения полномасштабных интродукционных работ, формирования ассортимента видов данного рода, тиражирования посадочного материала для создания зеленых насаждений лиственницы на территории населенных пунктов Нижегородской области.

Проведенные исследования, показавшие высокую жизнеспособность всех интродуцентов данного рода, создают предпосылки для проведения дальнейших исследований, связанных с изучением интродукционных возможностей различных видов лиственницы.

Заключение. Проведенное исследование показало, что наиболее высокой жизнеспособностью (100 баллов) в условиях Нижегородской области обладают лиственницы европейская и Сукачева. Общий показатель жизнеспособности у лиственницы японской, лиственницы широкочешуйчатой и лиственницы повислой несколько ниже (95 баллов), однако их также можно отнести к группе вполне перспективных видов. Более низкий показатель жизнеспособности имеют лиственница даурская, лиственница Любарского и лиственница польская (93 балла). Тем не менее все исследованные виды являются вполне перспективными для условий Нижегородской области.

Благодарности. Автор работы выражает благодарность сотрудникам ботанического сада Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского Т.Р. Хрыновой и И.В. Мишуковой за административную и техническую поддержку при проведении исследований.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Барченков А.П., Петров И.А., Шушпанов А.С., Голюков А.С. Климатический отклик радиального прироста видов лиственницы (*Larix* sp.) в географических культурах на территории Красноярской лесостепи // Сибирский экологический журнал. 2023. Т. 30, № 5. С. 661-674.

Бессчетнов В.П., Бессчетнова Н.Н., Есичев А.О. Оценка физиологического состояния представителей рода Лиственница (*Larix* Mill.) в условиях Нижегородской области // ИВУЗ. Лесной журнал. 2018. №1(361). С. 9-17.

Боровикова А.А., Антонов А.М. Сезонное развитие и качество семян видов рода *Larix* Mill. // Наукосфера. 2022. № 6-1. С. 146-151.

Брынцев В.А., Лавренов М.А. Оценка результатов интродукции видов *Larix* Mill. в центр европейской части России // Хвойные бореальной зоны. 2019. Т. 37, № 6. С. 385-395.

Есичев А.О., Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П. Видоспецифичность пигментного состава хвои представителей рода Лиственница // Хвойные бореальной зоны. 2021. Т. 39, № 4. С. 313-321.

Ибрагимов А.К., Бессчетнов В.П., Бессчетнова Н.Н., Логунов Д.В. О биологическом разнообразии лесных ресурсов Нижегородского Поволжья // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2006. №13. С. 36-38.

Кищенко И.Т. Рост и развитие интродуцированных видов *Larix* Mill. в таежной зоне (Карелия) // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. 2021. Т.14, № 1. С. 61-83.

Корякина Д.М., Дружинин Н.А., Дружинин Ф.Н. Особенности роста древесных видов-интродуцентов в Вологодской области // Сибирский лесной журнал. 2024. № 6. С. 78-87.

Лапин П.И., Сиднева С.В. Оценка перспективности интродукции древесных растений по данным визуальных наблюдений // Опыт интродукции древесных растений: сб. науч. тр. М., 1973. С. 7-19.

Логунов Д.В. Экологические особенности роста и развития представителей рода Лиственница (*Larix* Mill.) в условиях антропогенных ландшафтов Нижегородской области: дис. … канд. биол. наук. Н. Новгород, 2002. 210 с.

Логунов Д.В. Сезонная динамика основных пигментов в хвое некоторых представителей рода лиственница (Larix Mill.) в условиях Нижегородской области // ИВУЗ. Лесной журнал. 2018. №3(363). С. 37-42.

Логунов Д.В. Фенологическое состояние климатипов лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) в географических культурах (на примере Нижегородской области) // Вестник Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. №3(35). С. 43-48.

Мамаев С.А. О проблемах и методах внутривидовой систематики растений. Амплитуда изменчивости: Закономерности формообразования и дифференциации вида у древесных растений // Труды института экологии растений и животных. 1969. Вып. 64. С. 3–38.

Мерзленко М.Д., Мельник П.Г., Коженкова А.А. Интродукция климатипов лиственницы европейской в зоне смешанных лесов // ИВУЗ. Лесной журнал. 2022. №5(389). С. 37-46.

Николаева М.А., Орлова Л.В., Жигунов А.В., Николаев С.А., Беглецов М.С. Оценка развития лиственницы в географических культурах Ленинградской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 249. С. 103-126.

Улитин М.М., Бессчетнов В.П. Сравнительная оценка таксационных показателей лесных культур лиственницы сибирской (*Larix sibirica*) при интродукции в Нижегородской области // ИВУЗ. Лесной журнал. 2020. №6(378). С. 33-41.

Хлюстов В.К., Корешков Н.В. Рост и продуктивность географических культур лиственницы Сукачева в Московской области // Аграрный научный журнал. 2017. № 7. С. 52-58.

References

Barchenkov A.P., Petrov I.A., Shushpanov A.S., Golyukov A.S. Climatic response of radial growth of larch (*Larix* sp.) species in geographical crops in the Krasnoyarsk forest-steppe. *Siberian Ecological Journal*, 2023, vol. 30, no. 5, pp. 661-674. (In Russ.)

Besschetnov V.P., Besschetnova N.N., Yessichev A.O. Assessment of the physiological state of representatives of the genus larch (*Larix* Mill.) in the Nizhny Novgorod region. *IVUZ. Forest journal,* 2018, no. 1(361), pp. 9-17. (In Russ.)

Borovikova A.A., Antonov A.M. Seasonal development and seed quality of species of the genus Larix Mill. *Naukosphere*, 2022, no. 6-1, pp. 146-151. (In Russ.)

Bryntsev V.A., Lavrenov M.A. Evaluation of the results of the introduction of *Larix* Mill. species. to the center of the European part of Russia. *Conifers of the boreal zone*, 2019, vol. 37, no. 6, pp. 385-395. (In Russ.)

Ibragimov A.K., Besschetnov V.P., Besschetnova N.N., Logunov D.V. On the biological diversity of forest resources of the Nizhny Novgorod Volga region. *Actual problems of the forest complex*, 2006, no. 13, pp. 36-38. (In Russ.)

Khlyustov V.K., Koreshkov N.V. Growth and productivity of geographical crops of Sukachev larch in the Moscow region. *Agrarian Scientific Journal*, 2017, no. 7, pp. 52-58. (In Russ.)

Kischenko I.T. Growth and development of introduced species of Larix Mill. in the taiga zone (Karelia). *Journal of the Siberian Federal University. Series: Biology*, 2021, vol. 14, no. 1, pp. 61-83. (In Russ.)

Koryakina D.M., Druzhinin N.A., Druzhinin F.N. Features of the growth of introduced tree species in the Vologda oblast. *Siberian Forest Journal*, 2024, no. 6, pp. 78-87. (In Russ.)

Lapin P.I., Sidneva S.V. Assessment of the prospects of the introduction of woody plants according to visual observations. *The introduction of woody plants*: Collection of scientific papers. Moscow, 1973, pp. 7-19. (In Russ.)

Logunov D.V. Ecological features of the growth and development of representatives of the genus larch (*Larix* Mill.) in the conditions of anthropogenic landscapes of the Nizhny Novgorod region. Diss. … Cand. Biol. Sci. Nizhny Novgorod, 2002. 210 p. (In Russ.)

Logunov D.V. Seasonal dynamics of the main pigments in the conifers of some representatives of the genus larch (*Larix* Mill.) in the Nizhny Novgorod region. *IVUZ. Forest journal*, 2018, no. 3(363), pp. 37-42. (In Russ.)

Logunov D.V. The phenological state of climatypes of Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb.) in geographical cultures (on the example of the Nizhny Novgorod region). *Bulletin of the Nizhny Novgorod State Agricultural Academy*, 2022, no. 3(35), pp. 43-48. (In Russ.)

Mamaev S.A. On the problems and methods of intraspecific systematics of plants. Amplitude of variability: Patterns of species formation and differentiation in woody plants. *Proceedings of the Institute of Plant and Animal Ecology*, 1969, iss. 64, pp. 3-38. (In Russ.)

Merzlenko M.D., Melnik P.G., Kozhenkova A.A. Introduction of climatypes of European larch in the zone of mixed forests. *IVUZ. Forest journal,* 2022, no. 5(389), pp. 37-46. (In Russ.)

Nikolaeva M.A., Orlova L.V., Zhigunov A.V., Nikolaev S.A., Begletsov M.S. Assessment of the development of larch in geographical cultures of the Leningrad

region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2024, iss. 249, pp. 103-126. (In Russ.)

Ulitin M.M., Besschetnov V.P. Comparative assessment of the taxation indicators of Siberian larch (*Larix sibirica*) forest crops during introduction in the Nizhny Novgorod region. *IVUZ. Forest journal*, 2020, no. 6(378), pp. 33-41. (In Russ.)

Yessichev A.O., Besschetnova N.N., Besschetnov V.P. Species specificity of the pigment composition of needles of representatives of the genus larch. *Conifers of the boreal zone,* 2021, vol. 39, no. 4, pp. 313-321. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 18.02.2025

Логунов Д.В. Перспективы интродукции различных представителей рода Лиственница (*Larix* Mill.) в Нижегородской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 278–289. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.278-289

Цель исследования – сравнительная оценка жизнеспособности и перспектив дальнейшего хозяйственного использования различных представителей рода Лиственница в условиях Нижегородской области. Для оценки жизнеспособности и перспективности растений приняты 7 основных показателей, которые определялись путём систематических визуальных наблюдений за общим и сезонным развитием растений и вместе с тем могут характеризовать состояние и возможность существования этих растений в данных условиях. Это следующие показатели: одревеснение побегов; зимостойкость; сохранение формы роста; побегообразовательная способность; прирост в высоту; способность к генеративному развитию; способы размножения в культуре. У представителей рода Лиственница происходит полное одревеснение всего годичного прироста, в течение зимнего периода не обмерзают годичные побеги, сохраняется форма роста в культуре. Кроме того, исследуемые виды лиственницы имеют ежегодный прирост в высоту и способны к созреванию семян. Проведенное исследование показало, что наиболее высокой жизнеспособностью (100 баллов) в условиях Нижегородской области обладают лиственницы европейская и Сукачева. Общий показатель жизнеспособности у лиственницы японской, лиственницы широкочешуйчатой и лиственницы повислой несколько ниже (95 баллов), однако их также можно отнести к группе вполне перспективных видов. Более низкий показатель жизнеспособности имеют лиственница даурская, лиственница Любарского и лиственница польская (93 балла). Проведенные исследования, показавшие высокую жизнеспособность всех интродуцентов рода Лиственница, предопределяют большие возможности для проведения полномасштабных

интродукционных работ, формирования ассортимента видов данного рода, тиражирования посадочного материала для создания озеленительных посадок лиственницы на территории населенных пунктов Нижегородской области. Аборигенный вид – лиственница Сукачева – заслуживает более широкого использования в лесокультурном производстве, а интродуценты данного рода – в создании плантационных и ландшафтных культур, защитном лесоразведении, озеленении населенных пунктов.

Ключевые слова: лиственница, интродукция, зимостойкость, побегообразование, прирост, группа перспективности.

Logunov D.V. Prospects for the introduction of various representatives of the genus larch (*Larix* Mill.) in the Nizhny Novgorod region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 278–289 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.278-289

The purpose of the study is a comparative assessment of the viability and prospects of further economic use of various representatives of the genus Larch in the Nizhny Novgorod region. To assess the viability and prospects of plants, 7 main indicators were adopted, which were determined by systematic visual observations of the general and seasonal development of plants and, at the same time, can characterize the condition and the possibility of the existence of these plants in these conditions. These are the following indicators: lignification of shoots; winter hardiness; preservation of the growth form; shoot-forming ability; height gain; generative development ability; methods of reproduction in culture. Representatives of the genus larch have complete lignification of the entire annual growth, annual shoots do not freeze during the winter period, and the form of growth in the culture remains. In addition, the studied species of larch have an annual increase in height and are capable of seed maturation. The study showed that European larch and Sukachev's larch have the highest viability (100 points) in the Nizhny Novgorod region. The overall viability index of Japanese larch, broad-scaled larch and hanging larch is slightly lower (95 points), but they can also be attributed to the group of quite promising species. Daurian larch, Lyubarsky larch and Polish larch have a lower viability index (93 points). The conducted studies, which have shown the high viability of all introduced species of the genus Larch, determine great opportunities for carrying out full-scale introduction work, forming an assortment of species of this genus, replicating planting material to create landscaping plantings of larch in the territory of settlements of the Nizhny Novgorod region. The native species, Sukachev's larch, deserves wider use in forestry, and the introducers of this genus are used in the creation of plantation and landscape crops, protective afforestation, and landscaping of settlements.

Keywords: larch, introduction, winter hardiness, shoot formation, growth, perspective group.

ЛОГУНОВ Дмитрий Владимирович – заведующий кафедрой лесной таксации и лесоустройства Нижегородского государственного агротехнологического университета им. Л.Я. Флорентьева, доцент, кандидат биологических наук. SPIN-код: 4413-3653. ORCID: 0009-0008-5601-642X.

603107, пр. Гагарина, д. 97, г. Нижний Новгород, Россия. E-mail: logunov.dv1977@mail.ru

LOGUNOV Dmitry V. – PhD (Biological), Head of the Department of Forest Taxation and Forest Management, Nizhny Novgorod State Agrotechnological University, Associate Professor. SPIN-code: 4413-3653. ORCID: 0009-0008-5601-642X.

603107. Gagarin av. 97. Nizhny Novgorod. Russia. E-mail: logunov.dv1977@mail.ru

УДК 630*232.11

Т.А. Пристова, А.Л. Федорков, А.Б. Новаковский

ЗАПАСЫ НАДЗЕМНОЙ ФИТОМАССЫ СОСНЫ СКРУЧЕННОЙ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КУЛЬТУРАХ РЕСПУБЛИКИ КОМИ

Введение. В настоящее время во многих странах при реализации стратегии низкоуглеродного развития создаются лесные углерододепонирующие плантации и так называемые «карбоновые фермы», где выращиваются быстрорастущие древесные породы, способные адаптироваться к меняющемуся климату [Tumenbayeva et al., 2018].

Растущее потребление биотоплива в мире, в том числе из древесной фитомассы, ставит задачу оценки её запасов. В Северной Европе в качестве источника древесной фитомассы для производства биотоплива рассматриваются лесные культуры (энергетические плантации) быстрорастущих древесных пород [Mola-Judego et al., 2017]. Для производства биотоплива (щепы, топливных гранул, брикетов и др.) часто используются стволы молодых деревьев с кроной, вырубаемые при проведении рубок ухода в молодняках [Repola, Ulvcrona, 2014].

В таёжной зоне европейской части России перспективной быстрорастущей породой является североамериканский вид – сосна скрученная (*Pinus contorta* Dougl.) [Феклистов и др., 2008; Раевский, 2015; Fedorkov, Gutiy, 2017; Demidova et al., 2020]. Многими исследователями показано, что сосна скрученная на севере России и в Северной Европе растет быстрее, чем сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), и накапливает больший запас и фитомассу за один и тот же период времени, что может существенно сократить оборот рубки [Феклистов и др., 2008; Раевский, 2015; Пристова и др., 2023; Elfving et al., 2016; Fedorkov, Gutiy, 2017; Demidova et al., 2020]. Например, в Северной Швеции финальная рубка в искусственных насаждениях сосны скрученной проводится уже в 45-летнем возрасте [Manner, Lundström, 2024].

Существует ряд методов по определению фитомассы древостоя [Усольцев, Залесов, 2005; Zamolodchikov et al., 2003; Repola, 2009; Schepaschenko et al., 2018]. Одним из наиболее распространенных является метод модельных деревьев, который предполагает их рубку, поэтому на селекционных объектах (архивах клонов, испытательных и географических культурах, лесосеменных плантациях и др.) он не всегда может быть применен в связи с необходимостью сохранения деревьев для их последующего изучения и

размножения. В таких случаях применяются генерализованные аллометрические уравнения, исходным материалом для которых являются данные большого числа модельных деревьев, представляющих определённую территорию. В связи с различиями в закономерностях роста естественных и искусственных насаждений генерализованные аллометрические уравнения для этих двух категорий насаждений будут отличаться [Уткин и др., 1996; Бабич и др., 2010; Elfving et al., 2016]. Следует отметить, что в отечественной литературе мы не обнаружили данных по оценке фитомассы сосны скрученной, помимо опубликованных нами ранее [Пристова и др., 2023].

Цель работы – определение и сравнительная оценка надземной фитомассы сосны скрученной и сосны обыкновенной в экспериментальных культурах Республики Коми.

Материалы и методика исследований. Объекты исследования – экспериментальные культуры сосны скрученной в четырех лесничествах Республики Коми (рис. 1), созданные на участках различных категорий. Посадка сеянцев с закрытой корневой системой произведена весной 2004 и 2006 гг. с различными вариантами размещения (табл. 1). В качестве контроля использованы сеянцы сосны обыкновенной местного происхождения, которые выращивались в полиэтиленовой теплице вместе с сеянцами сосны скрученной, начиная от посева семян.

При закладке культур использована схема полного рендомизированного блока с линейными (рядовыми) делянками, высаженными в 6–12-кратной повторности. Согласно проведённым ранее исследованиям, из шести источников семян сосны скрученной (шесть лесосеменных плантаций, созданных по географическому принципу в Швеции), представленных в опыте, лучшие рост и сохранность показал один из самых северных (ЛСП Нарлинге), соответствующий провинции Юкон в Канаде, предназначенный для обеспечения семенами зоны 1 (рис. 1) [Fedorkov, Gutiy, 2017]. Хорошее состояние и рост культур этого происхождения отмечено также в Карелии [Раевский, 2015] и Архангельской области [Demidova et al., 2020].

Запасы надземной фитомассы в исследуемых экспериментальных В изучаемых экспериментальных культурах не проводились рубки ухода, которые обычно проводят в культурах сосны в 15-20-летнем возрасте. В связи с этим в настоящем исследовании были использованы деревья, не имеющие каких-либо дефектов ствола (двойные вершины, кривизна и т.д.) и отставания в росте, полагая, что при создании производственных культур именно такие деревья сформируют будущий древостой. В качестве опыта использована сосна скрученная из источника семян ЛСП Нарлинге, в качестве контроля – сосна обыкновенная местного происхождения. Измерения высот и диаметров (на высоте 1,3 м) в исследуемых культурах проводили в 2021–2023 гг.

■ –a ● - b

Рис. 1. Лесосеменные районы (1–6), лесосеменные плантации (ЛСП) сосны скрученной (a) в Швеции и экспериментальные культуры в Республике Коми (b)

Fig. 1. Seed zones (1-6) and seed orchards of lodgepole pine in Sweden and experimental plantations in the Komi Republic

Таблица 1

Характеристика объектов исследования

Characteristics of the research objects

Характеристика объектов	Лесничество			
	Сторожевское	Ухтинское	Койгородское	Сыктывкарское
№ участка	1	2	3	4
Год закладки	2004	2004	2004	2006
Площадь, га	1,8	2,0	0,9	1,1
Размещение, м	2,0×2,0	2,5×2	2×1,5	3,0×1,0
Посадочный материал	Однолетние сеянцы	Однолетние сеянцы	Однолетние сеянцы	Двухлетние сеянцы
Категория участка	С/х пользование	Карьер	Карьер	Вырубка (сосновая)
Координаты	61˚53' с.ш. 52˚45' в.д.	63˚62' с.ш. 53˚79' в.д.	60˚20' с.ш. 51˚30' в.д.	61˚40' с.ш. 51˚03' в.д.
Почва	Постагрогенная серогумусовая	Флювиогляциальные пески и супеси	Флювиогляциальные пески и супеси	Иллювиально-железистый подзол
Исходный тип насаждения	Сосняк лишайниковый	Сосняк лишайниковый	Сосняк брусничный	Сосняк брусничнолишайниковый

Запасы надземной фитомассы в исследуемых экспериментальных культурах определяли методом «модельных деревьев» с последующим применением аллометрических уравнений для оценки отдельных фракций деревьев и фитомассы древостоя в целом [Бабич, Мерзленко, 1998; Усольцев, Залесов, 2005; Усольцев, 2007]. Отбор моделей пропорционально представительству, по одному среднему из каждой ступени толщины, является наиболее точным среди прочих [Бабич, Мерзленко, 1998]. С целью построения аллометрических уравнений использованы данные по 10 модельным деревьям сосны скрученной и сосны обыкновенной диаметром от 4 до 10 см, которые были представлены ранее для 15-летних культур сосны скрученной [Пристова и др., 2023]. Для использования в 20-летних культурах сосны скрученной в настоящей работе материалы по модельным деревьям были скорректированы с использованием дополнительных данных. Коэффициенты регрессии находили при помощи линейной модели от логарифмированных значений. Следует отметить, что в аллометрических уравнениях наряду с диаметром ствола часто используется высота дерева [Бабич, Мерзленко, 1998; Усольцев, 1988]. По нашим данным, между этими показателями существует четко выраженная прямая зависимость. Коэффициент корреляции (r) для сосны обыкновенной составил 0,89 ($p = 0,042$), для сосны скрученной – 0,88 ($p = 0,047$). Таким образом, одновременное использование в моделях обоих параметров является избыточным, поэтому учитывался только один из них – диаметр ствола. С помощью полученных аллометрических уравнений (табл. 2) рассчитана масса каждого дерева и компонента фитомассы, а затем определены их средние значения и стандартное отклонение для каждой исследуемой породы, отдельно для каждого лесничества. Оценку статистической значимости различий в надземной фитомассе между сосной скрученной и сосной обыкновенной проводили на основе t-критерия Стьюдента. Все расчеты проводили в статистической среде R (версия 4.4.1) [R…, 2024].

Данные по фитомассе представлены на одно дерево в килограммах, а также, для сравнимости, в тоннах на гектар абсолютно сухого вещества (т/га а.с.в.). Для проведения расчета фитомассы на всю площадь культур и корректной сравнительной оценки общей надземной фитомассы исследуемых пород на гектар, густоту насаждения принимали равной 2 тыс. шт./га. Густота насаждений в 20-летнем возрасте была принята условно одинаковой для всех участков и пород. При этом на основании данных предыдущего исследования, средняя сохранность культур по всем участкам при средней густоте посадки около 2,5 тыс. шт./га составила 80% для сосны обыкновенной и 88% для сосны скрученной [Федорков, Гутий, 2017].

Таблица 2

Коэффициенты аллометрического уравнения вида $y=ad^b$ и описание модели зависимости общей надземной фитомассы деревьев и ее компонентов от диаметра ствола для сосны обыкновенной и сосны скрученной

Coefficients of the allometric equation $y=ad^b$ and model description of dependence of total aboveground phytomass of trees and its components on trunk diameter for Scots pine and lodgepole pine

Порода	Коэффициенты аллометрического уравнения				Описание модели		
	Коэффициент	Значение	t –критерий	p -уровень	F-критерий	R^2	p - уровень
Общая надземная фитомасса							
Сосна обыкновенная	a	0,097	3,660	0,035	36,536	0,924	0,009
	b	2,149	6,044	0,009			
Сосна скрученная	a	0,131	5,312	0,013	124,098	0,976	0,002
	b	2,234	11,14	0,002			
Хвоя							
Сосна обыкновенная	a	0,025	8,900	0,003	72,358	0,96	0,003
	b	1,947	8,506	0,003			
Сосна скрученная	a	0,141	1,440	0,245	3,635	0,548	0,153
	b	1,425	1,907	0,153			
Живые ветви							
Сосна обыкновенная	a	0,031	2,458	0,091	6,15	0,672	0,089
	b	1,991	2,480	0,089			
Сосна скрученная	a	0,026	10,902	0,002	181,133	0,984	0,001
	b	2,354	13,459	0,001			
Стволовая древесина							
Сосна обыкновенная	a	0,039	5,043	0,015	40,393	0,931	0,008
	b	2,279	6,356	0,008			
Сосна скрученная	a	0,040	7,339	0,005	114,162	0,974	0,002
	b	2,460	10,685	0,002			
Кора							
Сосна обыкновенная	a	0,004	6,205	0,008	25,425	0,894	0,015
	b	2,500	5,042	0,015			
Сосна скрученная	a	0,010	8,902	0,003	59,41	0,952	0,005
	b	2,098	7,708	0,005			
Сухие ветви							
Сосна обыкновенная	a	0,001	1,366	0,265	0,975	0,245	0,396
	b	2,699	0,987	0,396			
Сосна скрученная	a	0,001	1,002	0,390	0,228	1,878	0,477
	b	1,878	0,477	0,666			

Примечание. d – диаметр ствола дерева на высоте 1.3 м

Результаты и обсуждение. В соответствии с проведенными таксационными измерениями средний диаметр сосны скрученной происхождения ЛСП Нарлинге, в зависимости от исследуемого участка, варьирует от 10,0 до 12,5 см, средняя высота – от 6,9 до 8,4 м; сосны обыкновенной – от 9,4 до 11,9 см и от 5,9 до 8,1 м, соответственно (табл. 3).

Таблица 3

Средние таксационные показатели сосны обыкновенной и сосны скрученной в 20-летних экспериментальных культурах

Average taxation indicators of Scots pine and lodgepole pine in experimental plantations

Лесничество	Сосна скрученная		Сосна обыкновенная	
	диаметр, см	высота, м	диаметр, см	высота, м
Сторожевское	11,9 ± 0,3	7,1 ± 0,1	10,0 ± 0,4	6,4 ± 0,2
Ухтинское	12,5 ± 0,4	7,8 ± 0,2	11,9 ± 0,3	7,2 ± 0,1
Койгородское	10,0 ± 0,4	6,9 ± 0,2	9,4 ± 1,0	5,9 ± 0,5
Сыктывкарское	11,7 ± 0,3	8,4 ± 0,1	11,4 ± 0,3	8,1 ± 0,1

Согласно расчетам, вес одного среднего дерева в исследуемых экспериментальных культурах в абсолютно сухом состоянии варьирует для сосны обыкновенной – от 14 до 22 кг/дерево, сосны скрученной – от 23 до 38 кг/дерево (табл. 4). По литературным данным различия в массе среднего дерева сосны скрученной и сосны обыкновенной небольшие. При более низких, чем в нашем эксперименте, значениях диаметра (7 см) в искусственных насаждениях Швеции вес одного дерева сосны скрученной составляет 10,4 кг, при более высоких значениях диаметра (15 см) – 72 кг/дерево [Elfving et al., 2016]; в естественных насаждениях Канады (провинция Юкон) при значениях диаметра 7 и 15 см – 11,5 и 75,6 кг/дерево соответственно [Manning et al., 1984]. Масса среднего дерева у сосны обыкновенной немного меньше: в Швеции при диаметре 7 см она составляет 10,2, при 15 см – 69,4 кг на одно дерево [Marklund, 1988]; похожие данные получены в Финляндии – 10,2 и 69,4 кг/дерево, соответственно [Repola, 2009]. Для 20-летних культур сосны обыкновенной в условиях среднетаежного Урала масса модельного дерева с диаметром 8,9 и 9,8 см составляет 13,6 и 19,47 кг соответственно [Усольцев, 2023], что довольно близко к полученным данным для среднего дерева (табл. 4). Согласно нашим данным, разница в массе среднего дерева между двумя породами, произрастающими в пределах одного участка, составляет от 41 до 57%.

Таблица 4

Фитомасса надземной части среднего дерева сосны скрученной и сосны обыкновенной в экспериментальных культурах

Phytomass of the aboveground part of lodgepole and Scots pine trees in experimental plantations

Компонент фитомассы	Сосна скрученная		Сосна обыкновенная		t	p
	Масса 1 дерева	%	Масса 1 дерева	%		
Сторожевское лесничество						
Стволовая древесина	18,5 ± 7,1	53,6	7,7 ± 3,3	51,7	**7,8**	**<0,001**
Кора	1,9 ± 0,6	5,5	1,3 ± 0,6	8,7	**3,0**	**0,004**
Живые ветви	9,2 ± 3,4	26,7	3,1 ± 1,2	20,8	**9,9**	**<0,001**
Сухие ветви	0,1 ± 0,1	0,3	0,5 ± 0,3	3,4	**6,9**	**<0,001**
Хвоя	4,8 ± 1,1	13,9	2,3 ± 0,8	15,4	**9,9**	**<0,001**
Всего	34,5 ± 12,1	100,0	14,9 ± 5,8	100,0	**8,6**	**<0,001**
Ухтинское лесничество						
Стволовая древесина	20,6 ± 7,5	54,1	11,5 ± 4,4	52,0	**5,8**	**<0,001**
Кора	2,0 ± 0,6	5,2	2,1 ± 0,9	9,5	0,2	0,870
Живые ветви	10,2 ± 3,5	26,8	4,4 ± 1,5	19,9	**8,1**	**<0,001**
Сухие ветви	0,1 ± 0,1	0,3	0,9 ± 0,4	4,1	**12,9**	**<0,001**
Хвоя	5,2 ± 1,1	13,6	3,2 ± 1,0	14,5	**7,5**	**<0,001**
Всего	38,1 ± 12,5	100,0	22,1 ± 7,4	100,0	**6,5**	**<0,001**
Койгородское лесничество						
Стволовая древесина	12,1 ± 4,9	51,7	7,0 ± 3,9	51,5	**2,8**	**0,016**
Кора	1,3 ± 0,4	5,6	1,2 ± 0,7	8,8	0,3	0,783
Живые ветви	6,1 ± 2,4	26,1	2,8 ± 1,4	20,6	**4,4**	**<0,001**
Сухие ветви	0,1 ± 0,1	0,4	0,5 ± 0,3	3,7	**3,4**	**0,014**
Хвоя	3,8 ± 0,9	16,2	2,1 ± 1,0	15,4	**3,9**	**0,003**
Всего	23,4 ± 8,6	100,0	13,6 ± 6,9	100,0	**3,2**	**0,007**
Сыктывкарское лесничество						
Стволовая древесина	17,7 ± 7,2	53,5	10,1 ± 2,7	51,8	**5,9**	**<0,001**
Кора	1,8 ± 0,6	5,4	1,8 ± 0,5	9,2	0,1	0,983
Живые ветви	8,8 ± 3,4	26,6	4,0 ± 0,9	20,5	**8,5**	**<0,001**
Сухие ветви	0,1 ± 0,1	0,3	0,7 ± 0,2	3,6	**12,8**	**<0,001**
Хвоя	4,7 ± 1,1	14,2	2,9 ± 0,6	14,9	**8,4**	**<0,001**
Всего	33,1 ± 12,0	100,0	19,5 ± 4,5	100,0	**6,8**	**<0,001**

Примечание. Жирным шрифтом выделены значимые различия (на уровне значимости $p < 0,05$)

Структура надземной массы среднего дерева исследуемых пород довольно схожа, на ствол (включая стволовую древесину и кору) приходится 59–62%, живые ветви – 20–27, хвою – 14–16% от общих запасов органического вещества в надземной части деревьев (табл. 4). Довольно близкие данные приводятся для сосны обыкновенной в 20-летних культурах Архангельской области: масса ствола составляет 67%, ветвей – 10%, хвои – 23% от общего запаса надземной части древостоя [Бабич и др., 2010]. Сравнение доли участия компонентов фитомассы между двумя видами показало, что разница в пределах одного участка между ними небольшая и не превышает 2% (табл. 4).

Значимые различия в структуре компонентов надземной фитомассы между сосной скрученной и сосной обыкновенной наблюдаются для всех частей дерева, за исключением коры. Сосна скрученная превышает по массе живых ветвей сосну обыкновенную в 2,2–3,0, стволов – в 1,7–2,4, хвои – в 1,6–2,1 раза (табл. 4). Наибольшая масса стволовой древесины (20,6 кг/дерево), живых ветвей (10,2 кг/дерево) и хвои (5,2 кг/га) для сосны скрученной отмечена для Ухтинского лесничества. При этом более высокие, по сравнению с сосной обыкновенной, показатели характерны для Сторожевского лесничества. Различие в массе хвои между древесными породами обусловлено рядом особенностей ассимиляционного аппарата сосны скрученной: длина хвоинки у нее на 20%, а масса до 50% больше, чем у сосны обыкновенной, кроме того, продолжительность жизни ее хвои в среднем на 1 год дольше [Феклистов и др., 2008].

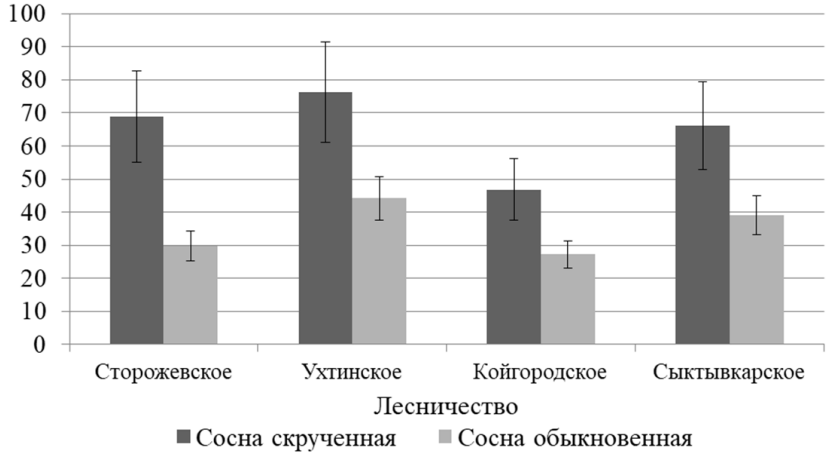


Рис. 2. Фитомасса сосны скрученной и сосны обыкновенной в экспериментальных культурах, т/га

Fig. 2. Phytomass of lodgepole pine and Scots pine in experimental crops, t/ha

Запасы надземной фитомассы исследуемых культур к 20-летнему биологическому возрасту составляют 46–76 т/га для сосны скрученной и 27–44 т/га для сосны обыкновенной (рис. 2). По данным других исследователей, в условиях Архангельской области для 22-летних посевов сосны обыкновенной приводятся близкие показатели – 28 т/га [Бабич и др., 2010].

Заключение. Таким образом, проведенные исследования показали, что к 20-летнему возрасту надземная фитомасса сосны скрученной, независимо от условий произрастания и категории лесокультурной площади, выше, чем у сосны обыкновенной местного происхождения. Наиболее высокие различия по массе стволовой древесины сосны скрученной, по сравнению с сосной обыкновенной, получены для экспериментальных культур, заложенных на сельскохозяйственных землях. Превышение сосны скрученной над сосной обыкновенной по массе стволовой древесины позволяет рекомендовать выращивание этой древесной породы в условиях средней тайги Республики Коми.

Сведения о финансировании исследования. Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии Коми НЦ УрО РАН, тема «Средообразующая роль и продуктивность лесных и болотных экосистем европейского северо-востока России» (№ 125020501547-8).

Благодарности. Авторы выражают благодарность за помощь в проведении полевых работ к.б.н., научному сотруднику Института биологии Коми НЦ УрО РАН Плюсниной С.Н.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Бабич Н.А., Мерзленко Н.А. Биологическая продуктивность лесных культур. Архангельск: Изд-во АГТУ, 1998. 89 с.

Бабич Н.А., Клевцов Д.Н., Евдокимов И.В. Зональные закономерности изменения фитомассы культур сосны. Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет, 2010. 140 с.

Пристова Т.А., Федорков А.Л., Новаковский А.Б. Надземная фитомасса древостоя в экспериментальных культурах сосны скрученной в Сыктывкарском лесничестве Республики Коми // ИВУЗ. Лесной журнал. 2023. № 6. С. 31–43.

Раевский Б.В. Селекция и семеноводство сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и сосны скрученной (*Pinus contorta* Dougl. Ex Loud. *var. Latifolia* Engelm) на Северо-Западе таежной зоны России: дис. … д-ра с-х. наук. СПб.: СПбГЛТА им. С.М. Кирова, 2015. 322 с.

Усольцев В.А. Рост и структура фитомассы древостоев. Новосибирск: Наука, 1988. 253 с.

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

Усольцев В.А. Фитомасса модельных деревьев для дистанционной и наземной таксации лесов Евразии: электронная база данных. Екатеринбург: Бот. сад УрО РАН, 2023. URL: https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12451 (дата обращения: 17.09.2024)

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

Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Гульбе Т.А., Гульбе Я.И. Аллометрические уравнения для фитомассы по данным деревьев сосны, ели, березы и осины в европейской части России // Лесоведение. 1996. №6. С. 36–46.

Федорков А.Л., Гутий Л.Н. Состояние экспериментальных культур сосны скрученной в Республике Коми // Вестник ИБ Коми НЦ УрО РАН. 2017. № 2. С. 25–31.

Феклистов П.А., Бирюков С.Ю., Федяев А.Л. Сравнительные эколого-биологические особенности сосны скрученной и обыкновенной в северной подзоне европейской тайги. Архангельск: АГТУ, 2008. 118 с.

Demidova N.A., Durkina N.M., Gogoleva L.G., Paramonov A.A. Lodgepole pine of Yukon origin in the European North of Russia // IOP Conf. Series: Earth and Environmental science. 2020. No. 574. Art. no. 012022. DOI: 10.1088/1755-1315/574/1/012022.

Elfving B., Ulvcrona K.A., Egnell G. Biomass equations for lodgepole pine in northern Sweden // Can. J. For. Res. 2016. Vol. 47. P. 89–96. DOI: 10.1139/cjfr-2016-0131.

Fedorkov A., Gutiy L. Performance of lodgepole pine and Scots pine in field trials located in north-west Russia // Silva Fennica. 2017. Vol. 51, no. 1. Art. no. 1692. DOI: 10.14214/af. 1692.

Manner J., Lundström H. The effect of forked trees on harvester time consumption in a *Pinus contorta* final-felling stand // Silva Fennica. 2024. Vol. 58, no. 4. Art. no. 24039. DOI: 10.14214/sf.24039.

Manning G.N., Massie M.R.C., Rudd J. Metric single-tree weight tables for the Yukon Territory. Canadian Forestry Service, Pacific Forest Research Centre, Victoria, B.C., Inf. Rep. BC-X-250, 1984. 170 p.

Marklund L.-G. Biomass functions for Scots pine, Norway spruce and birch in Sweden. Swedish University of Agricultural Sciences, Inst. för skogstaxering, 1988. 71 p.

Mola-Yudego B., Arevalo J., Díaz-Yanez O., Dimitriou I. Haapala A., Carlos Ferras Filho A., Selkimaki M., Valbuena R. Wood biomass potentials for energy in northern Europe: Forest or plantations? // Biomass and Bioenergy. 2017. No. 106. P. 95–103. DOI: 10.1016/j.biombioe.2017.08.021.

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: http://www.R-project.org (дата обращения: 14.08.2024)

Repola J. Biomass Equations for Scots pine and Norway spruce in Finland // Silva Fennica. 2009. Vol. 42, no. 4. P. 605–624. DOI: 10.14214/sf.184.

Repola J., Ulvcrona K.A. Modelling biomass of young and dense Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) dominated mixed forests in northern Sweden // Silva Fennica. 2014. Vol. 48, no. 5. Art. no. 1190. DOI: 10.14214/sf.1190.

Schepaschenko D., Moltchanova E., Shvidenko A., Blyshchyk V., Dmitriev E., Martynenko O., See L., Kraxner F. Improved estimates of biomass expansion factors for Russian forests // Forests. 2018. Vol. 9, iss. 6. Art. no. 312. DOI: 10.3390/f9060312.

Tumenbayeva A.R., Sarsekova D.N., Małek S. Carbon sequestration of aboveground biomass of *Pinus sylvestris* L. in the green belt of the city of Astana // Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry. 2018. Vol. 60 (3). P. 137–142. DOI: 10.2478/ffp-2018-0013.

Zamolodchikov D.G., Utkin A.I., Chestnych O.V. Biomass conversion and expansion factors for major forest forming species in Russia // Forest Mensurat. For. Invent. 2003. No. 1. P. 119–127.

References

Babich N.A., Klevtsov D.N., Evdokimov I.V. Zonal patterns of changes in the phytomass of pine plantations. Arkhangelsk: Northern (Arctic) Federal University, 2010. 140 p. (In Russ.)

Babich N.A., Merzlenko N.A. Biological productivity of forest plantations. Arkhangelsk: Publishing house of AGTU, 1998. 89 p. (In Russ.)

Elfving B., Ulvcrona K.A., Egnell G. Biomass equations for lodgepole pine in northern Sweden. *Can. J. For. Res.,* 2016, vol. 47, pp. 89–96. DOI: 10.1139/cjfr-2016-0131.

Fedorkov A.L., Gutiy L.N. The state of experimental cultures of lodgepole pine in the Komi Republic. *Bulletin of the Komi Scientific Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2017, no. 2, pp. 25-31. (In Russ.)

Fedorkov A. Gutiy L. Performance of lodgepole pine and Scots pine in field trials located in north-west Russia. *Silva Fennica*, 2017, vol. 51, no. 1, art. no. 1692. DOI: 10.14214/af. 1692.

Feklistov P.A., Biryukov S.Yu., Fedyaev A.L. Comparative ecological and biological features of lodgepole and common pine in the northern subzone of the European taiga. Arkhangelsk: Arkhangelsk State Technical University, 2008. 118 p. (In Russ.)

Manner J., Lundström H. The effect of forked trees on harvester time consumption in a *Pinus contorta* final-felling stand. *Silva Fennica*, 2024, vol. 58, no. 4, art. no. 24039. DOI: 10.14214/sf.24039.

Manning G.N., Massie M.R.C., Rudd J. Metric single-tree weight tables for the Yukon Territory. Canadian Forestry Service, Pacific Forest Research Centre, Victoria, B.C., Inf. Rep. BC-X-250, 1984. 170 p.

Marklund L.-G. Biomass functions for Scots pine, Norway spruce and birch in Sweden. Swedish University of Agricultural Sciences, Inst. för skogstaxering, 1988. 71 p.

Mola-Yudego B., Arevalo J., Díaz-Yanez O., Dimitriou I. Haapala A., Carlos Ferras Filho A., Selkimaki M., Valbuena R. Wood biomass potentials for energy in northern Europe: Forest or plantations? *Biomass and Bioenergy*, 2017, no. 106, pp. 95–103. DOI: 10.1016/j.biombioe.2017.08.021.

Pristova T.A., Fedorkov A.L., Novakovsky A.B. Aboveground phytomass of a stand in experimental plantations of lodgepole pine in Syktyvkar forestry of the Komi Republic. *Forest Journal,* 2023, no. 6, pp. 31-43. (In Russ.)

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: http://www.R-project.org (accessed: 14.08.2024)

Rayevsky B.V. Breeding and seed production of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and lodgepole pine (*Pinus contorta* Dougl. ex Loud. var. latifolia Engelm) in the North-West of the taiga zone of Russia. Diss. ... Doc. Agr. Sci. St. Petersburg: St. Petersburg State Forest Technical University, 2015. 322 p. (In Russ.)

Repola J. Biomass Equations for Scots pine and Norway spruce in Finland. *Silva Fennica,* 2009, vol. 42, no. 4, pp. 605–624. DOI: 10.14214/sf.184.

Repola J., Ulvcrona K.A. Modelling biomass of young and dense Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) dominated mixed forests in northern Sweden. *Silva Fennica*, 2014, vol. 48, no. 5, art. no. 1190. DOI: 10.14214/sf.1190.

Schepaschenko D., Moltchanova E., Shvidenko A., Blyshchyk V., Dmitriev E., Martynenko O., See L., Kraxner F. Improved estimates of biomass expansion factors for Russian forests. *Forests*, 2018, vol. 9, iss. 6, art. no. 312. DOI: 10.3390/f.9060312.

Tumenbayeva A.R., Sarsekova D.N., Małek S. Carbon sequestration of above-ground biomass of *Pinus sylvestris* L. in the green belt of the city of Astana. *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*, 2018, vol. 60 (3), pp. 137–142. DOI: 10.2478/ffp-2018-0013.

Usoltsev V.A. Growth and structure of phytomass of forest stands. Novosibirsk: Nauka, 1988. 253 p. (In Russ.)

Usoltsev V.A. Biological productivity of forests of Northern Eurasia. Methods, database and its applications. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2007. 636 p. (In Russ.)

Usoltsev V.A. Phytomass of model trees for remote and ground-based forest taxation in Eurasia: electronic database. Ekaterinburg: Bot. garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 2023. URL: https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12451 (accessed: 17.09.2024) (In Russ.)

Usoltsev V.A., Zalesov S.V. Methods for determining biological productivity of plantings. Yekaterinburg: Ural State Forestry Engineering university, 2005. 147 p. (In Russ.)

Utkin A.I., Zamolodchikov D.G., Gulbe T.A., Gulbe Ya.I. Allometric equations for phytomass based on data from pine, spruce, birch and aspen trees in the European part of Russia. *Forest science,* 1996, no. 6, pp. 36-46. (In Russ.)

Zamolodchikov D.G., Utkin A.I., Chestnych O.V. Biomass conversion and expansion factors for major forest forming species in Russia. *Forest Mensurat. for. Invent*, 2003, no. 1, pp. 119–127.

Материал поступил в редакцию 21.10.2024

Пристова Т.А., Федорков А.Л., Новаковский А.Б. Запасы надземной фитомассы сосны скрученной и сосны обыкновенной в экспериментальных культурах Республики Коми // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 290–304. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.290-304

В статье даётся сравнение фитомассы двух древесных пород: сосны скрученной (*Pinus contorta* Dougl.), родиной которой является Северная Америка, и местной сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в экспериментальных культурах Сыктывкарского, Койгородского, Корткеросского и Ухтинского лесничеств Республики Коми, созданных в 2004–2006 гг. на 4 участках различных лесокультурных категорий. Исследования проводились с 2021 по 2023 гг. Расчеты запасов фитомассы проведены с использованием рассчитанных на основе модельных деревьев аллометрических уравнений. Вес одного среднего дерева в абсолютно сухом состоянии варьирует для сосны обыкновенной от 14 до 22 кг, для сосны скрученной – от 23 до 38 кг на одно дерево. К 20-летнему биологическому возрасту в надземной фитомассе культуры сосны скрученной накапливают от 46 до 76 т/га, сосны обыкновенной – от 27 до 44 т/га органического вещества. Показано, что по массе стволов в экспериментальных культурах, заложенных на сосновой вырубке и сельскохозяйственных землях, сосна скрученная максимально превышает сосну обыкновенную по сравнению с другими участками (рекультивированные карьеры). В целом результаты исследования показали, что превышение надземной фитомассы культур сосны скрученной по сравнению с сосной обыкновенной составляет от 25 до 45% на различных участках экспериментальных культур. Структура надземной фитомассы у исследуемых пород имеет схожий характер. Полученные результаты могут использоваться для пополнения базы данных по продуктивности лесных культур и для оценки депонирования углерода искусственными насаждениями в средней тайге.

Ключевые слова: искусственные насаждения, сосна скрученная (*Pinus contorta* Dougl.), аллометрические уравнения, фитомасса.

Pristova T.A., Fedorkov A.L., Novakovsky A.B. Aboveground Phytomass of Lodgepole Pine and Scots pine in Experimental Plantations of the Komi Republic. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 290–304 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.290-304

The article is devoted to comparison the phytomass of two tree species: lodgepole pine (*Pinus contorta* Dougl.), native to North America, and local Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in experimental plantations of the Syktyvkar, Koygorodsky, Kortkerossky and Ukhta areas of the Komi Republic, established in 2004–2006 on 4 sites of different forest categories. The studies were conducted from 2021 to 2023. Calculations of phytomass reserves were carried out using model trees for allometric equations. The weight of one tree in an absolutely dry state varies for Scots pine from 14 to 22 kg, for lodgepole pine – from 23 to 38 kg per tree. By the age of 20 years, the aboveground phytomass of lodgepole pine trees accumulates from 46 to 76 t/ha, and that of Scots pine from 30 to 44 t/ha of organic matter. It is shown that by trunk mass in experimental plantations planted on pine clearings and agricultural lands, lodgepole pine maximally exceeds Scots pine compared to other areas (reclaimed quarries). In general, the results of the study showed that the excess of aboveground phytomass of lodgepole pine plantations, compared to Scots pine, is from 25 to 45% in different areas. The structure of aboveground phytomass of the species studied has a similar pattern. The results obtained can be used to replenish the database on the productivity of forest crops and to assess carbon deposition by forest plantations in the middle taiga.

K e y w o r d s : allometric equations, forest plantation, lodgepole pine (*Pinus contorta* Dougl.), phytomass.

ПРИСТОВА Татьяна Александровна – научный сотрудник Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской Академии наук, кандидат биологических наук. SPIN-код: P-9788-2015. ORCID: 0000-0002-8266-8113.

167982, ул. Коммунистическая, д. 28, г. Сыктывкар, Россия. E-mail: pristova@ib.komisc.ru.

PRISTOVA Tatiana A. – PhD (Biological), Research Scientist, Institute of Biology of Komi Scientific Centre, Ural Branch of the RAS. SPIN-code: P-9788-2015. ORCID: 0000-0002-8266-8113.

167982. Kommunisticheskaya str. 28. Syktyvkar. Russia. E-mail: pristova@ib.komisc.ru

ФЕДОРКОВ Алексей Леонардович – ведущий научный сотрудник Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской Академии наук, доктор биологических наук. SPIN-код: C-8811-2009. ORCID: 0000-0001-7800-7534.

167982, ул. Коммунистическая, д. 28, г. Сыктывкар, Россия. E-mail: fedorkov@ib.komisc.ru

FEDORKOV Aleksey L. – DSc (Biological), Leading Research Scientist, Institute of Biology of Komi Scientific Centre, Ural Branch of the RAS. SPIN-code: C-8811-2009. ORCID: 0000-0001-7800-7534.

167982. Kommunisticheskaya str. 28. Syktyvkar. Russia. E-mail: fedorkov@ib.komisc.ru

НОВАКОВСКИЙ Александр Борисович – научный сотрудник Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской Академии наук, кандидат биологических наук. SPIN-код: P-9739-2015. ORCID: 0000-0003-4105-7436.

167982, ул. Коммунистическая, д. 28, г. Сыктывкар, Россия. E-mail: novakovsky@ib.komisc.ru

NOVAKOVSKY Alexander B. – PhD (Biological), Research Scientist, Institute of Biology of Komi Scientific Centre, Ural Branch of the RAS. SPIN-code: P-9739-2015. ORCID: 0000-0003-4105-7436.

167982. Kommunisticheskaya str. 28. Syktyvkar. Russia. E-mail: novakovsky@ib.komisc.ru

УДК 630*181.351

П.А. Феклистов, Ж.А. Бруева, И.Н. Болотов, С.С. Макаров, А.И. Чудецкий

ИЗМЕНЕНИЕ СОСНОВЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ В ПРОЦЕССЕ ПЕРВИЧНОЙ СУКЦЕССИИ

Введение. Под сукцессиями понимают последовательную смену одной экосистемы другой, а последовательный ряд закономерно сменяющих друг друга сообществ называется сукцессионной серией. Проследить и изучить всю сукцессионную серию от вселения организмов на незанятую территорию до климаксового сообщества не представляется возможным из-за длительности этого процесса. Но вопросы сукцессионных изменений очень важны и освещаются в литературе [Wardle, Zackrisson, 2005; Song et al., 2007; Liu et al., 2008; Hansen et al., 2013]. В то же время отдельные этапы этого процесса можно вычленить и изучить. Общие представления о сукцессионных изменениях имеются, однако конкретных данных о сукцессионных сериях очень мало, особенно по первичным сукцессиям, которые начинаются на лишённом жизни участке территории, так как предполагают, что таких почти нет. Также немногочисленны данные о сукцессионых сериях в лесных экосистемах, где роль эдификаторов принадлежит деревьям, которые имеют большую продолжительность жизни [Framstad et al., 2013; Boiffin et al., 2015].

Вторичные сукцессии после рубки леса более или менее изучены, что связано с необходимостью восстановления лесов [Беляев, 2011; Широких и др., 2013; Мартыненко и др., 2014; Зарубина, Коновалов, 2015; Широких и др., 2019]. Также много работ посвящено вторичным сукцессиям на землях, вышедших из сельскохозяйственного пользования [Назаренко, Батюшева, 2021; Телеснина, 2021; Широких и др., 2023]. Первичные сукцессии на отвалах породы, появившихся в результате добычи полезных ископаемых, также нашли отражение в литературе [Осипов, 2006; Хомушку, Самбуу, 2015]. Имеет значение исторический фактор в сукцессионной динамике [Рысин, 2006]. Отдельные этапы в сукцессионной серии ценны, так как позволяют выявить наиболее важные закономерности в их изменении и развитии. Как видим, первичные сукцессии в лесных экосистемах изучены недостаточно.

В связи с этим была поставлена цель изучить протекание этого процесса на песчаном острове в Белом море, где было очевидно, что это первичная сукцессия.

Материалы и методика исследования. На острове Ягры, который располагается в Двинском заливе Белого моря (в Яндовой губе) близ г. Северодвинска Архангельской области, происходят заметные и интересные в научном плане сукцессионные изменения в составе растительности. Фактически здесь можно наблюдать первичную сукцессию по вселению на некогда песчаный остров серии сообществ. Сначала это были сообщества из травянистой растительности, а затем появились сосновые фитоценозы. Вселение сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и других видов древесной растительности, по-видимому, происходило с юга и юго-востока острова Ягры за счет налета семян с островов, отделенных от него небольшими протоками. На северной или северо-восточной части острова лесные массивы прерываются бывшим сенокосом и тростниковыми зарослями, а в крайней точке (у маяка) образовался лесной массив из соснового древостоя (рис. 1).

(a) (b)

Рис. 1. Сосновый древостой, сформировавшийся на месте лугового фитоценоза: (a) – островок соснового леса на северо-восточной оконечности острова Ягры; (b) – внутри древостоя

Fig. 1. A pine stand formed on the site of a meadow phytocenosis: (a) – an island of pine forest at the northeastern tip of Yagry Island; (b) – inside the stand

Этот сосняк отделен от основного массива лесов острова довольно большим промежутком (800–900 м) с луговой растительностью и тростниковыми зарослями (рис. 2). Здесь, а также в ближайшем сосняке в сплошном лесном массиве были заложены пробные площади с подробным лесотаксационным (табл. 1) и геоботаническим описанием. При этом руководствовались общепринятыми рекомендациями [Анучин, 1982; Лесная…, 2023]. Кроме того, были взяты керны возрастным буравом для изучения возрастной структуры и прироста деревьев сосны (50 деревьев).

Рис. 2. Фрагмент о. Ягры с древостоями сосны на разных стадиях сукцессии (на севере – 1 стадия, на юге – 2 стадия, пробные площади выделены белыми прямоугольниками) (Яндекс.Карты)

Fig. 2. Fragment of Jagry Island with stands of pine at different stages of succession (in the north – stage 1, in the south – stage 2) (Yandex.Maps)

Измерение прироста проводили с помощью микроскопа МБС-9 с точностью ±0,05 мм. Для оценки синхронности прироста использовалась ранее предложенная формула [Феклистов, 1978; Феклистов, и др. 2020]:

$$K = \frac{\sum_1^n |A + B|^+}{\sum_1^n |A| + |B|}, \quad (1)$$

где A – разница в величине прироста между соседними годами в одном ряду; B – разница в величине прироста между соседними годами в другом

ряду; $|A+B|^{+}$ – абсолютная величина «вес» однонаправленных интервалов, обе разности с одним значком;

$|A|+|B|$ – сумма абсолютных величин, общий «вес» всех интервалов, сумма абсолютных величин всех разниц.

Коэффициент синхронности учитывает, как тенденцию изменения прироста от года к году, так и абсолютную величину отклонений. Это способствует приданию «веса» наиболее крупным и заметным изменениям прироста. Данный коэффициент изменяется от 0% до 100%. Если коэффициент менее 50%, дендрошкалы асинхронны, если более 50% – наблюдается синхронность дендрошкал.

При изучении живого напочвенного покрова использовались индексы Жаккара (I_J, (2)) и Серенсена-Чекановского (I_S, (3)). Эти коэффициенты равны 1 в случае полного совпадения видов сообществ и равны 0, если выборки различны и не включают общих видов:

$$I_J = \frac{c}{(a+b-c)} * 100, \quad (2)$$

$$I_S = \frac{2c}{(a+b)} * 100, \quad (3)$$

где a – число видов в первом описании, b – число видов во втором описании, c – число видов, общих для двух сравниваемых сообществ.

Базисную плотность определяли исходя из рекомендаций Г.А. Чибисова и др. [2005].

Таблица 1

Таксационная характеристика древостоев

Taxation characteristics of stands of trees

№ ПП	Тип леса	Состав	Порода	Средние		Полнота		Возраст, лет	Бонитет	Запас, $м^3$/га
				диаметр, см	высота, м	абсолютная, $м^2$/га	относительная			
6	Сосняк брусничный	10С	С	19,4±0,7	14,2±0,2	25,7	0,89	53	4	185
7	Сосняк черничнo-злаковый	10С	С	18,6±0,9	13,5±0,4	30,2	1,05	44	4	206

Результаты исследования и их обсуждение. Изученные сосняки представляют из себя часть сукцессионной серии. Хотя это не начальная ста-

дия, но это важная часть сукцессионной серии вселения сосны на белесую часть песчаного острова. Изначально появилась травянистая растительность, и лишь потом – деревья сосны. Продолжительность существования травянистой растительности неизвестна, а вот время заселения сосной можно проследить по годичным кольцам деревьев (возрасту деревьев). Средний возраст сосняков различается примерно на 10 лет. Для удобства изложения сосняк более молодой условно будем относить к первой стадии сукцессии, а постарше – ко второй стадии.

В типологическом отношении оба сосняка с трудом вписываются в типологические построения В.Н. Сукачева, так как они, с одной стороны, содержат значительное число видов растений напочвенного покрова, характерных для луговой растительности, а с другой – и чисто лесные виды. Кроме того, они формировались на песках и в классическом понимании должны бы относиться по меньшей мере к лишайниковой группе типов леса. Но здесь нет и намека на виды растений напочвенного покрова, типичные для этой группы типов. Руководствуясь методическими рекомендациями В.Н. Сукачева и С.В. Зонна [1961], а также сравнением с другими сосняками острова Ягры, авторы дали названия сообществам по доминантам: сосняк на первой стадии – чернично-злаковый, на второй – брусничный. Сосняк в первой стадии несмотря на довольно большую густоту древостоя (1112 шт./га) и низкую освещенность под пологом этого сосняка (освещенность на высоте груди составляет в среднем 2583 лкс, а на уровне травяно-кустарничкового яруса – 1062 лкс в солнечную ясную погоду), сохранилось большое количество светолюбивых видов с высоким проективным покрытием (табл. 2). В напочвенном покрове преобладают злаки: луговик извилистый, щучка дернистая, полевица обыкновенная. Встречаются чемерица, папоротник Линнея (голокучник), но в то же время появляются и такие теневыносливые виды, как черника, майник, седмичник, а в мохово-лишайниковом ярусе – плеуроциум Шребера.

За 10 лет со многими видами произошли существенные изменения. Щучка дернистая, полевица обыкновенная, пырей ползучий, исчезли полностью; из злаков остался лишь луговик извилистый, но его проективное покрытие сократилось более чем в 2 раза (рис. 3). Исчезли чемерица, дерен шведский, голокучник. Напротив, увеличилось проективное покрытие майника, черники, седмичника и особенно сильно плеуроциума Шребера. Одним из доминантов стала брусника, ранее отсутствовавшая. Теперь можно с уверенностью говорить, что на второй стадии формируется сосняк брусничный.

Таблица 2

Изменение напочвенного покрова по стадиям сукцессии

Change in ground cover by stages of succession

Вид	Проективное покрытие по стадиям сукцессии и пробным площадям, %	
	2 стадия (ПП №6)	1 стадия (ПП №7)
Травяно-кустарничковый ярус		
Черника обыкновенная *Vaccinium myrtillus* L.	3	2,7
Брусника обыкновенная *Vaccinium vitis-idaea* L.	11,2	–
Майник двулистный *Maianthemum bifolium* (L.) F.W.Schmidt	11,2	2,5
Луговик извилистый *Avenella flexuosa* (L.) Drejer	12,2	28,5
Седмичник европейский *Trientalis europaea* L.	0,8	1,3
Осока *Carex* sp.	–	1
Дерен шведский *Chamaepericlymenum suecicum* (L.) Asch. & Graebn.	–	0,5
Щучка дернистая *Deschampsia cespitosa* (L.) P. Beauv.	–	10,6
Кипрей узколистный *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop.	0,8	-
Полевица обыкновенная *Agrostis tenuis* Sibth.	–	2,9
Папоротник Линнея (Голокучник трехраздельный) *Gymnocarpium dryopteris* (L.) Newman	–	0,2
Чемерица Лобеля *Veratrum lobelianum* Bernh.	–	0,2
Пырей ползучий *Elytrigia repens* (L.) Nevski	–	0,1
Водяника черная *Empetrum nigrum* L.	0,1	–
Мохово-лишайниковый ярус		
Плеуроциум Шребера *Pleurozium schreberi* (Willd.ex Brid.) Mitt.	11,3	1,7
Кукушкин лен обыкновенный *Polytrichum commune* Hedw.	–	0,6

Общность растительных сообществ по видовому составу растений напочвенного покрова составляет по коэффициенту Жаккара 0,4, а по коэффициенту Сьеренсена – 0,57.

Наиболее важными являются изменения древесного яруса, так как именно он является эдификатором. Если на первой стадии сукцессии возраст в среднем составляет 44±1 лет (среднее значение достоверно, критерий Стьюдента 46 при $t_{0.05}$=2,1), то на второй стадии средний возраст – 53±6 лет (среднее значение достоверно, критерий Стьюдента F_{st} = 47).

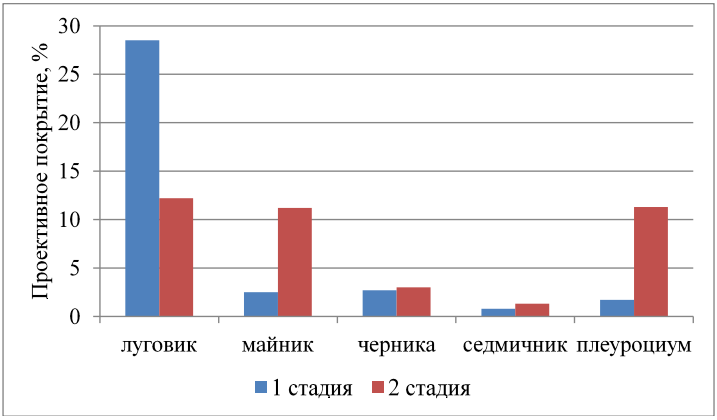


Рис. 3. Изменение проективного покрытия некоторых видов напочвенного покрова на разных стадиях сукцессии

Fig. 3. Changes in the projective coverage of some types of ground cover at different stages of succession

Изменение возрастной структуры сосняка за 10 лет происходило следующим образом. Деревья в возрасте 21 – 40 лет перешли в следующий класс возраста и пополнили возрастную категорию 41–60 лет, а из 41–60 лет – соответственно, в 61–80 лет (рис. 4).

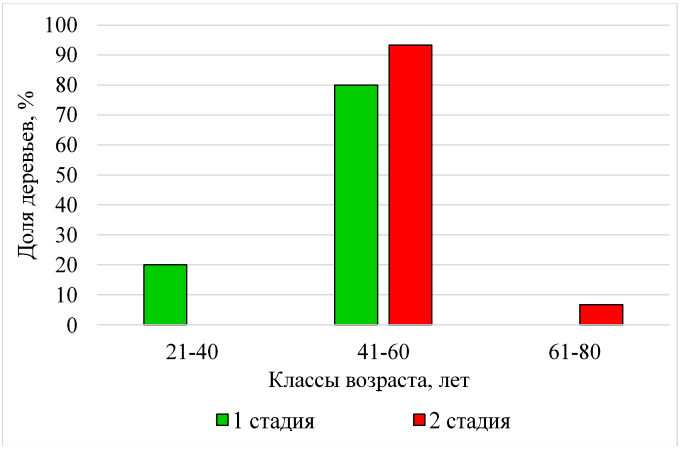


Рис. 4. Изменение возрастной структуры по стадиям сукцессии

Fig. 4. Changes in the age structure by stages of succession

Средний диаметр деревьев за 10 лет увеличился на 0,8 см, высота – на 0,7 м, а число деревьев, наоборот, уменьшилось на 72 шт./га, следуя известному правилу самоизреживания (табл. 3).

Таблица 3

Сукцессионные изменения наиболее важных параметров древостоя

Successional changes in the most important tree stand parameters

Стадия сукцессии	Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Густота, шт./га
1 стадия	18,6	13,5	942
2 стадия	19,4	14,2	869

Примечание: густота приведена к одинаковой полноте древостоев

Интересно сравнение средней многолетней динамики радиального прироста на двух стадиях сукцессии (рис. 5). Сравнение производится за период с 1992 г., так как именно с этого времени можно было использовать для получения средних значений все взятые учетные деревья. Если брать более продолжительный период, то из-за их разного возраста и, соответственно, разной продолжительности временного ряда их количество неуклонно сокращалось бы.

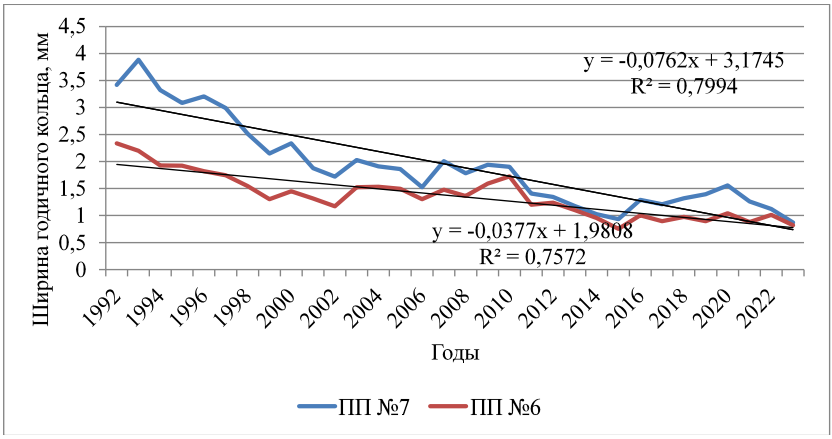


Рис. 5. Сравнительная динамика радиального прироста
Fig. 5. Comparative dynamics of radial growth

Радиальный прирост на разных стадиях сукцессии по абсолютным величинам существенно отличается (рис. 5). Например, ширина годичного

кольца в 1992 г. на первой стадии составляет 3,4 мм, а на второй – лишь 2,3 мм, то есть в 1,5 раза меньше. Однако и в том, и в другом случае наблюдается устойчивый тренд уменьшения ширины годичного слоя с годами. Радиальный прирост становится практически равным на обеих стадиях (0,8 мм) через 40–50 лет после возникновения сосняков. Можно предположить, что снижение радиального прироста продолжится и в дальнейшем, судя по линиям тренда.

Обращает на себя внимание тот факт, что динамика прироста на обеих пробных площадях исключительно синхронна: увеличение или уменьшение ширины годичного кольца в одном случае соответствует такому же изменению в другом. Расчет коэффициента синхронности показал, что он находится на уровне 87%. Следовательно, динамика прироста определяется общими факторами, а разница в абсолютных величинах определяется разными стадиями сукцессии.

Интересно проследить изменение базисной плотности древесины на разных стадиях. Разница примерно в 10 лет между моментом возникновения сосняков дает различия между стадиями в базисной плотности древесины, но тенденции в изменениях исключительно схожи (рис. 6). С годами базисная плотность увеличивается и в том, и в другом случае. На первой стадии сукцессии (ПП № 7) в целом базисная плотность ниже, чем на второй (ПП № 6), разница сохраняется с течением времени и составляет примерно 7–8 кг/м^3.

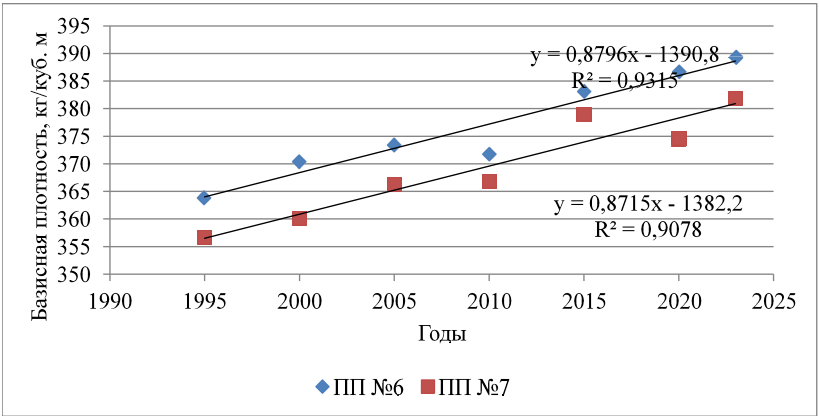


Рис. 6. Базисная плотность древесины на разных этапах сукцессии
Fig. 6. Basic density of wood at different stages of succession

На момент исследования базисная плотность на первой стадии сукцессии составляет 381 кг/м^3, а на второй – 389 кг/м^3. За весь период наблюдения базисная плотность колебалась от 356–389 кг/м^3. В целом это ниже плотности, приводимой для северных сосняков [Чибисов и др., 2005] – 373–436 кг/м^3.

Заключение. Таким образом, по результатам проведенных исследований выявлено, что в процессе сукцессии под пологом соснового древостоя на острове Ягры (Архангельская область) существенно изменился напочвенный покров. Исчезли из состава злаки (щучка дернистая, полевица обыкновенная, пырей ползучий), а также такие виды, как чемерица, дерен шведский, голокучник. Вышли в доминанты, существенно увеличив проективное покрытие, брусника в травяно-кустарничковом и плеуроциум Шребера в мохово-лишайниковом ярусах. По возрастной структуре сосняки разновозрастные, деревья относятся к двум классам возраста. Средний диаметр деревьев за 10 лет увеличился на 0,8 см, высота – на 0,7 м, а число деревьев, наоборот, уменьшилось на 72 шт./га. Наблюдается высокая степень синхронности в изменении радиального прироста по годам. Коэффициент синхронности составляет 87%. Радиальный прирост в абсолютных величинах на первой стадии больше примерно в 1,5 раза, чем на второй, но с течением времени их величины сравнялись. На первой стадии сукцессии базисная плотность ниже, чем на второй, разница сохраняется с годами. Базисная плотность на первой стадии сукцессии составляет 381 кг/м^3, а на второй – 389 кг/м^3, что ниже, чем в северной тайге, на 5–11%.

Вклад авторов. Авторы внесли эквивалентный вклад в проведение исследований и написание научной статьи.

Сведения о финансировании. Исследования выполнены в рамках государственного задания Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова УрО РАН [№ гос. регистрации – 125021902596-8].

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Анучин Н.П. Лесная таксация. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 552 с.

Беляев В.В. Восстановление лесов Европейского Севера России. Архангельск: Поморский гос. ун-т, 2011. 324 с.

Зарубина Л.В., Коновалов В.Н. Эколого-биологические особенности ели в северотаежных фитоценозах (состояние, антропогенное влияние): монография. Архангельск: САФУ, 2015. 186 с.

Лесная таксация. Часть 4. Закладка, таксация и описание пробных площадей при проведении научных исследований и подготовке выпускных квалификационных работ: учеб. пособие. Архангельск: САФУ, 2023. 119 с.

Мартыненко В.Б., Широких П.С., Миркин Б.М., Наумова Л.Г. Синтаксономический анализ восстановительных сукцессий после вырубки светлохвойных лесов Южно-Уральского региона // Журнал общей биологии. 2014. Т. 75, № 6. С. 478–490.

Назаренко Н.Н., Батюшева С.Ю. Трансформация растительности в условиях неинтенсивной сельскохозяйственной нагрузки (на примере окрестностей деревни Октябрьск Учалинского района Республики Башкортостан) // Самарский научный вестник. 2021. Т. 10, № 1. С. 121–127.

Осипов С.В. Серийная растительность участков золотодобычи в таежной зоне Нижнего Приамурья // Ботанический журнал. 2006. Т. 91, № 4. С. 521–532.

Рысин Л.П. Исторический фактор в современной сукцессионной динамике лесов центра Русской равнины //Лесоведение. 2006. № 6. С. 3–11.

Сукачев В.Н., Зонн С.В. Методические указания к изучению типов леса. М.: АН СССР, 1961. 144 с.

Телеснина В.М. Динамика растительности при естественном постагрогенном зарастании сенокосов (Костромская область) // Изучение и сохранение биоразнообразия Тульской области и других регионов России: мат. Всерос. науч. конф., посвящ. перспективам создания национального парка «Тульские засеки». Тула, 2021. С. 171–179.

Феклистов П.А. К методике установления сходства дендрохронологических рядов // Дендроклиматические исследования в СССР: тез. докл. 3-й Всесоюзной конф. Архангельск, 1978. С.71–72.

Феклистов П.А., Бызова Н.М., Пашкевич А.И., Сазанова Е.В., Соболев А.Н. Дендрохронологическое исследование древесины в исторически значимых Арктических объектах // ИВУЗ. Лесной журнал. 2020. № 5. С. 106–118. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-106-118.

Хомушку Н.Г., Самбуу А.Д. Первичная сукцессия растительности техногенных отвалов Каа-Хемского угольного разреза республики Тыва // Успехи современного естествознания. 2015. № 6. С. 132–136.

Чибисов Г.А., Москалева С.А., Крыжановская Л.Е. Качество древесины сосны и ели, метод его определения // Вопросы таежного лесоводства на Европейском Севере. Архангельск, 2005. С. 89–99.

Широких П.С., Мартыненко В.Б., Салихов Д.М. Флористические особенности различных стадий восстановительных сукцессий в гемибореальных лесах ассоциации Bupleuro-Pinetum // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15, № 3-5. С. 1522–1525.

Широких П.С., Мартыненко В.Б., Бикбаев И.Г., Наумова Л.Г., Баишева Э.З. Восстановительные сукцессии на вырубках темнохвойно-широколиственных лесов южного Урала // Естественные и технические науки. 2019. № 11 (137). С. 192–197.

Широких П.С., Федоров Н.И., Туктамышев И.Р., Бикбаев И.Г., Мартыненко В.Б. Закономерности лесовосстановительных сукцессий на заброшенных сельскохозяйственных землях Башкирского Предуралья // Экология. 2023. № 3. С. 179–187.

Boiffin J., Aubin I., Munson A.D. Ecological controls on post-fire vegetation assembly at multiple spatial scales in eastern North American boreal forests // Journal of Vegetation Science. 2015. Vol. 26. P. 360–372.

Framstad E., Wit H., Mäkipää R., Larjavaara M., Vesterdal L., Karltun E. Biodiversity, carbon storage and dynamics of old northern forests. Copenhagen: Nordic Council of Ministers, 2013. 130 p.

Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T. R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // Science. 2013. Vol. 342. P. 850–853.

Liu W., Song C., Schroeder T.A., Cohen W.B. Predicting forest successional stages using multitemporal Landsat imagery with forest inventory and analysis data // International Journal of Remote Sensing. 2008. Vol. 29, no. 13. P. 3855–3872.

Song C., Schroeder T.A., Cohen W.B. Predicting temperate conifer forest successional stage distributions with multitemporal Landsat Thematic Mapper imagery // Remote Sensing of environment. 2007. Vol. 106. P. 228–237.

Wardle D.A., Zackrisson O. Effects of species and functional group loss on island ecosystem properties // Nature. 2005. Vol. 435. P. 806–810. DOI: 10.1038/nature03611.

References

Anuchin N.P. Forest taxation. Moscow: Forest Industry, 1982. 552 p. (In Russ.)

Belyaev V.V. Restoration of forests of the European North of Russia. Arkhangelsk: Pomor State University, 2011. 324 p. (In Russ.)

Boiffin J., Aubin I., Munson A.D. Ecological controls on post-fire vegetation assembly at multiple spatial scales in eastern North American boreal forests. *Journal of Vegetation Science*, 2015, vol. 26, pp. 360–372.

Chibisov G.A., Moskaleva S.A., Kryzhanovskaya L.E. The quality of pine and spruce wood, the method of its determination. *Issues of Taiga Forestry in the European North*. Arkhangelsk, 2005, pp. 89-99. (In Russ.)

Feklistov P.A. On the methodology of establishing the similarity of dendrochronological series. *Dendroclimatic research in the USSR*: proceedings of 3rd int. conf. Arkhangelsk, 1978, pp. 71-72. (In Russ.)

Feklistov P.A., Byzova N.M., Pashkevich A.I., Sazanova E.V., Sobolev A.N. Dendrochronological study of wood in historically significant Arctic objects. *Russian Forestry Journal,* 2020, no. 5, pp. 106-118. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-106-118. (In Russ.)

Forest taxation. Pt. 4. Laying, taxation and description of test areas during scientific research and preparation of final qualifying papers: the training manual. Arkhangelsk: NArFU, 2023. 119 p. (In Russ.)

Framstad E., Wit H., Mäkipää R., Larjavaara M., Vesterdal L., Karltun E. Biodiversity, carbon storage and dynamics of old northern forests. Copenhagen: Nordic Council of Ministers, 2013. 130 p.

Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 2013, vol. 342, pp. 850-853.

Khomushku N.G., Sambuu A.D. Primary vegetation succession in man-made landfills of the Kaakhemsky coal mine in the Republic of Tyva. *Successes of Modern Natural Science*, 2015, no. 6, pp. 132-136. (In Russ.)

Liu W., Song C., Schroeder T.A., Cohen W.B. Predicting forest successional stages using multitemporal Landsat imagery with forest inventory and analysis data. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, vol. 29, no. 13, pp. 3855-3872.

Martynenko V.B., Shirokikh P.S., Mirkin B.M., Naumova L.G. Syntaxonomic analysis of regenerative successions after deforestation of light coniferous forests of the South Ural region. *Journal of General Biology*, 2014, vol. 75, no. 6, pp. 478-490. (In Russ.)

Nazarenko N.N., Batyusheva S.Yu. Vegetation transformation under conditions of low-intensity agricultural load (on the example of the vicinity of the village of Oktyabrsk in the Uchalinsky district of the Republic of Bashkortostan). *Samara Scientific Bulletin*, 2021, vol. 10, no. 1, pp. 121-127. (In Russ.)

Osipov S.V. Serial vegetation of gold mining sites in the taiga zone of the Lower Amur region. *Botanical Journal*, 2006, vol. 91, no. 4, pp. 521-532. (In Russ.)

Rysin L.P. Historical factor in the modern succession dynamics of forests in the center of the Russian Plain. *Forestry Science,* 2006, no. 6, pp. 3-11. (In Russ.)

Shirokikh P.S., Martynenko V.B., Salikhov D.M. Floristic features of various stages of regenerative successions in hemiboral forests of the Bupleuro-Pinetum Association. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2013, vol. 15, no. 3-5, pp. 1522-1525. (In Russ.)

Shirokikh P.S., Martynenko V.B., Bikbaev I.G., Naumova L.G., Baisheva E.Z. Restorative successions in deforestation of dark coniferous and broadleaf forests of the southern Urals. *Natural and Technical Sciences*, 2019, no. 11, pp. 192-197. (In Russ.)

Shirokikh P.S., Fedorov N.I., Tuktamyshev I.R., Bikbaev I.G., Martynenko V.B. Patterns of reforestation successions on abandoned agricultural lands of the Bashkir Urals. *Ecology*, 2023, no. 3, pp. 179-187. (In Russ.)

Song C., Schroeder T.A., Cohen W.B. Predicting temperate conifer forest successional stage distributions with multitemporal Landsat Thematic Mapper imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2007, vol. 106, p. 228-237.

Sukachev V.N., Zonn S.V. Methodological guidelines for the study of forest types. Moscow: AN USSR, 1961. 144 p. (In Russ.)

Telesnina V.M. Vegetation dynamics during natural postagrogenic overgrowth of hayfields (Kostroma region). *Study and conservation of biodiversity of Tula Oblast and other regions of Russia*: mat. of the All-Russ. sci. conf. dedicated to the prospects of creating the Tula Zaseki National Park. Tula, 2021, pp. 171-179. (In Russ.)

Wardle D.A., Zackrisson O. Effects of species and functional group loss on island ecosystem properties. *Nature*, 2005, vol. 435, pp. 806-810. DOI: 10.1038/nature03611.

Zarubina L.V., Konovalov V.N. Ecological and biological features of spruce in North taiga phytocenoses (state, anthropogenic influence). Arkhangelsk: NArFU. 2015. 186 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 23.01.2025

Феклистов П.А., Бруева Ж.А., Болотов И.Н., Макаров С.С., Чудецкий А.И. Изменение сосновых фитоценозов в процессе первичной сукцессии // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 305–321. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.305-321

Исследования проводили на острове Ягры в Двинском заливе Белого моря. Это песчаный остров, который почти весь зарос лесом, за исключением самой северной части. Были заложены пробные площади в двух сосновых фитоценозах, где были изучены все имеющиеся ярусы растительности. Один сосняк образовался позже и обособлен от общего лесного массива (условно первая стадия сукцессии). Другой примерно на 10 лет старше и расположен на расстоянии около 1 км от первого (условно вторая стадия сукцессии). Установлено, что за 10 лет в сосняках произошли существенные изменения в видовом составе растений живого напочвенного покрова. Если в начале вселения сосны в напочвенном покрове преобладали светолюбивые виды, прежде всего злаки, то через 10 лет они исчезли (щучка дернистая) или значительно сократили покрытие (полевица обыкновенная). Существенно увеличили проективное покрытие и вышли в доминанты теневыносливые виды – брусника в травяно-кустарничковом и плеуроциум Шребера в мохово-

лишайниковом ярусах. Показано, что по возрастной структуре сосняки разновозрастные, деревья относятся к двум классам возраста. Определены параметры деревьев сосны. Средний диаметр деревьев за 10 лет увеличился на 0,8 см, высота на 0,7 м, а число деревьев, наоборот, уменьшилось на 72 шт./га. Показана высокая степень синхронности в изменении радиального прироста по годам. Коэффициент синхронности составляет 87%. Радиальный прирост в абсолютных величинах на первой стадии в начале вселения примерно в 1,5 раза больше, чем на второй, но с течением времени их величины сравнялись. Установлено, что на первой стадии сукцессии базисная плотность ниже, чем на второй, разница сохраняется с годами. Базисная плотность на первой стадии сукцессии составляет 381 кг/м^3, а на второй – 389 кг/м^3, что ниже, чем в северной тайге, на 5–11%.

Ключевые слова: сукцессия, сосновые фитоценозы, возрастная структура, радиальный прирост, базисная плотность древесины, живой напочвенный покров.

Feklistov P.A., Brueva Zh.A., Bolotov I.N., Makarov S.S., Chudetsky A.I. Changes in pine phytocenoses during primary succession. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 305–321 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.305-321

The research was conducted on Yagry Island in the Dvina Bay of the White Sea. It is a sandy island, which is almost completely overgrown with forest except for the northernmost part. Sample plots were laid out in two pine phytocenoses, where all vegetation layers were studied. One pine forest was formed the latest and is isolated from the general forest area (conditionally the first stage of succession). The other is about 10 years older and is located at a distance of about 1 km from the first (conditionally the second stage of succession). It has been established that significant changes in the species composition of living ground cover plants have occurred in the pine forests over the past 10 years. If, at the beginning of the pine's settlement, light-loving species prevailed in the ground cover, above all, cereals, after 10 years they disappeared (tufted hairgrass) or their cover significantly decreased (common bent). Shade-tolerant dominant species such as lingonberry in the grass-shrub layer and Schreber's pleurocium in the moss-lichen layer have significantly increased in the projective coverage. It is shown that the pine forests are of different ages in terms of age structure, the trees belong to two age classes. The parameters of pine trees have been determined. The average diameter of trees in 10 years increased by 0.8 cm, height by 0.7 m, and the number of trees, on the contrary, decreased by 72 pcs/ha. A high degree of synchronicity in the variation of radial increment over the years is shown. The synchronicity coefficient is 87%. The radial increase in absolute values at the first stage at the beginning of the settlement is about 1.5 times greater than at the

second, but over time their values have equalized. It has been established that at the first stage of succession, the basic density is lower than at the second and the difference persists over the years. The basic density at the first stage of succession is 381 kg/m^3, and at the second 5– 389 kg/m^3, which is 55–11% lower than in the northern taiga.

K e y w o r d s : succession, pine phytocenoses, age structure, radial growth, basic density of wood, living ground cover.

ФЕКЛИСТОВ Павел Александрович – главный научный сотрудник Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова УрО РАН, профессор, доктор сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 4825-2695. ORCID: 0000-0002-7961-8318.

163020, Никольский пр., д. 20, г. Архангельск, Россия. E-mail: pfeklistov@yandex.ru

FEKLISTOV Pavel A. – DSc (Agricultural), Chief Researcher, Federal Research Center for Integrated Arctic Studies named after Academician N.P. Laverov, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Professor. SPIN-code: 4825-2695. ORCID: 0000-0002-7961-8318.

163020. Nikolsky av. 20. Arkhangelsk. Russia. E-mail: pfeklistov@yandex.ru

БРУЕВА Жанна Алексеевна – аспирант Северного (Арктического) Федерального университета им. М.В. Ломоносова. ORCID: 0009-0008-9177-1316.

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: bruevazh@bk.ru

BRUEVA Zhanna A. – PhD student, M.V. Lomonosov Northern (Arctic) Federal University. ORCID: 0009-0008-9177-1316.

163002. Severnaya Dvina emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: bruevazh@bk.ru

БОЛОТОВ Иван Николаевич – директор Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова УрО РАН, доктор биологических наук. ORCID: 0000-0002-3878-4192.

163020, Никольский пр., д. 20, г. Архангельск, Россия. E-mail: inepras@yandex.ru

BOLOTOV Ivan N. – DSc (Biological), Director, Federal Research Center for Integrated Arctic Studies named after Academician N.P. Laverov, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. ORCID: 0000-0002-3878-4192.

163020. Nikolsky av. 20. Arkhangelsk. Russia. E-mail: inepras@yandex.ru

МАКАРОВ Сергей Сергеевич – заведующий кафедрой декоративного садоводства и газоноведения Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А. Тимирязева, доктор сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 9173-6049. ORCID: 0000-0003-0564-8888.

127550, ул. Тимирязевская, д. 49, г. Москва, Россия. E-mail: s.makarov@rgau-msha.ru

MAKAROV Sergey S. – DSc (Agricultural), Head of the Department of Ornamental Horticulture and Lawn Science, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy. SPIN-code: 9173-6049. ORCID: 0000-0003-0564-8888.

127550. Timiryazevskaya str. 49. Moscow. Russia. E-mail: s.makarov@rgau-msha.ru

ЧУДЕЦКИЙ Антон Игоревич – доцент кафедры декоративного садоводства и газоноведения Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А. Тимирязева, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 5973-5759. ORCID: 0000-0003-4804-7759.

127550, ул. Тимирязевская, д. 49, г. Москва, Россия. E-mail: chudetski@rgau-msha.ru

CHUDETSKY Anton I. – PhD (Agricultural), Associate Professor of the Department of Ornamental Horticulture and Lawn Science, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy. SPIN-code: 5973-5759. ORCID: 0000-0003-4804-7759.

127550. Timiryazevskaya str. 49. Moscow. Russia. E-mail: chudetski@rgau-msha.ru

УДК 630*23

Д.А. Данилов, А.В. Андреев

ПЛОТНОСТЬ ДРЕВЕСИНЫ ЕЛИ НА ЛЕСНЫХ И ПОСТАГРОГЕННЫХ ЗЕМЛЯХ ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Введение. Исследованию плотности древесины ели европейской (*Picea abies* (L.) H.Karst), на бывших сельскохозяйственных и лесных землях посвящён ряд работ для северо-запада европейской части страны [Полубояринов, 1976; Чибисов, Москалева, 2000; Чибисов и др., 2005; Селиверстов, 2008; Лохов, 2011; Данилов, Смирнов, 2014; Грибов и др., 2020; Януш, Данилов, 2020]. Плотность древесины ели в древостоях, произрастающих на старопахотных и лесных почвах, по проведённым ранее исследованиям различается [Перелыгин, Уголев, 1971; Корчагов и др., 2010, 2020]. Вариабельность плотности древесины по высоте ствола также имеет свои особенности, связанные с условиями произрастания и возрастом древостоя. Свойства древесины варьируются как по высоте, так и по сечению ствола [Смирнов, 2004; Гелес, 2007; Усольцев, Цепордей, 2020; Тюрин и др., 2024].

Зарубежные исследователи отмечают, что в умеренной зоне плотность древесины ели на лесных и постагрогенных почвах различается. В настоящее время не сложилось единого мнения о влиянии условий произрастания на качественные характеристики древесины ели [Lindstrom, 1996; Wilhelmsson et al., 2002; Repola, 2006; Perkovic et al., 2019; Adams et al., 2020], однако отмечается, что ель европейская продуцирует большие объёмные показатели на бывших пахотных почвах в бореальной зоне [Liepins et al., 2008; Daugaviete et al., 2024; Gichan, Tebenkova, 2024].

Получение высококачественной хвойной древесины является одной из насущных задач теории и практики лесоводства, поэтому целью проводимого исследования был сравнительный анализ и оценка показателей плотности древесины ели европейской в ее спелых условно чистых естественных древостоях на постагрогенных и лесных землях.

Объекты и методика исследования. Опытными объектами исследования были спелые естественные ельники в условиях Лужско-Оредежского

ландшафта Ленинградской области. Геологическое строение этого ландшафта представлено красными бескарбонатными девонскими песчаниками, выше которых располагается красный, богатый железом валунный суглинок [Почвы…, 1973; Данилов и др., 2022]. Еловые древостои произрастают на дерново-подзолистых суглинистых почвах на двучленном наносе, ранее подвергавшиеся распашке и выращиванию сельскохозяйственных культур, а также на антропогенно не преобразованных лесных почвах. Данные почвы в лесном фонде занимают до 40%, а в сельскохозяйственном обороте до 20% площадей ландшафта [Почвы…, 1973; Чертов, 1981; Апарин, 1992].

Пробные площади на опытных участках закладывались по лесоводственно-таксационным методикам[1].

Полученные по результатам таксации данные показывают, что наибольшей производительностью отличаются ельники на бывших пахотных землях (табл. 1). Данный факт уже отмечался в ранее проведённых для хвойных древостоев исследованиях [Януш, Данилов, 2020].

Таблица 1

Таксационные характеристики древостоев сосны и ели на лесных и постагрогенных землях в регионе исследования

-Taxation characteristics of pine and spruce stands on forest and postagrogenic lands in the study region

Опытный объект №1. 7Е1С2Ос на лесных землях				
Порода	А	$D_{ср}$	$H_{ср}$	М
Ель	85	24	28	250
Сосна	85	24	28	40
Осина	70	25	32	70
Итого:				360
Опытный объект №2. 9Е1Б на лесных землях				
Ель	90	28	25	280
Берёза	70	24	24	30
Итого:		26	25	310
Опытный объект №3. 9Е1Б на постагрогенных землях				
Ель	85	30	27	420
Берёза	60	20	22	70
Итого:		25	25	490

Примечание. А – возраст, лет; $D_{ср}$ – средний диаметр, см; $H_{ср}$ – средняя высота, м; М – запас на га, м^3

[1] ОСТ 56-69–83. Площади пробные лесоустроительные. Метод закладки.

В исследуемых еловых древостоях были отобраны модельные деревья из наиболее представленных ступеней толщины и взяты диски по относительным высотам от Н0 до Н10, т.е. по всей длине ствола. Базисная плотность древесины определялась методом максимальной влагоёмкости [Полубояринов, 1976]. Для обработки данных и получения зависимостей использовался набор стандартных компьютерных программ [Бондаренко, Жигунов, 2016]. Проводился сравнительный анализ полученных данных с использованием однофакторного дисперсионного анализа. При этом методе, если средние значения случайной величины, вычисленные по отдельным выборкам, одинаковы, то оценки факторной и остаточной дисперсий являются несмещенными оценками генеральной дисперсии и различаются несущественно. Тогда сопоставление оценок этих дисперсий по критерию Фишера должно показать, что отвергать нулевую гипотезу о равенстве факторной и остаточной дисперсий нет оснований. Если оценка факторной дисперсии больше оценки остаточной дисперсии, можно сразу утверждать несправедливость нулевой гипотезы о равенстве математических ожиданий по слоям выборки, и фактор оказывает существенное влияние на случайную величину.

Результаты исследования. На основе отобранных с модельных деревьев ели образцов древесины на объектах исследования была измерена их базисная плотность по относительным высотам. В целом вариабельность древесины ели по высоте ствола выше в древостоях на старопахотных землях (4-9%), чем на лесных почвах (2-4%). Такой невысокий размах вариабельности плотности древесины говорит об однородном характере её формирования, что связано с биологическими особенностями. В целом плотность древесины ели на постагрогенных землях по ступеням толщины выше, чем на лесных почвах, и имеет тенденцию увеличиваться от мелких к крупным ступеням (рис. 1). На дерново-подзолистых суглинистых почвах наблюдается уменьшение плотности древесины с увеличением диаметра ствола ели.

Для определения влияния величины диаметра ствола и относительной высоты на плотность древесины ели применялся график квадратичной функции, т.к. графика поверхности достаточно достоверно показывает совместное влияние этих параметров на плотность древесины ели. В проведенных раннее исследованиях данный подход дал удовлетворительные результаты по выявлению этих связей [Януш и др., 2022; Зайцев, Данилов, 2023].

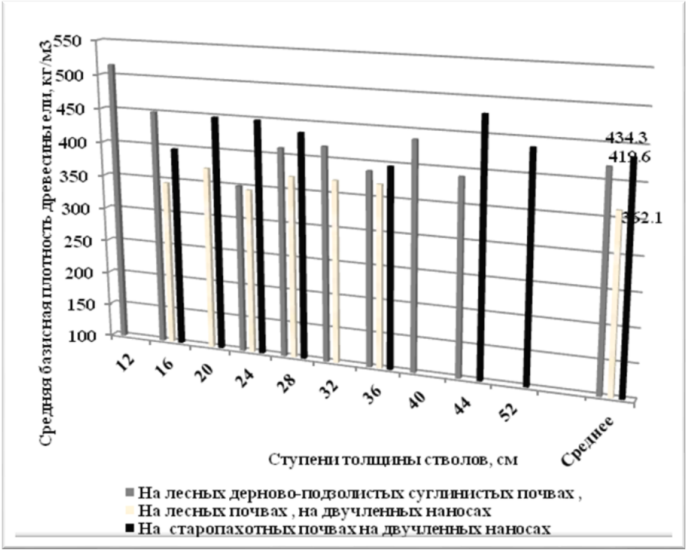


Рис. 1. Средняя базисная плотность древесины ели по ступеням толщины на объектах исследования (кг/м^3)

Fig. 1. The average basic density of spruce wood in terms of thickness at the study sites (kg/m3)

Графическое изображение влияния относительной высоты и категории крупности стволов ели в древостое на лесных дерново-подзолистых суглинистых почвах показывает, что с увеличением высоты ствола наблюдается закономерность уменьшения плотности до его середины по всем ступеням толщины (рис. 2). Дальнейшее увеличение плотности древесины связано, вероятно, с кроновой частью и образованием более плотной древесины между ветвями ели.

Для деревьев ели, произрастающих на лесных дерново-подзолистых почвах на двучленных наносах, график наклона имеет отличную от рассмотренной выше форму. Наблюдается увеличение плотности древесины в более крупных ступенях толщины с увеличением относительной высоты ствола деревьев ели (рис. 3).

Для деревьев ели в древостое, произрастающем на старопахотных почвах, наблюдается совершенно иная закономерность распределения плотности по высоте ствола. Плотность древесины ствола на графике поверхности имеет плавный перегиб и снижение значений в кроновой части. Иными словами, идет увеличение плотности древесины ели к середине ствола с возрастание ступени толщины деревьев, а затем снижение (рис. 4).

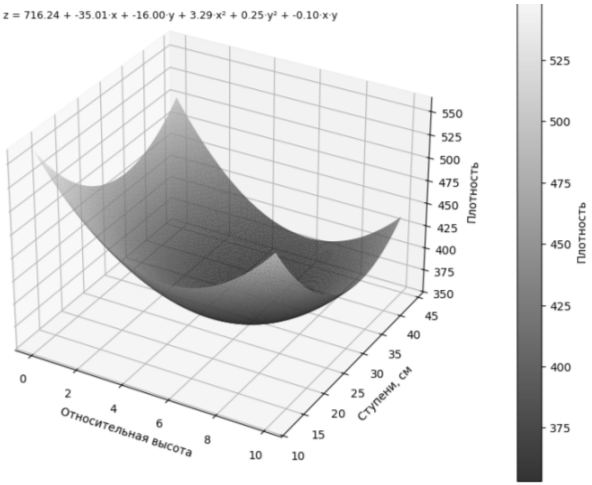


Рис. 2. Влияние относительной высоты и диаметра ствола ели на плотность древесины на лесных дерново-подзолистых суглинистых почвах

Fig. 2. The effect of the relative height and diameter of the spruce trunk on the density of wood on forest sod-podzolic loamy soils

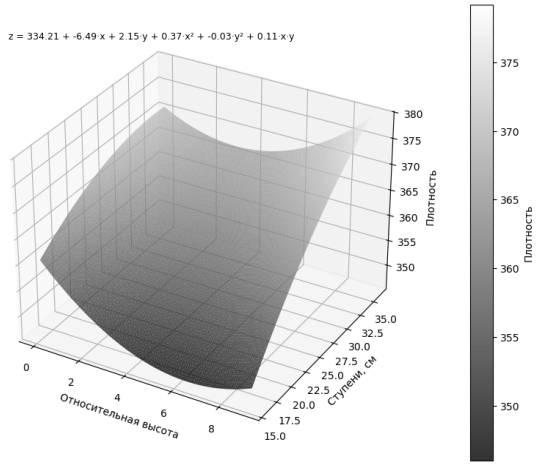


Рис. 3. Влияние относительной высоты и диаметра ствола ели на плотность древесины на лесных дерново-подзолистых почвах на двучленных наносах

Fig. 3. The effect of the relative height and diameter of the spruce trunk on the density of wood on forest sod-podzolic soils on binomial deposits

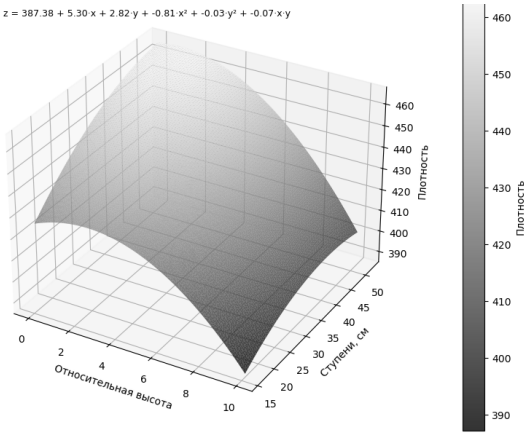


Рис. 4. Влияние относительной высоты и диаметра ствола ели на плотность древесины на постагрогенных почвах на двучленных наносах

Fig. 4. The effect of the relative height and diameter of the spruce trunk on the density of wood in postagrogenic soils on binomial deposits

Полученные уравнения квадратичной функции в графической интерпретации показывают разную закономерность формирования плотности по высоте ствола у ели у деревьев разных диаметров в рассматриваемых почвенных условиях произрастания.

Для выявления статистически значимых различий формируемой плотности древесины ели по высоте ствола в древостоях, произрастающих в различных почвенных условиях, был проведён однофакторный дисперсионный анализ полученного массива данных.

При сравнении показателей плотности древесины ели между древостоями, произрастающими на дерново-подзолистых суглинистых почвах и на старопахотных землях, была проверена нулевая гипотезу H_0 на равенство средних значений x, полученный Fнабл составил 12.66. Для уровня значимости α=0.05, чисел степеней свободы 7 и 88 находим Fкр из таблицы распределения Фишера-Снедекора, он составит 2.11.

При сравнении древостоев ели, произрастающих на почвах, сформированных на двучленных наносах без сельскохозяйственного воздействия в виде вспашки и с ним, полученный Fнабл составил 13.84. Для уровня значимости α=0.05, чисел степеней свободы 13 и 126 находим Fкр из таблицы распределения Фишера-Снедекора, он составит 1.80.

При сравнении плотности древесины еловых древостоев на дерново-подзолистых суглинистых почвах и на почвах на двучленных отложениях без антропогенного воздействия полученный Fнабл составил 25.61. Для уровня значимости α=0.05, чисел степеней свободы 13 и 129 находим Fкр из таблицы распределения Фишера-Снедекора, он составит 1.80.

В связи с тем, что во всех случаях Fнабл > Fкр, альтернативную гипотезу о существенном влиянии фактора на результаты экспериментов принимаем, а нулевую гипотезу о равенстве групповых средних отвергаем. Другими словами, групповые средние в целом различаются значимо, и фактор условий произрастания значимо влияет на формирование плотности древесины по высоте ствола еловых древостоев на опытных объектах.

Заключение. Использование графиков поверхности квадратичной функции показало различный характер формирования плотности древесины по высотам различных категорий крупности деревьев в зависимости от почвенных условий.

Проведённое исследование выявило на основе однофакторного дисперсионного анализа достоверный вклад почвенного фактора условий произрастания в формирование плотности древесины ели по высоте ствола в районе исследования.

Полученные результаты подтвердили, что в условиях произрастания на старопахотных почвах ель формирует более плотную древесину, чем на лесных почвах.

Смоделированные уравнения квадратичной функции могут быть использованы для определения плотности древесины по высоте ствола ели в сходных условиях произрастания.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Апарин Б.Ф. Географические основы рационального использования почв (на двучленных породах) / под ред. И.В. Игнатенко. Л., 1992. 190 с.

Бондаренко А.С., Жигунов А.В. Статистическая обработка материалов лесоводственных исследований: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Полит. ун-та, 2016. 125 с.

Гелес И.С. Древесное сырье – стратегическая основа и резерв цивилизации. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 499 с.

Грибов С.Е., Корчагов С.А., Хамитов Р.С., Евдокимов И.В. Производительность древостоев, сформировавшихся на землях сельскохозяйственного назначения // Лесной вестник / Forestry Bulletin. 2020. Т. 24, № 6. С. 19–25. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-6-19-25.

Данилов Д.А., Смирнов А.П. Влияние структуры древостоя на плотность древесины сосны и ели в черничном типе леса // Лесотехнический журнал. 2014. №4. С. 13-20.

Данилов Д.А., Зайцев Д.А., Иванов А.А., Вайман А.А. Состояние почвенного комплекса под спелыми древостоями сосны и ели на постагрогенных землях юго-запада Ленинградской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 240. С. 84–98. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.240.84–98.

Зайцев Д.А., Данилов Д.А. Влияние макростроения ксилемы на плотность древесины сосны и ели в смешанных спелых древостоях, не затронутых хозяйственным воздействием // Труды СПбНИИЛХ. 2023. № 1. С. 20-30. DOI: 10.21178/2079-6080.2023.1.20.

Корчагов С.А., Грибов С.Е., Щекалев, Р.В. Свойства древесины ели в плантационных культурах Вологодской области // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2010. № 3. С. 63–66.

Корчагов С.А., Грибов С.Е., Хамитов Р.С, Евдокимов И.В. Производительность древостоев, сформировавшихся на землях сельскохозяйственного назначения / // Лесной вестник. 2020. Т. 24, № 6. С. 19–25. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-6-19-25.

Лохов Д.В. Лесоводственная оценка и показатели качества древесины культур сосны на залежных землях // Экологические проблемы Севера: межвуз. сб. науч. тр. 2011. Вып. 14. С. 73–76.

Перелыгин Л.М., Уголев Б.Н. Древесиноведение. М.: Лесн. пром-сть, 1971. 288 с.

Полубояринов О.И. Плотность древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 160 с.

Почвы Ленинградской области / под ред. В.К. Пестрякова. Л.: Лениздат, 1973. 344 с.

Селиверстов А.А. Литературный обзор: Исследования по качеству древесины / ред. Ю.Ю. Герасимова, С. Карвинен, Э. Вялькккю. Йоэнсуу: METLA, 2008. 60 с.

Смирнов А.А. Влияние комплексного ухода на форму ствола и плотность древесины // Строение, свойства и качество древесины-2004: тр. IV Межд. симпозиума. СПб., 2004. Т. I. С. 131-133.

Тюрин Д.С., Зайцев Д.А., Данилов Д.А. Структура надземной фитомассы ели и сосны в плантационных насаждениях, выращиваемых по короткой ротации // Труды СПбНИИЛХ. 2024. № 1. С. 4–18. DOI: 10.21178/2079-6080.2024.1.4.

Усольцев В.А., Цепордей И.С. Квалиметрия фитомассы лесных деревьев: плотность и содержание сухого вещества: монография. Екатеринбург: УГЛТУ, 2020. 179 с.

Чертов О.Г. Экология лесных земель (почвенно-экологическое исследование лесных местообитаний). Л.: Наука, 1981. 192 с.

Чибисов Г.А., Москалева С.А. Качество древесины ельников, формирующихся после выборочных рубок // ИВУЗ. Лесной журнал. 2000. № 4. С. 7 – 16.

Чибисов Г.А., Москалева С.А., Крыжановская Л.Е. Качество древесины сосны и ели, метод его определения // Вопросы таёжного лесоводства на Европейском Севере: сб. науч. тр. Архангельск, 2005. С. 89–99.

Януш С.Ю., Данилов Д.А. Таксационная и товарная структура древостоев сосны и ели на старопахотных и лесных почвах в Ленинградской области // Труды СПбНИИЛХ. 2020. № 4. С. 54–64. DOI: 10.21178/2079–6080.2020.4.54.

Януш С.Ю., Данилов Д.А., Зайцев Д.А. Моделирование зависимости плотности древесины сосны обыкновенной и ели европейской от макроструктурных элементов ксилемы // Труды СПбНИИЛХ. 2022. № 4. С. 42-57. DOI: 10.21178/2079-6080.2022.4.42.

Adams M.B., Kelly C., Simpson B., Juracko J. Growth and Productivity of a 45-year-old Norway Spruce Plantation on the Fernow Experimental Forest / Research Note NRS-253. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station, 2020. 11 pp. DOI: 10.2737/NRS-RN-253.

Daugaviete M., Zuševica A., Celma S., Vendiņa V., Makovskis K., Dūmiņš K., Štāls T.A. Growth rate and productivity of Norway spurce (*Picea abies* (L.) H. Karst.) plantations on agricultural and forest land // Acta Biol. Univ. Daugavp. 2024. Vol. 24, iss. 1. P. 47-65.

Gichan D.V., Tebenkova D.N. Woody plants growth on abandoned agricultural lands: scale, causes of abandonment, ways of use: a review // Вопросы лесной науки. 2024. №2. Art. no. 148.

Liepins K., Lazdins A., Lazdina D., Daugaviete M., Miezite O., Naturally afforested agricultural lands in Latvia–assessment of available timber resources and potential productivity // Environmental engineering: proceedings of the 7th int. conf. Vilnus, 2008. P. 194–199.

Lindstrom H. Basic density in Norway spruce. Part II. Predicted by stem taper, mean growth ring width, and factors related to crown development // Wood and Fiber Science. 1996. Vol. 28, iss. 2. P. 240-251.

Perković I., Pernar N., Roje V., Bakšić D., Baneković M. Impacts of Norway spruce (*Picea abies* L., H. Karst.) stands on soil in continental Croatia // iForest. 2019. Vol. 12. P. 511-517. DOI: 10.3832/ifor3023-012.

Repola J. Models for Vertical Wood Density of Scots Pine, Norway Spruce and Birch Stems, and Their Application to Determine Average Wood Density // Silva Fennica. 2006. Vol. 40, iss. 4. P. 673-675.

Wilhelmsson L., Arlinger J., Spångberg K., Lundqvist S.-O., Grahn T., Hedenberg Ö., Olsson L. Models for predicting wood properties in stems of *Picea abies* and *Pinus sylvestris* in Sweden // Scandinavian Journal of Forest Research. 2002. Vol. 17, iss. 4. P. 330-350. DOI: 10.1080/02827580260138080.

References

Adams M.B., Kelly C., Simpson B., Juracko J. Growth and Productivity of a 45-year-old Norway Spruce Plantation on the Fernow Experimental Forest / Research Note NRS-253. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station, 2020. 11 pp. DOI: 10.2737/NRS-RN-253.

Aparin B.F. Geographical foundations of rational use of soils (on binomial rocks) / ed. by I.V. Ignatenko. Leningrad, 1992. 190 p. (In Russ.)

Bondarenko A.S., Zhigunov A.V. Statistical processing of forestry research materials: textbook. St. Petersburg: Publishing House of Polytechnic University, 2016. 125 p. (In Russ.)

Chertov O.G. Ecology of forest lands (soil and ecological study of forest habitats). Leningrad: Nauka, 1981. 192 p. (In Russ.)

Chibisov G.A., Moskaleva S.A. The quality of the wood of spruce forests formed after selective logging. *Lesnoy zhurnal*, 2000, no. 4, pp. 7-16. (In Russ.)

Chibisov G.A., Moskaleva S.A., Kryzhanovskaya L.E. The quality of pine and spruce wood, the method of its determination. *Issues of taiga forestry in the European North*: collection of scientific papers. Arkhangelsk, 2005, pp. 89-99. (In Russ.)

Danilov D.A., Smirnov A.P. The influence of the structure of the stand on the density of pine and spruce wood in the blueberry type of forest. *Forestry Engineering Journal,* 2014, no. 4, pp. 13-20. (In Russ.)

Danilov D.A., Zaitsev D.A., Ivanov A.A., Vayman A.A. The state of the soil complex under ripe stands of pine and spruce in the postagrogenic lands of the southwest of the Leningrad region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2022, iss. 240, pp. 84-98. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.240.84-98. (In Russ.)

Daugaviete M., Zuševica A., Celma S., Vendiņa V., Makovskis K., Dūmiņš K., Štāls T.A. Growth rate and productivity of Norway spurce (*Picea abies* (L.) H. Karst.) plantations on agricultural and forest land. *Acta Biol. Univ. Daugavp.*, 2024, vol. 24, iss. 1, pp. 47-65.

Geles I.S. Wood raw materials – the strategic basis and reserve of civilization. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2007. 499 p. (In Russ.)

Gichan D.V., Tebenkova D.N. Woody plants growth on abandoned agricultural lands: scale, causes of abandonment, ways of use: a review. *Questions of forest science*, 2024, no. 2, art. no. 148.

Gribov S.E., Korchagov S.A., Khamitov R.S., Evdokimov I.V. Productivity of stands formed on agricultural lands. *Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 6, pp. 19-25. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-6-19-25. (In Russ.)

Korchagov S.A., Gribov S.E., Shchekalyov R.V. Properties of spruce wood in plantation crops of the Vologda region. *Bulletin of the Moscow State University of Forests*, 2010, no. 3, pp. 63-66. (In Russ.)

Korchagov S.A., Gribov S.E., Khamitov R.S., Evdokimov I.V. Productivity of stands formed on agricultural lands. *Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 6, pp. 19-25. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-6-19-25. (In Russ.)

Liepins K., Lazdins A., Lazdina D., Daugaviete M., Miezite O., Naturally afforested agricultural lands in Latvia–assessment of available timber resources and potential productivity. *Environmental engineering*: proceedings of the 7th int. conf. Vilnus, 2008, pp. 194–199.

Lindstrom H. Basic density in Norway spruce. Part II. Predicted by stem taper, mean growth ring width, and factors related to crown development. *Wood and Fiber Science*, 1996, vol. 28, iss. 2, pp. 240-251.

Lokhov D.V. Forestry assessment and quality indicators of pine crops on fallow lands. *Environmental problems of the North*: interuniversity collection of scientific papers, 2011, iss. 14, pp. 73-76. (In Russ.)

Perelygin L.M., Ugolev B.N. Wood science. Moscow: Forest industry, 1971. 288 p. (In Russ.)

Perković I., Pernar N., Roje V., Bakšić D., Baneković M. Impacts of Norway spruce (*Picea abies* L., H. Karst.) stands on soil in continental Croatia. *iForest*, 2019, vol. 12, pp. 511-517. DOI: 10.3832/ifor3023-012.

Poluboyarinov O.I. Wood density. Moscow: Forest industry, 1976. 160 p. (In Russ.)

Repola J. Models for Vertical Wood Density of Scots Pine, Norway Spruce and Birch Stems, and Their Application to Determine Average Wood Density. *Silva Fennica*, 2006, vol. 40, iss. 4, pp. 673-675.

Seliverstov A.A. A literary review of wood quality research / ed. by Yu.Yu. Gerasimov, S. Karvinen, E. Vyalkkyu. Joensuu: METLA, 2008. 60 p. (In Russ.)

Smirnov A.A. The influence of comprehensive care on the shape of the trunk and the density of wood. *Structure, properties and quality of wood-2004*: proceedings of the IV Int. Symposium. St. Petersburg, 2004, vol. I, pp. 131-133. (In Russ.)

Soils of the Leningrad region / ed. by V.K. Pestryakov. Leningrad: Lenizdat, 1973. 344 p. (In Russ.)

Tyurin D.S., Zaitsev D.A., Danilov D.A. The structure of the aboveground phytomass of spruce and pine in plantation plantations grown in short rotation. *Proceedings of SPbNIILH*, 2024, no. 1, pp. 4-18. DOI: 10.21178/2079-6080.2024.1.4. (In Russ.)

Usoltsev V.A., Tsepordey I.S. Qualimetry of phytomass of forest trees: density and dry matter content: monograph. Yekaterinburg: UGLTU, 2020. 179 p. (In Russ.)

Wilhelmsson L., Arlinger J., Spångberg K., Lundqvist S.-O., Grahn T., Hedenberg Ö.,Olsson L. Models for predicting wood properties in stems of *Picea abies* and *Pinus sylvestris* in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2002, vol. 17, iss. 4, pp. 330-350. DOI: 10.1080/02827580260138080.

Yanush S.Yu., Danilov D.A. The taxation and commodity structure of pine and spruce stands on old arable and forest soils in the Leningrad region. *Proceedings of SPbNIILH*, 2020, no. 4, pp. 54-64. DOI: 10.21178/2079-6080.2020.4.54. (In Russ.)

Yanush S.Y., Danilov D.A., Zaitsev D.A. Modeling the dependence of wood density of Scots pine and European spruce on the macrostructural elements of xylem. *Proceedings of SPbNIILH*, 2022, no. 4, pp. 42-57. DOI: 10.21178/2079-6080.2022.4.42. (In Russ.)

Zaitsev D.A., Danilov D.A. The effect of xylem macrostructure on the density of pine and spruce wood in mixed ripe stands not affected by economic impact. *Proceedings of SPbNIILH*, 2023, no. 1, pp. 20-30. DOI: 10.21178/2079-6080.2023.1.20. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 24.07.2025

Данилов Д.А., Андреев А.В. Плотность древесины ели на лесных и постагрогенных землях Ленинградской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 322–334. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.322-334

В условиях Лужско-Оредежского ландшафта Ленинградской области проведено исследование показателей плотности древесины ели. Объектами исследования были спелые условно чистые по составу ельники, произрастающие на лесных и постагрогенных землях. Для елового древостоя, произрастающего на старопахотных землях, отмечается большая плотность древесины, чем для насаждений на лесных почвах. Смоделированные графики квадратичной функции позволяют прогнозировать плотность древесины по высоте ствола ели для сходных условий произрастания. В ходе исследования выявлен различный характер формирования плотности древесины ели по высоте ствола в различных ступенях толщины деревьев. Различия подтверждены дисперсионным анализом полученных данных.

Ключевые слова: условно чистые древостои ели, лесные и постагрогенные земли, почвы, плотность древесины, относительная высота ствола, дисперсионный анализ, графики квадратичной функции.

Danilov D.A., Andreev A.V. Spruce wood density on forest and postagrogenic lands of the Leningrad region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 322–334 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.322-334

In the conditions of the Luga-Oredezhsky landscape of the Leningrad region, a study of the density of spruce wood was conducted. The objects of the study were ripe relatively pure spruce forests growing on forest and postagrogenic lands. For spruce

stands growing on old arable lands, there is a higher density of wood than for plantations on forest soils. The modeled graphs of the quadratic function make it possible to predict the density of wood by the height of the spruce trunk for similar growing conditions. The study revealed the different nature of the formation of the density of spruce wood in the height of the trunk at different levels of tree thickness. The differences are confirmed by a variance analysis of the data obtained.

Keywords: conditionally pure stands of spruce, forest and postagrogenic lands, soils, wood density, relative trunk height, analysis of variance, graphs of the quadratic function.

ДАНИЛОВ Дмитрий Александрович – заведующий кафедрой почвоведения Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 5826-3852. ORCID: 0000-0002-7504-5743.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: stown200@mail.ru

DANILOV Dmitriy A. – DSc (Agriculture), Head of Soil Science Department, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 5826-3852. ORCID: 0000-0002-7504-5743.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: stown200@mail.ru

АНДРЕЕВ Александр Викторович – аспирант Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: piluxa16011@gmail.com

ANDREEV Alexandr V. – PhD student, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: piluxa16011@gmail.com

УДК 630*232.49

М.В. Ермакова

ВЛИЯНИЕ ДОПОЛНЕНИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЛЕСНЫХ КУЛЬТУР СОСНЫ В КУРГАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Введение. В настоящее время, в соответствии с задачами и требованиями Климатической доктрины Российской Федерации[1], одной из наиболее важных задач лесного хозяйства по-прежнему является восстановление лесной древесной растительности, в том числе сосны обыкновенной, на территориях, лишившихся ее в результате действия различных причин как антропогенного (вырубки, лесные пожары), так и природного характера (природные лесные пожары). Значительную роль в решении этой проблемы играет искусственное лесовосстановление путем создания лесных культур[2].

Успешность искусственного лесовосстановления обеспечивается соблюдением ряда необходимых условий [Гаврилова и др., 2021; Смагин и др., 2021; Гаврилова и др., 2023; Пак и др., 2024]. В эти условия входят применение качественного посадочного материала [Сунгурова, Дрочкова, 2021], соблюдение параметров размещения высаживаемых растений на лесокультурной площади и объективная оценка природно-климатических условий района проведения искусственного лесовосстановления [Тырченкова, 2017; Гладинов и др., 2021]. Соответственно, разработка планов лесовосстановления должна учитывать в т.ч. и определенные особенности почвенных, гидрологических и иных условий района проведения лесокультурных работ [Проказин и др., 2017]. Одним из условий успешного лесовосстановления, особенно в достаточно сложных условиях, можно считать возможность (при приживаемости 25-85% от общего количества первоначально высаженных) проведения дополнений лесных культур [Турчина, Банникова, 2023].

К подобным условиям, например, относится Западно-Сибирский подтаежно-лесостепной район[3], в котором вследствие катастрофических при-

[1] Климатическая доктрина Российской Федерации. Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 26 октября 2023 г. №812.

[2] Правила лесовосстановления, формы, состава, порядка согласования проекта лесовосстановления, оснований для отказа в его согласовании, а также требований к формату в электронной форме проекта лесовосстановления от 29 декабря 2021 г. № 1024.

[3] Приказ МПР от 18 августа 2014 г. № 367, с изм. на 2 августа 2023 г.

родно-антропогенных пожаров за последние десятилетия вопросы лесовосстановления весьма актуальны.

Отличительной особенностью этого района с его недостаточным увлажнением и избытком тепла, коротким, жарким, периодически засушливым летом является сложность почвенного покрова. Наибольшее распространение на территории района имеет черноземный тип почв, осолоделые почвы и солоди, серые лесные и серые лесные оподзоленные почвы, солонцы[4].

Сосняки располагаются исключительно по древним песчаным отложениям вблизи рек и озер [Горчаковский, 1968; Елисеев, Бунькова, 2024], что, соответственно, определяет проведение искусственного лесовосстановления сосны преимущественно в этих условиях.

Искусственное лесовосстановление сосны в подобных почвенно-климатических условиях сталкивается с определенными сложностями, такими как недостаток почвенной влаги при высоких температурах воздуха, засыпание и засекание стволиков сеянцев песком и т.д. [Перепечина, 2011; Проказин и др., 2017]. Следовательно, даже при соблюдении всех установленных технологических приемов создания лесных культур приживаемость высаженных сеянцев оказывается ниже нормативной, что требует проведения дополнений, иногда неоднократных.

Естественно предположить, что подобные лесные культуры сосны с дополнениями к моменту перевода в категорию земель, на которых расположены леса, могут отличаться по своей структурно-функциональной организации от лесных культур, созданных без применения дополнений. Однако работ, посвященных этому вопросу, на данный момент крайне мало.

Исследование лесных культур с дополнениями необходимо для задач более качественного планирования уходов как за лесными культурами, так и за молодняками сосны на землях, на которых расположены леса. Кроме того, оно позволит более точно проводить мониторинг накопления запасов фитомассы древесной растительности на ранних этапах формирования древостоев, что является необходимым условием в контексте развития программы лесоклиматических проектов.

Цель работы заключалась в изучении особенностей структурно-функциональной организации лесных культур сосны с различным количеством дополнений на момент перевода их в категорию земель, на которых расположены леса.

Материалы и методика исследований. Объектом исследований являлись 8-летние лесные культуры сосны на вырубках в зеленомошном типе

[4] Лесной план Курганской области. Распоряжение Губернатора Курганской области от 3 апреля 2019 г. № 40-П-р с изменениями от 01.09.2019 г.

леса [Перепечина, 2011] на территории Кетовского лесничества Курганской области Западно-Сибирского подтаежно-лесостепного района.

Лесные культуры были созданы путем посадки с помощью меча Колесова стандартных 2-летних сеянцев сосны по бороздам, созданным плугом ПЛ-1.

Перед проведением исследований по каждой пробной площади (ПП) совместно с работниками лесничеств, проводивших лесовосстановительные мероприятия, уточнялись данные о проведении посадок, в т.ч. о проведении дополнений в рядах лесных культур.

Исследования на пробных площадях лесных культур выполнялись в соответствии с общепринятыми методиками [Огиевский, Хиров, 1964] с учетом современных методических указаний [Методика…, 2023]. На каждой ПП через равные расстояния по трансекте закладывались площадки размером 50х50 м. На каждой площадке тщательно обследовались все деревья. У каждого дерева подсчитывалось количество годичных побегов для уточнения, к какой категории относятся деревья – основная посадка или дополнение. Если дополнение проводилось в течение ряда лет, то деревья дополнения подразделялись на группы: дополнение 1 – дополнение на следующий год после основной посадки; дополнение 2 – на 2-й год после посадки и т.д. Каждый отдельный участок в ряду культур – основная посадка, дополнение 1, дополнение 2 и т.д. – отграничивался сигнальной лентой с этикеткой.

На каждой ПП измерялось не менее 100 деревьев основной посадки и по 100 деревьев на участках каждого дополнения каждой группы. У каждого дерева определялись диаметры на 0,1 высоты ствола ($Д_{0,1Н}$), на высоте груди ($Д_{1,3м}$) и высота ствола (Нств.).

В лабораторных условиях проводилась статистическая обработка результатов измерений биометрических показателей деревьев [Усманов, 2020], определялось общее количество деревьев на площади. Кроме того, подсчитывалось количество и доля от общего количества деревьев основной посадки и деревьев дополнения с подразделением на группы.

Для оценки варьирования показателей применялась шкала значений коэффициентов вариации [Мамаев, 1973; Карасева и др., 2023]

Распределение деревьев по классам роста в высоту выполнялось путем расчета их ранговых коэффициентов и их амплитуды с последующим распределением на 5 ранговых классов [Маслаков, 1984].

Определение ранговых коэффициентов проводилось по установленной формуле

$$R_{ср} = M_{it} / M_{ср.t}, \quad (1)$$

где $R_{ср.}$ – ранговый коэффициент по отношению к среднему; M_{it} – размеры i-го дерева в момент времени t; $M_{ср.t}$ – размеры среднего дерева в насаждении в момент времени t.

Сравнение средних проводилось с помощью t-критерия Стьюдента при $p \leq 0,05$.

Результаты и обсуждение. Показатели размещения и итоговой приживаемости, а также средние биометрические параметры деревьев на ПП к возрасту перевода в земли, на которых расположены леса, приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Характеристики размещения и приживаемости деревьев сосны на ПП

Characteristics of placement and survival of pine trees on SP

№ ПП	Размещение, м	Общее количество высаженных сеянцев, шт.	Сохранилось от общего количества высаженных на момент учета		Количество дополнений
			шт.	%	
1	0,5 х 2,5	8000	5425	67,8	-
2	0,75 х 3,0	4400	2100	47,7	-
3	0,5 х 2,9	6800	6089	89,0	1
4	0,5 х 3,5	5800	4220	72,8	2
5	0,75 х 2,3	5800	4800	82,8	2
6	0,75 х 2,6	5050	2600	51,5	3
7	0,75 х 2,6	5050	3800	75,2	3

Таблица 2

Биометрические характеристики деревьев сосны ПП лесных культур

Biometric characteristics of SP pine trees

№ ПП	Параметры						А, лет
	$Д_{0,1н}$		$Д_{1,3м}$		Нств.		
	(M ± m), см	V, %	(M ± m), см	V, %	(M ± m), см	V, %	
1	4,8 ± 0,14	29,13	2,5 ± 0,09	44,82	195,2 ± 3,60	17,86	8,0
2	6,1 ± 0,31	36,47	4,3 ± 0,33	53,54	198,4 ± 6,16	20,93	8,0
3	3,9 ± 0,19	39,67	2,0 ± 0,40	54,48	193,9 ± 5,75	24,17	7,6
4	3,9 ± 0,15	43,75	1,9 ± 0,08	56,60	186,2 ± 4,36	25,21	7,1
5	4,0 ± 0,16	42,03	1,6 ± 0,14	71,90	177,4 ± 4,35	28,86	7,5
6	3,8 ± 0,27	44,20	1,8 ± 0,26	72,14	163,0 ± 6,03	28,07	7,2
7	3,6 ± 0,28	56,76	1,5 ± 0,29	80,01	159,7 ± 6,34	28,18	6,8

Примечание. M – среднее; m – ошибка среднего; V – коэффициент вариации; A – средневзвешенный возраст

На момент перевода в земли, на которых расположены леса, лесные культуры почти на всех ПП соответствовали установленным требованиям[5] как по количеству, так и по средней высоте деревьев главной породы. Исключение составила ПП 2 (лесные культуры без дополнения), где количество культивируемых деревьев главной породы оказалось ниже требуемого. Вероятнее всего, это объясняется тем, что на данной ПП изначально было высажено всего 4400 штук 2-летних сеянцев сосны, что в 1,8 раза меньше того, что было высажено на ПП 1, где также не проводилось дополнений.

На ПП 3, где было 1 дополнение, соотношение деревьев сосны основной посадки и дополнения было порядка 6:4 (рис. 1). На ПП 4 и 5 (с двумя дополнениями) соотношение деревьев основной посадки и общей доли деревьев дополнения составило 3:7 и 6:4 соответственно. На ПП 6 и 7 (с тремя дополнениями) это соотношение было 5:5 и 3:7 соответственно. Очевидно, что важными факторами оказываются количество дополнений и их длительность.

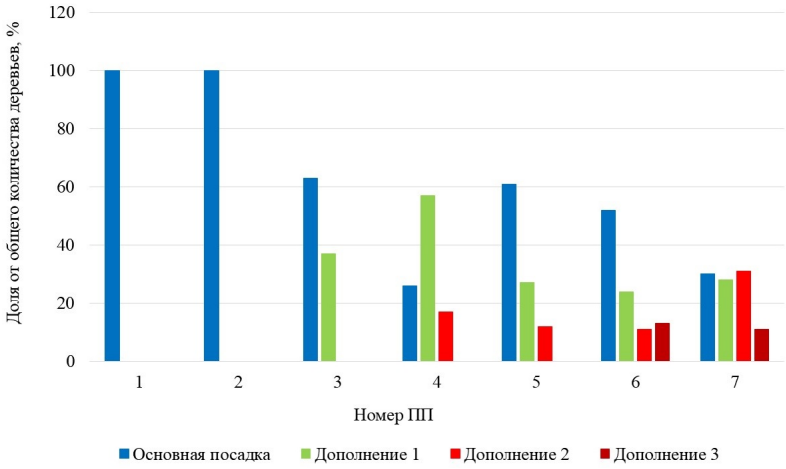


Рис. 1. Распределение деревьев на ПП по категориям
Fig. 1. Distribution of trees on the SP by categories

[5] Правила лесовосстановления, формы, состава, порядка согласования проекта лесовосстановления, оснований для отказа в его согласовании, а также требований к формату в электронной форме проекта лесовосстановления от 29 декабря 2021 г. № 1024.

Анализ биометрических показателей (табл. 2) позволил установить, что у деревьев на ПП лесных культур, где проводились дополнения, существенно (при $p \leq 0,05$) снижается средняя величина $Д_{0,1Н}$, $Д_{1,3м}$ и Нств. по сравнению с деревьями на ПП, где дополнение не проводилось.

Кроме того, в результате дополнительных посадок произошло изменение среднего возраста лесных культур. Особенно это заметно на ПП 4 (2 дополнения), ПП 6 и 7(3 дополнения): большая доля деревьев в этих культурах оказалась представлена деревьями дополнения, которые на 1-3 года моложе деревьев основной посадки.

Уровень изменчивости [Мамаев, 1973] для $Д_{0,1Н}$ оказался (независимо от наличия дополнений) в диапазоне от повышенного до очень высокого. В свою очередь, для $Д_{1,3м}$ уровень изменчивости на всех ПП оказался очень высоким.

Соответственно, на ПП продолжаются процессы дифференциации деревьев по высоте ствола. Уровень изменчивости по высоте на ПП 1 и 2 (без дополнений) оценивается как средний. На ПП 3-7 (1-3 дополнения) уровень изменчивости по высоте характеризуется как повышенный.

Следует отметить, что независимо от наличия или отсутствия дополнений высота стволов деревьев демонстрирует более низкий уровень изменчивости по сравнению с их диаметрами. По всей видимости, процессы дифференциации по высоте к возрасту перевода уже менее выражены, в отличие от дифференциации по толщине ствола [Dlugosiewicz et al., 2019; Ng'andwe et al., 2019; Trouillier et al, 2020]. Наличие деревьев разных возрастов, и соответственно, разных размеров и обеспечивает значительный размах варьирования показателей, прежде всего, высоты ствола (рис. 2).

В целом лесные культуры с дополнениями уже относятся к одновозрастным, в отличие от культур на ПП 1 и 2 (дополнение отсутствовало), которые, как и должно быть, являются абсолютно одновозрастными.

Анализ распределения всех деревьев сосны на ПП (по показателю, имеющему наименьшее варьирование из всех рассмотренных) позволил установить определенные различия между лесными культурами, созданными без дополнения, и теми, где оно неоднократно проводилось. Установлено, что (табл. 3) на ПП 1 и 2 (дополнение отсутствует) и на ПП 3 (1 дополнение) распределение деревьев по высоте было близко к нормальному, что свидетельствует о стабилизации дифференциации деревьев по высоте в данных лесных культурах.

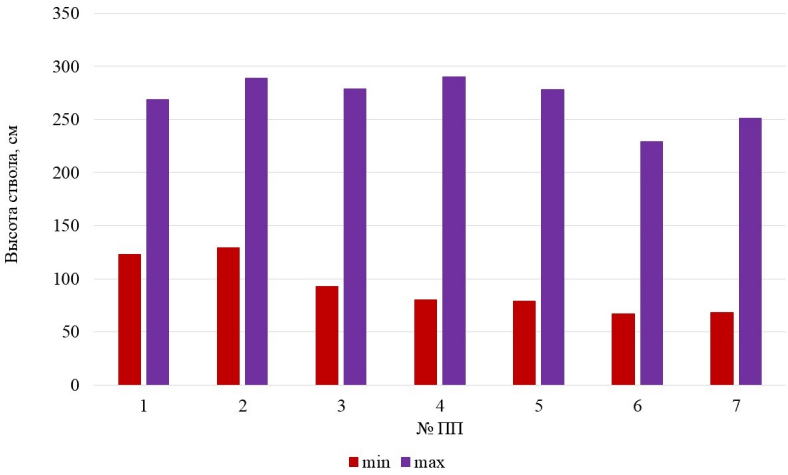


Рис. 2. Размах варьирования высоты ствола деревьев на ПП
Fig. 2. Range of tree trunk height variation in the SP

Таблица 3

Показатели распределения деревьев сосны по высоте ствола

Indicators of distribution of pine trees by trunk height

	Показатель		
	As ± m_{ax}	Ex ±m_{ex}	АРК
1	0,380 ± 0,2487	-0,357 ± 0,4926	0,862
2	0,143 ± 0,3366	-0,505 ± 0,6619	0,859
3	0,475 ± 0,3190	0,260 ± 0,6283	1,011
4	-0,896 ± 0,3757	1,075 ± 0,6283	1,154
5	-1,194 ± 0,4757	1,275 ± 0,6283	1,242
6	-1,262 ± 0,3039	-1,517 ± 0,5993	1,507
7	-1,310 ± 0,6160	1,888 ± 0,6883	1,680

Примечание. As – асимметрия; m_{ax} – ошибка асимметрии; Ex – эксцесс; m_{ex} – ошибка эксцесса; АРК – амплитуда редукционных чисел

На ПП 4-6 (2 и 3 дополнения), напротив, распределение деревьев сосны по высоте ствола заметно отличалось от характеристик нормального распределения. Это является свидетельством продолжения активной диф-

ференциации деревьев по высоте. Высокая левосторонняя асимметрия распределения на ПП определяется наличием большого количества деревьев дополнения, более молодых, чем деревья основной посадки, и, соответственно, имеющих более низкую высоту.

О подобном различии в распределении деревьев по высоте ствола на ПП лесных культур без дополнений и с дополнений свидетельствует и амплитуда ранговых коэффициентов (АРК). По мере увеличения количества дополнений возрастает и величина АРК, что также указывает на увеличение размаха варьирования по величине ствола.

Соответственно, все вышеуказанное определяет характер распределения деревьев сосны по ранговым классам высоты ствола (рис. 3).

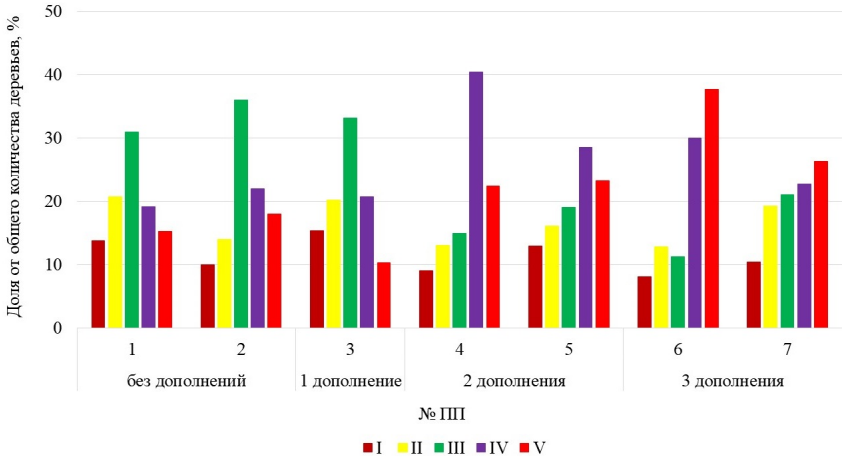


Рис. 3. Распределение деревьев сосны на ПП по ранговым классам высоты
Fig. 3. Distribution of pine trees on the SP by rank height classes

Установленные особенности распределения деревьев сосны на ПП лесных культур, где проводились дополнения, особенно дважды или трижды, указывают на то, что в данном случае формирование структурно-функциональной организации искусственных древостоев сосны имеет значительное сходство с тем, что наблюдается в естественных молодняках [Ермакова, 2023; Astrat et al., 2020].

Заключение. Таким образом, результаты наших исследований показывают, что дополнения лесных культур являются серьезным фактором, зна-

чительно снижающим их средние биометрические показатели. К возрасту перевода в категорию земель, на которых расположены леса, лесные культуры сосны, в которых не проводилось дополнений, демонстрируют определенную стабилизацию деревьев по высоте. В отличие от них, лесные культуры сосны, где проводились дополнения, сохраняют повышенную вариабельность деревьев по высоте, подобную той, что наблюдается в естественных молодняках. По возрастной структуре лесные культуры сосны с дополнениями уже не являются абсолютно одновозрастными, а переходят в категорию одновозрастных молодняков с регулярным размещением деревьев. Соответственно, необходимые лесохозяйственные мероприятия, связанные с формированием структурно-функциональной организации таких молодняков, должны, на наш взгляд, более ориентироваться на требования, предъявляемые к естественным молоднякам, чем к искусственным.

Успешное создание лесных культур, позволяющее в дальнейшем сохранить абсолютную одновозрастность и характерное формирование структурно-функциональной организации искусственных древостоев, в данных условиях, на наш взгляд, возможно только при высаживании не менее 8-10 тыс. 2-летних сеянцев на 1 га, т.е. создании культур повышенной густоты.

Сведения о финансировании. Работа выполнена в рамках Государственного задания ФГБУН Ботанический сад УрО РАН (регистрационный номер 1022040300042-6-1.6.19;1.6.14;4.1.2).

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Гаврилова О.И. Грязькин А.В., Кабонен А.В., Щукин П.О., Суханов Ю.В. Современные проблемы лесовосстановления в России и оценки его качества // DIGITAL. 2021. № 3. С. 8-16.

Гаврилова О.И., Грязькин А.В., Молостовкин М.Д., Пак К.А. Сравнительные результаты производства лесных культур сосны на задернённых вырубках // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2023. № 1 (57). С. 88–98. DOI:10.25686/2306-2827.2023.1.88.

Гладинов А.Н., Коновалова Е.В., Содбоева С.Ч. Сравнительные результаты использования сеянцев сосны обыкновенной с открытой и закрытой корневой системой при искусственном лесовосстановлении в условиях Западного Забайкалья // Успехи современного естествознания. 2021. № 11. С. 7-12.

Горчаковский П.Л. Растительность // Урал и Приуралье. М., 1968. С. 211-218.

Елисеев И.А., Бунькова Н.П. Формирование древесной растительности на различных видах сельскохозяйственных угодий в условиях южной тайги // Леса России и хозяйство в них. 2024. № 1 (88). С. 75-82.

Ермакова М.В. Формирование структурно-функциональной организации молодняков сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) смешанного искусственно-естественного происхождения в условиях сосняков ягодникового и разнотравного Среднего Урала // Лесотехнический журнал. 2023. Т. 13, № 2 (50). С. 43-58. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.2/3.

Карасева М.А., Мухортов Д.И., Лежнин К.Т. Изменчивость показателей роста семенного потомства сосны кедровой сибирской местной репродукции в Марийском Заволжье // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2023. № 1 (57). С. 73-87. DOI: 10.25686/2306-2827.2023.1.73.

Мамаев С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений (на примере семейства Pinaceae). М.: Наука, 1973. 284 с.

Маслаков Е.Л. Формирование сосновых молодняков М.: Лесн. пром-сть, 1984. 166 с.

Методика полевых работ по таксации леса на постоянных пробных площадях в рамках реализации инновационного проекта государственного значения «Углерод в экосистемах: мониторинг». Консорциум № 4. Версия 1.0. М., 2023. 32 с.

Огиевский В.В., Хиров А.А. Обследование и исследование лесных культур. М.: Лесн. пром-сть, 1964. 49 с.

Пак К.А., Гаврилова О.И., Грязькин А.В. Сохранность лесных культур сосны в условиях Северной Карелии // Природообустройство. 2024. № 4. С. 141-149. DOI: 10/26897/1997-6011-2024-4-141-149.

Перепечина Ю.И. Хозяйственно-лесорастительное районирование лесов лесостепи южного Зауралья (на примере Курганской области) // ИВУЗ. Лесной журнал. 2011. № 2. С. 40-45.

Проказин Н.Е., Бартенев И.М., Казаков В.И., Лобанова Е.Н. Особенности роста сеянцев сосны при лесовосстановлении горельников в лесостепной зоне // Лесотехнический журнал. 2017. № 2. С. 91-96. DOI: 10.12737/article_5967e9ddbc1144.25242725.

Смагин А.Ю., Приходько О.Ю., Ортиков Р.Х. Состояние лесных культур в Кербинском лесничестве Хабаровского края // Аграрный вестник Приморья. 2021. № 2(22). С. 82-85.

Сунгурова Н.Р. Дрочкова А.А. Биометрические характеристики посадочного материала как тест-показатель успешности культур *Pinus sylvestris* L. // ИВУЗ. Лесной журнал. 2021. № 4. С. 107-116. DOI: 10.374482/05636-1036-2021-4-107-116.

Турчина Т.А., Банникова О.А. Создание лесных культур сосны крымской (*Pinus pallasiana* D. Don) на бугристых песках в степной зоне России. // ИВУЗ. Лесной журнал. 2023. № 4. С. 76-92. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-4-76-92.

Тырченкова И.В. Особенности лесовосстановления на вырубках и гарях в Сомовском лесничестве Воронежской области // Лесотехнический журнал. 2017. № 3. С. 157-166. DOI: 10.12737/article_59c225837f7385.12703017.

Усманов Р.Р. Статистическая обработка данных агрономических исследований в программе «STATISTICA»: учеб.-метод. пособие. М., 2020. 177 с. DOI: 10/34677/2020.004.

Astrat Z., Eid T., Gobbaken T., Negas M. Modelling and quantifying tree biometric prosperities of dry Afromontane forests of south-central Ethiopia // Trees. 2020. Vol. 34. P. 1411-1426. DOI: 10.1007/s00468-020-02012-8.

Dlugosiewicz J., Zając S., Wysocka-Fijorek E. Evaluation of the natural and artificial regeneration of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the forest district Nowa Dęba // Forest Research Papers. 2019. Vol. 80, iss. 2. P. 105-106. DOI: 10.2478/frp-2019-0009.

Ng'andwe P., Chungu D., Yambaymba A.M., Chilamambe A. Modeling the height-diameter relationship of planed *Pinus kesiya* in Zambia // Forest Ecology and Management. 2019. Vol. 447. P. 1-11. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.05.051.

Trouillier M., van der Maten-Theunissen M., Scharnweber T., Wilmking M. A unifying concept for growth trends of trees and forests – the “Potential natural forest” // Frontiers in Forests and Global Change. 2020. Vol. 3. Art. no. 581334. DOI: 10.3389/ffgc.2020.581334.

References

Astrat Z., Eid T., Gobbaken T., Negas M. Modelling and quantifying tree biometric prosperities of dry Afromontane forests of south-central Ethiopia. *Trees*, 2020, vol. 34, pp. 1411-1426. DOI: 10.1007/s00468-020-02012-8.

Dlugosiewicz J., Zając S., Wysocka-Fijorek E. Evaluation of the natural and artificial regeneration of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the forest district Nowa Dęba. *Forest Research Papers*, 2019, vol. 80, iss. 2, pp. 105-106. DOI: 10.2478/frp-2019-0009.

Eliseev I.A., Bunkova N.P. Formation of woody vegetation on various types of agricultural land in the conditions of the southern taiga subzone. *Forest of Russia and economy in them*, 2024, no. 1 (88), pp. 75-82. DOI: 10.51318/FRET.2023.88.1.007. (In Russ.)

Ermakova M.V. Formation of the structural and functional organization of young stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) of mixed artificial and natural origin in the condition of berry pine forests of and forb pine forests of the Middle Urals. *Forestry Engineering Journal*, 2023, vol. 2, no. 2 (50), pp. 43-58. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.2/3. (In Russ.)

Gavrilova O.I., Griazkin A.V., Kabonen A.V., Shukin P.O., Suhkanov Yu. V. Actual problems of reforestation in Russia and its quality assessment. *DIGITAL*, 2021, no. 3, pp. 8-16. (In Russ.)

Gavrilova O.I., Gryazkin A.V., Molostovkin M.D., Pak K.A. Comparative results of the production of pine forest crops in turf clearings. *Bulletin of the Volga State Technological University. Series. Forest. Ecology. Nature management*, 2023, no. 1 (57), pp. 88–98. (In Russ.)

Gladinov A.N., Konovalova E.V., Sodboeva S.C. Results of a comparative analysis of the use of Scottal pine seedlings with open and closed root system under artificial forest recovery in the conditions of Western Transbaicalie. *Advances in current natural sciences*, 2021, no. 11, pp. 7-12. (In Russ.)

Gorchakovski P.L. Vegetation. *Urals and the Urals region*. Moscow, 1968, pp. 211-218. (In Russ.)

Karaseva M.A., Mukhortov D.I., Lezhnin K.T. Variability of growth indices of Siberian stone pine seed progeny of local reproduction in Mary Trans-Volga region. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management*, 2023, no. 1 (57), pp. 73–87. (In Russ.). DOI: 10.25686/2306-2827.2023.1.73. (In Russ.)

Mamaev S.A. Forms of intraspecific variability of woody plants (using the Pinaceae family as an example). Moscow: Science, 1973. 284 p. (In Russ.)

Maslakov E. L. Formation of pine young stands. Moscow: Forest industry, 1984. 166 p. (In Russ.)

Methodology for field work on forest taxation on permanent trial plots as part of the implementation of an innovative project of national importance "Carbon in ecosystems: monitoring." Consortium No. 4. Version 1.0. Moscow, 2023. 32 p. (In Russ.)

Ng'andwe Ph., Chungu D., Yambaymba A.M., Chilamambe A. Modeling the height-diameter relationship of planed *Pinus kesiya* in Zambia. *Forest Ecology and Management*, 2019, vol. 447, pp. 1-11. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.05.051.

Ogievski V.V, Khirov A.A. Survey and research of forest crops. Moscow: Forest industry, 1964. 49 p. (In Russ.)

Pak K.A., Gavrilova O.I., Gryazkin A.V. Preservation of pine forest crops in the conditions of North Karelia. *Prirodoobustrojstvo*, 2024, no. 4, pp. 141-149. DOI: 10.26897/1997-6011-2024-4-141-149. (In Russ.)

Perepechina Yu.I. Economic and Forest-growing Zoning of Forests of Southern Trans-Ural Forest-steppe (by Example of Kurgan Area). *Forestry Engineering Journal*, 2011, no. 2, pp. 40-45. (In Russ.)

Prokazin N.E., Bartenev I.M., Kazakov V.I., Lobanova E.N. Peculiarities of the growth of pine seedlings in reforestation of burned forests in the forest-steppe zone. *Forestry Engineering Journal*, 2017, no. 2, pp. 91-96. DOI: 10.12737/article_5967e9ddbc1144.25242725. (In Russ.)

Smagin A.Yu., Prikhodko O.Yu., Ortikov R.Kh. State of forest crops in Kerbin forestry of Khabarovsk region. *Agrarian Bulletin of Primorye*, 2021, no. 2 (22), pp. 82-85. (In Russ.)

Sungurova N.R., Drochkova A.A. Biometric parameters of planting material as a test indicator of success of *Pinus silvestris* L. *Russian Forestry Journal*, 2021, no. 4, pp. 107-116. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-107-116. (In Russ.)

Trouillier M., van der Maten-Theunissen M., Scharnweber T., Wilmking M. A unifying concept for growth trends of trees and forests – the "Potential natural forest". *Frontiers in Forests and Global Change*, 2020, vol. 3, art. no. 581334. DOI:10.3389/ffgc.2020.581334.

Turchina T.A., Bannikova O.A. Creation of Forest Cultures of Crimean Pine (*Pinus pallasiana* D. Don) on the Hilly Sands in the Steppe Zone of Russia. *Russian Forestry Journal*, 2023, no. 4, pp. 76–92. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-4-76-92. (In Russ.)

Tyrchenkova I.V. Features of reforestation on clearings and burnt-out areas in Somovskoe forestry of the Voronezh region. *Russian Forestry Journal*, 2018, no. 3, pp. 157-166. DOI: 10.12737/aricle_59c225837f7385.12703017. (In Russ.)

Usmanov R.R. Statistical processing of agronomic research data in the program «STATISTICA»: textbook. Moscow, 2020. 177 p. DOI: 10/34677/2020.004. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 28.01.2025

Ермакова М.В. Влияние дополнений на формирование структуры лесных культур сосны в Курганской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 335–349. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.335-349

Объект исследований – 8-летние лесные культуры сосны на вырубках в зеленомошном типе леса на территории Западно-Сибирского подтаежно-лесостепного района. Цель исследований – изучение особенностей структурно-функциональной организации лесных культур сосны с различным количеством дополнений на момент перевода их в категорию земель, на которых расположены леса. Исследования на пробных площадях лесных культур проводились по общепринятым методикам с учетом современных методических требований с закладкой площадок размером 50х50 м по трансекте. Деревья дополнения подразделялись на группы по годам посадки. Установлено, что в лесных культурах с дополнениями существенно снижаются средние показатели диаметров и высоты ствола по сравнению с площадями, где дополнение не проводилось, но в целом они соответствовали установленным требованиям как по количеству, так и по средней высоте деревьев главной породы. Показано, что

в результате дополнительных посадок произошло снижение среднего возраста лесных культур сосны на 0,4–1,2 года. Присутствие деревьев разных возрастов и разных размеров в результате дополнения определяет значительный размах варьирования по высоте ствола. Установлено, что при отсутствии дополнений или однократном дополнении распределение деревьев по высоте близко к нормальному. При наличии нескольких дополнений распределение деревьев сосны по высоте ствола заметно отличается от нормального. Лесные культуры сосны с дополнениями можно классифицировать как одновозрастные молодняки с регулярным размещением деревьев.

Ключевые слова: лесные культуры сосны, дополнения лесных культур, возраст культур.

Ermakova M.V. Influence of additional landings on the formation of the structure of pine forest cultures in the Kurgan region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 335–349 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.335-349

The object of the research is 8-year-old pine forest cultures in clearings in the true mosses type of forest in the territory of the West Siberian subtaiga-forest-steppe region. The aim of the research is to study the features of the structural and functional organization of pine forest plantations with different numbers of additional landings at the time of their transfer to the category of lands on which forests are located. The studies on the sample plots of forest plantations were carried out according to generally accepted methods, taking into account modern methodological requirements, with the laying out of sites measuring 50x50 m transect. The trees were additionally divided into groups by year of planting. It was found that in forest plantations with additional landings, the average diameters and heights of the trunks were significantly reduced compared to areas where additional landings were not made, but, in general, they met the established requirements, both in terms of the number and average height of trees of the main species. It has been shown that as a result of additional landings, the average age of pine forest plantations has decreased by 0.4–1.2 years. The presence of trees of different ages and sizes, as a result of the additional landings, determines a significant range of variation in trunk height. It has been established that in the absence of additional landings or a single additional planting, the distribution of trees by height is close to normal. In the presence of several additional landings, the distribution of pine trees by trunk height differs significantly from normal. Pine forest cultures with additional landings can be classified as single-aged young stands with regular placement of trees.

Keywords: pine forest plantations, forest additional landings, forest plantations age.

ЕРМАКОВА Мария Викторовна – ведущий научный сотрудник Ботанического сада Уральского отделения Российской Академии Наук, доктор сельскохозяйственных наук, ORCID: 0000-0002-9894-6587. SPIN-код: 6184-2190.

620144, ул. 8 Марта, д. 202а, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: M58_07@mail.ru

ERMAKOVA Maria V. – DSc (Agricultural), Leading Research Scientist, Botanical Garden of Ural Branch of the RAS. ORCID: 0000-0002-9894-6587. SPIN-code 6184-2190.

620144. 8 Marta str. 202a. Ekaterinburg. Russia. E-mail: M58_07@mail.ru

УДК 630*1

С.А. Корчагов, О.А. Конюшатов, Д.В. Беляков, М.М. Андронова

ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ФЛОРИСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В КЛЮЧЕВЫХ БИОТОПАХ

Введение. Видовое богатство биоценоза является его ключевой характеристикой и фундаментальным показателем разнообразия сообщества. Этот показатель лежит в основе многих экологических моделей и стратегий сохранения естественных мест обитания [Мэгарран, 1992].

Простейшей оценкой численности видов в биоценозе является их зарегистрированное исследователем количество. Однако неизвестно, насколько этот результат далек от «истинной ценности» [Gaston, Blackburn, 2000]. Фактически учтенное количество видов не всегда является лучшим показателем реальной ценности местообитания [Reese et al., 2014]. Одной из причин может быть неравномерное и предвзятое пространственное и временное распределение усилий при сборе данных о флористических списках [Peterson et al., 1998; Soberón et al., 2007]. Следовательно, такой показатель не всегда может быть использован для проведения объективного анализа растительного сообщества. Для оценки полноты проведенных флористических исследований (верификации) может использоваться метод, основанный на определении наличия единичных или охраняемых видов растений в лесных сообществах.

Единично встречающиеся растения вносят определенный вклад в таксономическое богатство территорий, однако вопрос их функционального значения в поддержании экосистем в настоящее время остается открытым. Он особенно актуален для богатых видами экосистем, где вероятна высокая представленность растений, и, предположительно, функционирование экосистем защищено от потери видов [Mouillot et al., 2013].

Определенный интерес ученых в области охраны природы, в контексте рассматриваемого вопроса, вызывают исследования в ключевых биотопах – в сохраняемых при рубках лесных участках с высокой представленностью флористического разнообразия, а также наличием единично встречающихся (синглетонов) и нуждающихся в охране видов растений [Паутов и др., 2010; Корчагов и др., 2021; Беляков и др., 2024a, b].

Цель работы заключалась в верификации результатов флористических исследований в ключевых биотопах с избыточным увлажнением.

Материалы и методика исследования. Флористическое исследование проводили в границах Вологодской области, в ключевых биотопах с избыточным увлажнением (участки леса вдоль временных водных объектов и заболоченные участки леса в бессточных понижениях), сохраненных при сплошных рубках 4–5-летней давности.

В ходе полевого исследования в ключевых биотопах и камеральной обработки экспериментальных данных использовали ОСТ 56-69-83 «Площади пробные лесоустроительные. Метод закладки», «Правила санитарной безопасности в лесах», утвержденные Постановлением Правительства Российской Федерации № 2047 от 09.12.2020 г., а также учебные материалы и справочные данные [Мелехов, 1999; Лесотаксационный…, 2012; Шайхутдинова, 2019]. Детальное изучение флористического разнообразия травянистых растений, мхов и лишайников выполняли с учетом методических указаний Н.И. Орловой [1997] и Л.Е. Астрологовой [Астрологова, Гортинский, 1980]. При этом в границах каждого ключевого биотопа закладывали по 15 учетных площадок размером 1×1 м каждая. Напочвенный покров на площадках учитывали по ярусам, для каждого из которых определяли обилие по шкале О. Друде.

При верификации полученных данных для определения полноты зарегистрированных флористических списков по формуле (1) вычисляли коэффициент Тюринга, показывающий долю обнаруженных в ходе исследования единичных видов (синглетонов) в ключевом биотопе.

$$C = 1 - \frac{f_1}{S}, \quad (1)$$

где f_1 – численность синглетонов, шт.; S – общая численность учтенных видов, шт.

Расчетную численность произрастающих в ключевом биотопе видов (T, шт.), определяли по формуле (2).

$$T = \frac{S}{C}, \quad (2)$$

где S – численность учтенных видов, шт.; C – коэффициента Тюринга.

Как отмечает В.Д. Леонтьев [2008], экстраполяция общего числа видов с помощью коэффициента Тюринга дает довольно точные результаты.

Результаты исследования. В ключевых биотопах произрастают спелые насаждения I-IV класса бонитета с запасом стволовой древесины 145–386 м^3/га. Древостои представлены видами, характерными для условий таежной зоны, однако на первом участке в составе древостоя встречается липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill.) – вид, произрастающий на северной границе своего ареала (табл. 1).

Таблица 1

Краткая таксационная характеристика древостоя в ключевых биотопах

Brief taxation characteristics of the forest stand in key biotopes

Номер объекта	Площадь биотопа, га	Состав древостоя	Бонитет	Полнота	Запас, $м^3$/га	Класс категория санитарного состояния
1	1,30	6Б2Е2Ос ед. Олс, Лп	I	0,43	145	II,8 сильно ослабленные
2	1,70	5Е3С2Б+Олс	IV	0,98	318	II,7 сильно ослабленные
3	1,50	1 ярус: 7Б3Ос+С	III	0,52	131	II,0 ослабленные
		2 ярус: 9Е1Олс		0,46	58	
4	1,30	8С2Е+Б	III	0,65	179	III,3 сильно ослабленные
5	2,20	6Е3Ос1Б +Олс, ед. С	III	0,95	386	III,0 сильно ослабленные

Древостои в ключевых биотопах характеризуются как ослабленные и сильно ослабленные. На всех объектах наблюдаются ветровальные явления, преимущественно по границе биотопа и вырубки. Доля ветровальных деревьев по запасу составляет от 0,5 до 21,4%. При этом в биотопах не выявлено признаков массового поражения древостоев фито- и энтомовредителями, то есть спустя 4-5 лет после рубки древостои в сохраненных биотопах в целом характеризуются как устойчивые.

При исследовании флористического разнообразия в границах ключевых биотопов зафиксировано 22-34 вида, включая травянистые растения, мхи и лишайники. Среди них отмечены синглетоны (1-8 видов), представленные единичными экземплярами, в том числе: грушанка круглолистная (*Pyrola rotundifolia* L.), марьянник луговой (*Melampyrum pratense* L.), седмичник европейский (*Trientalis europaea* L.), гилокомиум блестящий (*Hylocomium splendens* (Hedw.) Bruch et al.), сабельник болотный (*Comarum palustre* L.), сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria* L.), телиптерис болотный (*Thelypteris palustris* Schott), багульник болотный (*Ledum palustre* L.) и др. (табл. 2).

Таблица 2

Фактическая и расчетная численность травянистых растений, лишайников и мхов в ключевых биотопах

Actual and estimated abundance of herbaceous plants, lichens and mosses in key biotopes

Номер объекта	Фактическая численность учтенных в ключевом биотопе видов, шт.		Коэффициент Тюринга, C	Расчетная численность видов, T, шт.
	всего, S	в том числе синглетонов, f_1		
1	22	3	0,86	26
2	34	1	0,97	35
3	28	2	0,93	30
4	29	5	0,83	35
5	30	8	0,73	41

Значения коэффициентов Тюринга показывают, что видовое разнообразие травянистых растений, лишайников и мхов в ключевых биотопах учтено на 73-97%. Учитывая, что приемлемый уровень должен составлять 70-80%, для всех ключевых биотопов полнота обследования является достаточной для интерпретации соответствующих исследовательских выводов. В то же время верификация данных показывает, что потенциальная численность произрастающих видов на участках может быть выше в сравнении с фактической.

Особый интерес при флористических обследованиях территорий вызывают виды, нуждающиеся в охране. Анализ Красной книги Вологодской области [2004] показал, что из 178 лесных видов две трети приурочены к переувлажненным участкам. Этот факт предопределяет актуальность рассматриваемого вопроса в ключевых биотопах с наличием временного и постоянного увлажнения.

В ходе исследования в границах первого, второго и третьего опытного объекта обнаружены виды, занесенные в региональную Красную книгу [Красная…, 2004], и в перечень таксонов с охранным статусом Международного союза охраны природы (МСОП) [IUCN, 2001] (табл. 3).

Некера перистая (*Neckera pennata* Hedw.) является индикатором старовозрастных и биологически ценных лесных сообществ. Вид занесен в Красные книги Вологодской и других областей [Красная…, 2011, 2023; Перечень…, 2025], а также в Красную книгу мохообразных Европы [Red…, 1995]. В обследованных биотопах мох обнаружен на стволах старовозрастной осины.

Таблица 3

Растения из Красной книги Вологодской области, обнаруженные при обследовании ключевых биотопов

Plants from the Red Book of the Vologda Region, discovered during the survey of key biotopes

Наименование вида	Статус	Категория МСОП
Некера перистая (*Neckera pennata* Hedw.)	2. Уязвимый вид	3/NT. Потенциально уязвимый вид
Камышевник укореняющийся (*Scirpus radicans* Schkuhr)	3 b. Редкий вид, находящийся на границе ареала, со стабильной численностью и с нормальной возрастной структурой ценопопуляций, способный к самоподдержанию, которому в настоящее время не грозит исчезновение, но по ряду причин он может оказаться «уязвимым»	3/LC. Вид, требующий внимания
Страусник обыкновенный *Matteuccia struthiopteris* (L.) Tod.	Вид, требующий дальнейшего изучения и биологического контроля	-

Камышевник укореняющийся (*Scirpus radicans* Schkuhr), кроме Вологодской области, охраняется в республике Карелия [Красная…, 2020]. Вид обнаружен в ключевом биотопе с временным избыточным увлажнением – на участке леса вдоль временного водного объекта.

Страусник обыкновенный (*Matteuccia struthiopteris* (L.) Tod.) включён в Красные книги Брянской, Волгоградской [Красная…, 2006, 2016] и ряда других областей. В Красной книге Вологодской области папоротник отнесен к числу видов, требующих дальнейшего изучения и контроля. При исследованиях вид обнаружен в ключевом биотопе с постоянным избыточным увлажнением – на заболоченном участке леса в бессточном понижении.

Рассчитанный коэффициент Тюринга составил 0,91-0,94, что является значительным показателем и свидетельствует о достаточном уровне исследования разнообразия охраняемых видов в ключевых биотопах (табл. 4).

Выполненные расчеты также показывают, что в границах каждого ключевого биотопа потенциально возможно произрастание еще двух видов растений с охранным статусом.

Таблица 4

Оценка полноты учета видов растений, занесенных в Красную книгу Вологодской области

Assessment of the completeness of the accounting of plant species listed in the Red Book of the Vologda Region

Номер объекта	Численность учтенных в ключевом биотопе видов, шт.		Коэффициент Тюринга, C	Расчетная численность видов, T, шт.
	всего, S	в том числе занесенных в Красную книгу f_1		
1	22	2	0,91	24
2	34	2	0,94	36
3	28	2	0,93	30

Заключение. Флористическое разнообразие играет важную роль в поддержании экологического равновесия и обеспечении устойчивости жизни на планете. Однако множество лесных видов растений и их мест произрастания подвергаются воздействию вследствие рубки лесов. Для таежных ценозов, где на значительных площадях ведутся сплошные рубки, сохранение видового разнообразия растений является актуальной задачей.

Одним из возможных путей поддержания флористического разнообразия является сохранение при заготовке древесины ключевых биотопов – локальных лесных участков с высокой представленностью растений, а также наличием единично встречающихся (синглетонов) и нуждающихся в охране видов. Выполнение длительных научных исследований на таких участках позволяет сделать выводы об устойчивости сохраненных ценозов и изменчивости видового разнообразия в динамике. Тщательно верифицированные результаты флористических исследований, в случае их достаточности и полноты, могут служить основанием для формулировки научно обоснованных выводов и практических рекомендаций.

Возможным вариантом верификации результатов флористических исследований может выступать расчет коэффициента Тюринга и потенциальной численности растений, основанный на подсчете фактического количества обнаруженных при полевом обследовании видов и числа видов, единично встречающихся на определенной территории.

Результаты выполненного обследования ключевых биотопов с избыточным увлажнением, а также верификация полученных данных свидетельствуют о полноте обследования участков и обоснованности полученных данных.

Вклад авторов. Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи. В сборе и обработке полевого материала принимал участие инженер-исследователь Вологодской региональной лаборатории ФБУ «СевНИИЛХ» Евдокимов И.В.

Патенты. При подготовке публикации использованы материалы, включенные в базу данных «Флористическое разнообразие на лесном стационарном объекте «Горка» в Вологодской области» (Свидетельство о государственной регистрации базы данных реестра интеллектуальной собственности (РИД) № 2024623564 от 14.08.2024 г. (авторы: С.А. Корчагов, О.А. Конюшатов, Д.В. Беляков, И.В. Евдокимов).

Сведения о финансировании исследования. Публикация подготовлена по результатам работ, выполненных в рамках госзадания ФБУ «СевНИИЛХ» на проведение прикладных научных исследований по теме «Разработка технологии заготовки древесины с сохранением биологического разнообразия в таежной зоне Европейской части России». Регистрационный номер: 125021202004-5.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Астрологова Л.Е., Гортинский Г.Б. Методические указания к проведению полевой практики по ботанике. Архангельск: АЛТИ, 1980. 32 с.

Беляков Д.В., Конюшатов О.А., Корчагов С.А., Грибов С.Е. Сохранение видового разнообразия растений при лесопользовании в ключевых биотопах Вологодской области // ИВУЗ. Лесной журнал. 2024a. № 2. С. 189-200.

Беляков Д.В., Корчагов С.А., Конюшатов О.А., Андронова М.М. Оценка видового разнообразия флоры ключевых биотопов на сплошных вырубках в Вологодской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024b. Вып. 248. С. 89-102.

Корчагов С.А., Хамитов Р.С., Грибов С.Е., Иванова М.Г., Беляков Д.В. Лесоводственно-хозяйственная оценка объектов биологического разнообразия в таежной зоне // ИВУЗ. Лесной журнал. 2021. № 6. С. 110-120.

Красная книга Брянской области. Брянск, 2016. 432 с.

Красная книга Волгоградской области. Т. 2: Растения и грибы / под ред. В.С. Новикова, Г.Ю. Клинковой. Волгоград: Волгоград, 2006. 236 с.

Красная книга Вологодской области. Том 2. Растения и грибы / отв. ред. Конечная Г.Ю., Суслова Т.А. Вологда: Русь, 2004. 360 с.

Красная книга Республики Карелия. Белгород: КОНСТАНТА, 2020. 448 с.

Красная книга Рязанской области. Рязань: Голос губернии, 2011. 626 с.

Красная книга Томской области. Элиста: Процвет, 2023. 580 с.

Леонтьев Д.В. Флористический анализ в микологии. Харьков, 2008. 110 с.

Лесотаксационный справочник по северо-востоку европейской части Российской Федерации: (нормативные материалы для Ненецкого автономного округа, Архангельской, Вологодской областей и Республики Коми) / Фед. агентство

лесного хоз-ва, ФБУ «Сев. науч.-исслед. ин-т лесного хоз-ва». Архангельск: Правда Севера, 2012. 672 с.

Мелехов И.С. Лесоведение: учебник для студентов высших учебных заведений. М.: МГУЛ, 1999. 398 с.

Мэгарран Э. Биологическое разнообразие и его измерение / пер. с англ. Матвеевой Н.В., под ред. Чернова Ю.И. М.: Мир, 1992. 161 с.

Орлова Н.И. Определитель высших растений Вологодской области. Вологда: Русь, 1997. 264 с.

Паутов Ю.А., Конюшатов О.А., Яницкая Т.О. К практике сохранения биологического разнообразия при лесосечных работах // Устойчивое лесопользование. 2010. № 1 (23). С. 22-27.

Перечень видов мохообразных, занесенных в Красную книгу Мурманской области // Красная книга Мурманской области. URL: https://portal.kgilc.ru /redbook/?q=Bryophytes (дата обращения: 22.04.2025).

Шайхутдинова А.А. Методы оценки биоразнообразия. Методические указания. Оренбург: ОГУ, 2019. 37 с.

IUCN 2001. Red List Categories and Criteria version 3.1. URL: http://www. iucnredlist.org/technical-documents/categories-and-criteria/2001-categories-criteria (дата обращения: 22.04.2025).

Gaston K.J., Blackburn T.M. Pattern and process in macroecology. Malden, MA, USA: Blackwell Science, 2000. 377 p. DOI: 10.1002/9780470999592.

Mouillot D., Bellwood D.R., Baraloto Ch., Chave J., Galzin R., Harmelin-Vivien M., Kulbicki M., Lavergne S., Lavorel S., Mouquet N., Paine C.E.T., Renaud J. Rare Specific Support Vulnerable Functions in High-Diversity Ecosystems // PLoS Biol. 2013. Vol. 11, iss. 5. Art. no. e1001569. DOI: 10.1371/journal.pbio.1001569.

Peterson A.R., Navarro-Sigüenza A.G., Benitez-Diaz H. The need for continued scientific collecting: a geographic analysis of Mexican bird specimens // Ibis. 1998. Vol. 140, iss. 2. P. 288-294.

Red Data Book of European Bryophytes. Trindheim, 1995. 291 p.

Reese G.C., Wilson K.R., Flather C.H. Performance of species estimators across assemblage types and survey parameters// Global Ecology and Biogeography. 2014. No. 23. P. 585-594.

Soberón J., Jimenéz R., Golubov J., Koleff P. Assessing completeness of biodiversity databases at different spatial scales // Ecography. 2007. No. 30. P. 152-160. DOI: 10.1111/j.2006.0906-7590.04627.x.

References

Astrologova L.E., Gortinsky G.B. Methodical instructions for conducting field practice in botany. Arkhangelsk: ALTI, 1980. 32 p. (In Russ.)

Belyakov D.V., Konyushatov O.A., Korchagov S.A., Gribov S.E. Conservation of plant species diversity during forest management in key biotopes of the Vologda Region. *IVUZ. Forestry journal*, 2024a, no. 2, pp. 189-200. (In Russ.)

Belyakov D.V., Korchagov S.A., Konyushatov O.A., Andronova M.M. Assessment of species diversity of the flora of key biotopes in clear-cut areas in the Vologda Region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2024b, iss. 248, pp. 89-102. (In Russ.)

Forest inventory reference book for the north-east of the European part of the Russian Federation: (regulatory materials for the Nenets Autonomous Okrug, Arkhangelsk, Vologda regions and the Komi Republic) / Federal Forestry Agency, Federal Budgetary Institution "Northern Scientific Research Institute of Forestry. Arkhangelsk: Pravda Severa, 2012. 672 p. (In Russ.)

Gaston K.J., Blackburn T.M. Pattern and process in macroecology. Malden, MA, USA: Blackwell Science, 2000. 377 p. DOI: 10.1002/9780470999592.

IUCN 2001. Red List Categories and Criteria version 3.1. URL: http://www.iucnredlist.org/technical-documents/categories-and-criteria/2001-categories-criteria (accessed: 22.04.2025).

Korchagov S.A., Khamitov R.S., Gribov S.E., Ivanova M.G., Belyakov D.V. Silvicultural and economic assessment of biological diversity objects in the taiga zone. *IVUZ. Forestry journal*, 2021, no. 6, pp. 110-120. (In Russ.)

Leontyev D.V. Floristic analysis in mycology. Kharkov, 2008. 110 p. (In Russ.)

The list of bryophytes included to the Red Book of the Murmansk Region. *The Red Book of the Murmansk Region*. URL: https://portal.kgilc.ru/redbook/?q=Bryophytes (accessed: 22.04.2025). (In Russ.)

Megarran E. Biological diversity and its measurement / transl. from English by Matveeva N.V., ed. by Chernov Yu.I. Moscow: Mir, 1992. 161 p. (In Russ.)

Melekhov I.S. Forestry: eextbook for students of higher educational institutions. Moscow: MGUL, 1999. 398 p. (In Russ.)

Mouillot D., Bellwood D.R., Baraloto Ch., Chave J., Galzin R., Harmelin-Vivien M., Kulbicki M., Lavergne S., Lavorel S., Mouquet N., Paine C.E.T., Renaud J. Rare Specific Support Vulnerable Functions in High-Diversity Ecosystems. *PLoS Biol.*, 2013, vol. 11, iss. 5, art. no. e1001569. DOI: 10.1371/journal.pbio.1001569.

Orlova N.I. Guide of higher plants of the Vologda region. Vologda: Rus, 1997. 264 p. (In Russ.)

Pautov Yu.A., Konyushatov O.A., Yanitskaya T.O. On the practice of preserving biological diversity during logging operations. *Sustainable forest management*, 2010, no. 1 (23), pp. 22-27. (In Russ.)

Peterson A.R., Navarro-Sigüenza A.G., Benitez-Diaz H. The need for continued scientific collecting: a geographic analysis of Mexican bird specimens. *Ibis*, 1998, vol. 140, iss. 2, pp. 288-294.

The Red Book of the Bryansk Region. Bryansk, 2016. 432 p. (In Russ.)

The Red Book of the Republic of Karelia. Belgorod: KONSTANTA, 2020. 448 p. (In Russ.)

The Red Book of the Volgograd Region. Vol. 2: Plants and fungi / ed. by V.S. Novikov, G. Yu. Klinkova. Volgograd: Volgograd, 2006. 236 p. (In Russ.)

The Red Book of the Vologda Region. Vol. 2: Plants and fungi / ed. Konechnaya G.Yu., Suslova T.A. Vologda: Rus, 2004. 360 p. (In Russ.)

Red Data Book of European Bryophytes. Trindheim, 1995. 291 p.

The Red Data Book of the Ryazan Region. Ryazan: Golos gubernii, 2011. 626 p. (In Russ.)

The Red Data Book of the Tomsk Region. Elista: Protsvet, 2023. 580 p. (In Russ.)

Reese G.C., Wilson K.R., Flather C.H. Performance of species estimators across assemblage types and survey parameters. *Global Ecology and Biogeography*, 2014, no. 23, pp. 585-594.

Shaikhutdinova A.A. Methods for assessing biodiversity. Methodological guidelines. Orenburg: OSU, 2019. 37 p. (In Russ.)

Soberón J., Jimenéz R., Golubov J., Koleff P. Assessing completeness of biodiversity databases at different spatial scales. *Ecography*, 2007, no, 30, pp. 152-160. DOI: 10.1111/j.2006.0906-7590.04627.x.

Материал поступил в редакцию 28.04.2025

Корчагов С.А., Конюшатов О.А., Беляков Д.В., Андронова М.М. Верификация результатов флористических исследований в ключевых биотопах // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 350–362. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.350-362

Сокращение биоразнообразия в процессе лесопользования и решение вопроса сохранения видов имеют особую актуальность для лесов таежной зоны, где на значительных площадях ведутся сплошные рубки. Одним из возможных путей сохранения видов в процессе заготовки древесины является выделение ключевых биотопов – участков с высокой представленностью флористического разнообразия, а также наличием единично встречающихся и нуждающихся в охране видов растений. Цель работы заключалась в верификации результатов флористических исследований, проведенных в сохраненных при сплошных рубках 4-5-летней давности ключевых биотопах с временным и постоянным избыточным увлажнением. В качестве инструментов при верификации результатов флористических исследований использованы коэффициент Тюринга и расчетный показатель потенциальной численности растений, определение которых основано на подсчете фактического количества обнаруженных при полевом обследовании видов растений, а также численности единично встречающихся и охраняемых видов в границах

участков. Тщательно верифицированные результаты флористических исследований, в случае их достаточности и полноты, могут служить основанием для формулировки научно обоснованных выводов и практических рекомендаций. При исследовании флористического разнообразия в ключевых биотопах с избыточным увлажнением зафиксировано 22-34 вида, включая травянистые растения, мхи и лишайники, среди которых 1-8 видов являются синглетонами, представленными единичными экземплярами, а 3 вида имеют охранный статус. Рассчитанные коэффициенты Тюринга, составляющие от 0,73 до 0,97, показывают, что для всех ключевых биотопов полнота обследования является достаточной для интерпретации соответствующих исследовательских выводов. При этом потенциальная численность произрастающих видов на участках может быть несколько выше в сравнении с их фактически учтенным количеством.

Ключевые слова: флористическое разнообразие, ключевой биотоп, охраняемые виды, верификация, коэффициент Тюринга, потенциальная численность видов.

Korchagov S.A., Konyushatov O.A., Belyakov D.V., Andronova M.M. Verification of the results of floristic studies in key biotopes. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 350–362 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.350-362

Reduction of biodiversity in the process of forest management and the solution of the issue of species conservation are of particular relevance for the forests of the taiga zone, where clear-cutting is carried out over large areas. One of the possible ways to conserve species in the process of timber harvesting is the identification of key biotopes – areas with a high representation of floristic diversity, as well as the presence of single plant species in need of protection. The aim of the work was to verify the results of floristic studies conducted in key biotopes with temporary and permanent excess moisture preserved during clear-cutting 4-5 years ago. The Turing coefficient and the estimated indicator of the potential number of plants were used as tools for verifying the results of floristic studies, the determination of which is based on the calculation of the actual number of plant species found during the field survey, as well as the number of single and protected species within the boundaries of the sites. Carefully verified results of floristic studies, if sufficient and complete, can serve as a basis for formulating scientifically substantiated conclusions and practical recommendations. During the study of floristic diversity in key biotopes with excessive moisture 22-34 species were recorded, including herbaceous plants, mosses and lichens, among which 1-8 species are singletons, represented by single specimens, and 3 species have a protected status. The calculated Turing coefficients, ranging from 0.73 to 0.97, show that for all key biotopes the completeness of the survey is sufficient for interpreting the corresponding research conclusions. At the same time, the potential

number of species growing in the areas may be somewhat higher compared to their actually recorded number.

Keywords: floristic diversity, key biotope, protected species, verification, Turing coefficient, potential number of species.

КОРЧАГОВ Сергей Анатольевич – профессор, главный научный сотрудник, заведующий Вологодской региональной лабораторией ФБУ «СевНИИЛХ», доктор сельскохозяйственных наук. ORCID: 0000-0001-5492-9550. Scopus AuthorID: 57221951065. WoS ResearchID: HLQ-4954-2023.

160032, ул. Горького, д. 83А, г. Вологда, Россия. E-mail: korchagov@sevniilh-arh.ru

KORCHAGOV Sergey A. – DSC (Agricultural), Professor, Chief Researcher, Head of the Vologda Regional Laboratory of the Federal State Budgetary Institution "Northern Research Institute of Forestry". ORCID: 0000-0001-5492-9550. Scopus AuthorID: 57221951065. WoS ResearchID: HLQ-4954-2023.

160032. Gorkogo str. 83A. Vologda. Russia. E-mail: korchagov@sevniilh-arh.ru

КОНЮШАТОВ Олег Алексеевич – доцент, научный сотрудник Вологодской региональной лаборатории ФБУ «СевНИИЛХ», кандидат сельскохозяйственных наук. ORCID: 0009-0007-9819-4219. WoS ResearchID: JEZ-9194-2023.

160032, ул. Горького, д. 83А, г. Вологда, Россия. E-mail: konyushatov_oa@sevniilh-arh.ru

KONYUSHATOV Oleg A. – PhD (Agricultural) Associate Professor, Researcher, Vologda Regional Laboratory of the Northern Research Institute of Forestry. ORCID: 0009-0007-9819-4219. WoS ResearchID: JEZ-9194-2023.

160032. Gorkogo st. 83A. Vologda. Russia. E-mail: kon-yushatov_oa@sevniilh-arh.ru.

БЕЛЯКОВ ДМИТРИЙ Владимирович – инженер-исследователь Вологодской региональной лаборатории ФБУ «СевНИИЛХ», кандидат сельскохозяйственных наук. WoS ResearchID: AAX-2399-2021. ORCID: 0000-0003-2588-1492.

160032, ул. Горького, д. 83А, г. Вологда, Россия. E-mail: belya-kovdima09111995@yandex.ru

BELYAKOV Dmitry V. – PhD (Agricultural), Research Engineer, Vologda Regional Laboratory of the Northern Research Institute of Forestry. WoS ResearchID: AAX-2399-2021. ORCID: 0000-0003-2588-1492.

160032. Gorkogo str. 83A. Vologda. Russia. E-mail: belyakovdima09111995@yandex.ru

АНДРОНОВА Марина Михайловна – доцент, начальник кафедры экономики, управления и инженерно-технического обеспечения деятельности уголовно-исполнительной системы Вологодского института права и экономики ФСИН России, доктор сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 7601-7753. ORCID: 0000-0002-9654-8913.

160002, ул. Щетинина, д. 2, г. Вологда, Россия. E-mail: mary1969@yandex.ru

ANDRONOVA Marina M. – DSc (Agricultural), Associate Professor, Head of the Department of Economics, Management and Engineering and Technical Support for the Activities of the Penitentiary System, Vologda Institute of Law and Economics of the Federal Penitentiary Service of Russia. SPIN-code: 7601-7753. ORCID: 0000 0002-9654-8913.

160002. Shchetinina str. 2. Vologda. Russia. E-mail: mary1969@yandex.ru

УДК 631.5; 631.4; 502; 631.7

Н.Ф. Гибадуллин, А.С. Дурова, Е.И. Семенова, И.И. Гайфуллин

ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ И СОСТАВА МИКРОБНЫХ СООБЩЕСТВ, ФОРМИРУЮЩИХСЯ В ПРОЦЕССЕ ЗАРАСТАНИЯ ЛЕСОМ БЫВШИХ ПАХОТНЫХ ПОЧВ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН

Введение. По данным государственного реестра на 1 января 2023 г. земельный фонд Республики Татарстан в административных границах составляет 6 783,7 тысячи гектаров [Гродзинский, 1991; Свистова, Парамонов, 2011]. На земли лесного фонда приходится 1 219,1 тыс. га, или 18% от общей площади республики, на земли сельскохозяйственного назначения – 4 618,2 тыс. га, или 68% от общей площади республики. В составе земель сельскохозяйственного назначения сельскохозяйственные угодья составляют 98,08% (4529,6 тыс. га), из них пашня – 75,2% (3406,8 тыс. га), многолетние насаждения – 1,01% (46,2 тыс. га), сенокосы – 2,9% (143,2 тыс. га), пастбища и залежи – 20,6% (933,4 тыс. га).

Сельскохозяйственная освоенность территории республики составляет 68,1%, облесенность – 18%, распаханность сельскохозяйственных угодий – 76%. Облесенность пашни в регионе составляет 3,4% при необходимом минимальном значении 4,7% [Мохамед, 1988; Гродзинский, 1991; Свистова, Парамонов, 2011]. Высокая степень распаханности территории при низкой облесенности пашни, до 3,7% (при оптимуме 5-7%), и низком показателе лесистости региона служит предпосылкой развития активных процессов водно-ветровой эрозии [Звягинцев и др., 2005].

Опыт зарубежных и отечественных исследователей показывает, что устойчивый агроландшафт может быть сформирован в том случае, если 75% в нем занимают пашни, леса и луга в равных долях (на каждый из этих компонентов приходится по 25%) [Звягинцев и др., 2005; Toledo et al., 2025]. Потенциал республики для повышения лесистости региона по оценке природоохранных общественных организаций составляют участки сельскохозяйственных земель, заросшие древесно-кустарниковой растительностью возрастом свыше 20 лет (342 тыс. га) и возрастом свыше 3 лет (1818 тыс. га), итого 2160 тыс. га, или 32% от общей площади региона [Гримберг, 2015].

Чтобы понять, как меняется состояние почв при произрастании на бывших пахотных почвах культур сосны, на территории Республики Та-

тарстан (в местах распространения различных типов почв) были заложены почвенные разрезы. В ходе исследования были отобраны образцы почв для дальнейшего исследования численности и состава микромицетов, а также бактериологического состава микрофлоры почв Республики Татарстан.

Материалы и методика исследования. Цель работы – изучение влияния культур сосны на численность и состав микромицетов, а также бактериологический состав микрофлоры бывших пахотных почв Республики Татарстан.

Объектом исследования был комплекс микромицетов и бактерий почв, формирующихся после зарастания сельскохозяйственных угодий смешанными и чистыми древостоями сосны в Республике Татарстан.

Географическое расположение точек отбора проб охватывает несколько районов Татарстана: Бугульминский, Пестречинский, Высокогорский и Столбищенский. Эти территории находятся в лесостепной зоне Восточно-Европейской равнины, для которой характерен умеренно континентальный климат.

Предположительно, сосновые насаждения оказывают положительное влияние на восстановление плодородия бывших пахотных почв, увеличивая численность полезных микроорганизмов и снижая численность патогенов.

Результаты исследования.

На изученной территории преобладают чернозёмы и серые лесные почвы, которые формируются в условиях умеренного увлажнения и тёплого лета. Растительность типична для лесостепной зоны, с чередованием лиственных лесов (берёза, осина, дуб) и степных участков. В более влажных местах (например, у рек) растут ольха и ива.

Климат в районах отбора проб характеризуется как умеренно континентальный, с холодной зимой, тёплым летом и достаточным увлажнением. Эти условия способствуют формированию богатых почв и разнообразной растительности, что подтверждается данными о микробиологическом составе почв [Казеев и др., 2003].

Пробы почвы отбирали из бывшего пахотного и нижележащего горизонта в различных точках республики (табл. 1).

Далее приведены различия климатических условий по районам:

- Бугульминский район: континентальный климат с холодной зимой и жарким летом, малое количество осадков (около 450–500 мм в год);
- Пестречинский район: расположен ближе к Казани, климат немного мягче, больше осадков (до 550–600 мм в год);

• Высокогорский район: здесь холоднее, чем в других районах, снежный покров более устойчивый;

• Столбищенский район: климат близок к характерному для Пестречинского района, но количество осадков меньше.

Таблица 1

Точки отбора проб

Sampling points

Адрес		Координаты	Номера точек в эксперименте
Лаишевский р-н, рядом с с. Матюшенское		55.667293, 49.076157	5,7,8,
Лаишевский р-н, с. Столбище, культуры		55.652059, 49.142540	10,11
Лаишевский р-н, с. Песчаные-Ковали		55.637979, 49.114478	13
Высокогорский р-н, с. Берёзка		56.041838, 49.274522	6,12
Пестречинский р-н, с. Шигали		55.829028, 49.557128	2
Бугульминский р-н	(участок 1)	54.402660, 52.785696	1,3
Бугульминский р-н, с. Петровка, Петровское уч. лесничество	(участок 2)	54.402660, 52.785696	4,9

Определение численности групп микроорганизмов проводилось при помощи посева разведениями почвенных взвесей на плотных питательных средах:

1) аммонифицирующих – на мясо-пептонный агар (МПА);

2) амилолитических – на крахмал-аммиачный агар (КАА);

3) актиномицетов – на КАА;

4) микроскопических грибов (микромицетов) – на среду Чапека (pH 4,5) [Методы…,1991].

Видовую идентификацию опасных для здоровья людей микромицетов (патогенов) проводили по определителям [Билай, Пидопличко, 1970; Методы…, 1991].

Кислотность почвы исследовали потенциометрически в водной и соляной вытяжке [Сатаева, 1990]. Статистическая обработка исходных данных осуществлялась в Программе STATISTICA 10 и по общепринятым методикам [Доспехов, 1985].

Основные результаты. В научных источниках данных о влиянии растений на микробное сообщество почвы крайне мало. Известно, что объем прижизненных растительных выделений в почву (ризоэкссудатов) достигает 30-40% от общего объема продуктов фотосинтеза. Состав корневых экссудатов

значительно варьирует у растений разных семейств. Так, у злаков преобладают сахара и органические кислоты, у бобовых – аминокислоты и амиды. Известны разрозненные работы по влиянию растений на состав и структуру почвенного микробного сообщества [Гродзинский, 1991; Свистова, Парамонов, 2011], однако анализа направленности и степени выраженности эффекта растений разных семейств в доступной нам литературе мы не обнаружили.

Важным полифункциональным компонентом почвенной биоты является группа почвенных микроскопических грибов. Они принимают существенное участие в дистракционных процессах, протекающих в подзолистых почвах. Почвенные микромицеты доминируют среди микроорганизмов-целлюлозолитиков и составляют 60-90% целлюлозоразрушающей микробной биоты. В научной литературе имеются отдельные сообщения о выявлении в почве под монокультурами растений токсичных и опасных для человека видов грибов [Tedersoo et al., 2014]. Аналогичные закономерности наблюдаются и при преобразовании лесов в сельхозугодья в субтропическом Китае [Qin et al., 2014]. Роль микоризных ассоциаций в этих процессах подчеркивается в обзоре [Ye et al., 2025].

Результаты проведенных исследований по изучению влияния культур сосны на численность и состав микромицетов на бывших пахотных территориях Республики Татарстан представлены в табл. 2.

Таблица 2

Микромицеты. Состав и количество патогенов.

Micromycetes. Composition and number of pathogens

Точка		Описание	Микромицеты. Состав и патогены
1	1.1 В под.	Бугульминский район, ЕВ с/х, прикопка №2	*Penicillium* sp. – плесень *Rhizopus* sp. – плесень *Aspergillus* sp. – плесень
	1.2 А пах.		*Penicillium* sp. – плесень *Rhizopus* sp. – плесень ***Rhizoctonia* sp. – патоген (2*10^4 КОЕ)**
2	2.1 А под.	Пестречинский район, л/к	*Penicillium* sp. – плесень *Aspergillus* sp. – плесень *Trichoderma* sp. – почв. деструктор ***Botrytis* sp. – патоген (1*10^3 КОЕ)**
	2.2. А пах.		*Penicillium* sp. – плесень *Aspergillus* sp. – плесень ***Botrytis* sp. – патоген (2,1*10^4 КОЕ)** ***Verticillium* sp. – патоген (2,5*10^4 КОЕ)** ***Fusarium sporotrichoides* – патоген (7,5*10^3 КОЕ)** ***Fusarium culmorum* – патоген (5*10^3 КОЕ)**

Продолжение табл. 2

Точка		Описание	Микромицеты. Состав и патогены
3	3.1 А под.	Бугульминский район, ЕВ с/х участок №2, прикопка №2 у леса	*Penicillium* sp. – плесень *Humicola* sp. – почв. деструктор ***Pythium* sp. – патоген (5*10^3 КОЕ)**
	3.2 А пах.		*Penicillium* sp. – плесень *Humicola* sp. – почв. деструктор ***Pythium* sp. – патоген(3*10^3 КОЕ)**
4	4.1 В под., суглин.	Бугульминский район, ЕВ с/х участок №2, прикопка №1 у поля	*Penicillium* sp. – плесень
	4.2 В под., глина		*Penicillium* sp. – плесень
5	5.1 A_1 песч.	Столбищенское, л/к проба №2	*Penicillium* sp. – плесень *Mucor* sp. – плесень ***Bipolaris* sp. – патоген (1*10^3 КОЕ)** ***Pythium* sp. – патоген (1*10^3 КОЕ)**
	5.2 А пах.		*Penicillium* sp. – плесень *Rhizopus* sp. – плесень ***Botrytis* sp. – патоген (1,9*10^4 КОЕ)** ***Bipolaris* sp. – патоген (3*10^3 КОЕ)**
6	6.1 В под.	Высокогорский район, проба №1	микромицетов не обнаружено
	6.2 А пах.		*Penicillium* sp. – плесень *Trichoderma* sp. – почв. деструктор *Rhizopus* sp. – плесень *Monocillium* sp. – плесень ***Bipolaris* sp. – патоген 1*10^3 КОЕ** ***Pythium* sp. – патоген 1*10^3 КОЕ**
7	7.1 А пах.	Столбищенское, ЕВ с/х, у вышки	*Penicillium* sp. – плесень ***Ascochyta* sp. – патоген (4*10^3 КОЕ)** ***Botrytis* sp. – патоген (1*10^3 КОЕ)** ***Fusarium sporotrichoides* – патоген (2*10^3 КОЕ)** ***Fusarium graminearum* – патоген (1*10^3 КОЕ)**
	7.2 В под.		*Penicillium* sp. – плесень ***Ascochyta* sp. – патоген (1*10^3 КОЕ)** ***Fusarium sporotrichoides* – патоген (1*10^3 КОЕ)**
8	8.1 А0 А1, середина рядов	Столбищенское, л/к, бывшее с/х, у вышки	***Bipolaris* sp. – патоген (1*10^3 КОЕ)** ***Alternatia* sp. – патоген (1*10^3 КОЕ)**
	8.2 А1 песч.		*Penicillium* sp. – плесень ***Bipolaris* sp. – патоген (2,6*10^4 КОЕ)** ***Alternatia* sp. – патоген (2,4*10^4 КОЕ)**
	8.3 АВ под.		*Penicillium* sp. – плесень *Trichoderma* sp. – почв. деструктор

Окончание табл. 2

Точка		Описание	Микромицеты. Состав и патогены
9	9.1 А пах., поле	Бугульминский район, ЕВ с/х, участок №1, прикопка № 1	*Penicillium* sp. – плесень
	9.2 В под.		*Penicillium* sp. – плесень
10	10.1 А пах. у вышки	Столбищенское, ЕВ с/х, проба №1	*Penicillium* sp. – плесень *Aspergillus* sp. – плесень *Humicola* sp. почв. деструктор ***Botrytis* sp. – патоген (1*10^3 КОЕ)** ***Bipolaris* sp. – патоген (2,6*10^5 КОЕ)**
	10.2 А под. у леса		*Penicillium* sp. – плесень *Humicola* sp. – почв. деструктор
11	11.1 АВ под.	Столбищенское. л/к, бывшее с/х, проба №2, возле дороги	*Penicillium* sp. – плесень *Aspergillus* sp. – плесень ***Alternatia* sp. – патоген (3*10^3 КОЕ)**
	11.2 А0, А1		*Penicillium* sp. – плесень *Aspergillus* sp. – плесень ***Botrytis* sp. – патоген (2*10^4 КОЕ)** ***Alternatia* sp. – патоген (2,5*10^4 КОЕ)**
12	12.1 А пах.	Высокогорский район, с/х, проба № 2	*Penicillium* sp. – плесень ***Alternatia* sp. – патоген (2*10^3 КОЕ)**
	12.2 АВ под.		микромицетов не обнаружено
13	13.1 А под., суглин.	Верх., л/к	*Penicillium* sp. – плесень
	13.2 А пах.		*Penicillium* sp. – плесень

Примечание. В таблице использованы следующие сокращения: «под.» – подстилочный горизонт; «пах.» – бывший пахотный горизонт; «с/х» – участок, ранее бывший сельскохозяйственным угодьем; «ЕВ» – естественное возобновление (леса); «л/к» – лесные культуры (искусственное насаждение); «верх.» – верхний почвенный горизонт (обычно А0–А1); «суглин.»/«глина»/«песч.» – гранулометрический состав почвы (суглинистый, глинистый, песчаный). Жирным шрифтом выделены патогены

Таким образом, по результатам проведенных микологических исследований разнообразие почвенных микромицетов в проанализированных образцах почвы насчитывает 16 видов, принадлежащих к одному из трех классов: Zygomycetes, Ascomycetes, Hyphomycetes. Эти цифры свидетельствуют о том, что, несмотря на значительное разнообразие гидротермических и почвенных условий, разнообразие изучаемой почвенной микрофлоры совсем не велико.

Для выявленной нами почвенной биоты характерны многочисленность различных форм мицелия; преобладание пенициллов по численности и видовому разнообразию (5 видов из 16, т. е. около трети от общего количества); единичное присутствие мукоровых грибов и видов из рода Trichoderma. При этом 9 из 16 видов представлены патогенами, наиболее распространенные из них – *Rhizoctonia* sp., *Botrytis* sp., *Bipolaris* sp., *Alternatia* sp.

Разнообразие и количество патогенов в анализируемых пробах почвы представлено на рис. 1. Как видно из представленных данных, максимальное количество патогенов обнаружено в бывших пахотных горизонтах (образцы 1.2, 2.2, 5.2, 7.1,10.1). Однако в бывших пахотных горизонтах почв с более тяжелым гранулометрическим составом повышения количества патогенов не отмечено, или их количество не существенно (образцы 3.2, 4.2, 6.2, 8.2, 9.1, 12.1 и 13.2). Предположительно, это связано с тем, что Республика Татарстан расположена в пределах двух природных зон – лесной и лесостепной. Серые лесные почвы являются характерными для физико-географических и биоклиматических условий Республики Татарстан и занимают около 40% площади сельхозугодий [Казеев и др., 2003; Газизуллин, 2005; de Vries, 2012].

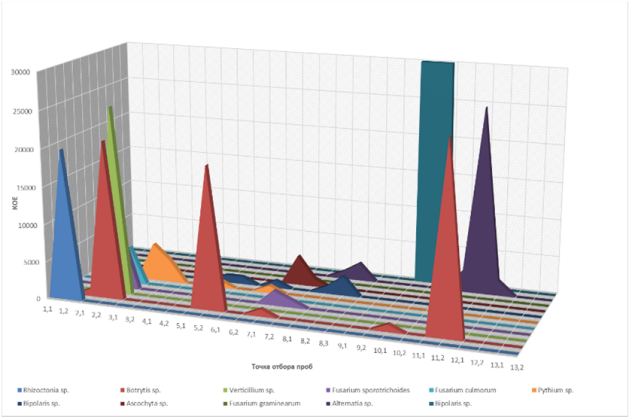


Рис. 1. Разнообразие и количество патогенов в отобранных образцах почв
Fig. 1. Diversity and number of pathogens in the collected soil samples

Общее разнообразие микромицетов также было выше в образцах бывших пахотных почв. Максимально разнообразный микробиом отмечен в

вариантах 2.2, 5.2, 6.2, 7.1,10.1, 11.2, т. е. именно в бывших пахотных горизонтах большинства исследованных участков.

Отмеченная тенденция, основана на значительном улучшении агрохимических характеристик почв, используемых для выращивания сельскохозяйственных культур. Под влиянием внесенных органических и минеральных удобрений, а также под воздействием ранее проводимых мелиоративных мероприятий, положительно влиявших на структуру и уровень плодородия почв, закономерно произошло расширение и усложнение микробного сообщества, что мы смогли пронаблюдать на примере отобранных проб.

Помимо анализа микромицетов в отобранных почвенных образцах были проанализированы структура и численность бактериологического сообщества (результаты представлены в табл. 3).

Микробиологические параметры почв очень чувствительны к изменению внешних условий, в том числе к антропогенному прессингу, но одновременно отличаются высокой вариабельностью в пространстве и изменчивостью во времени [Казеев и др., 2003; Soria et al., 2025]. Полученные в исследовании данные это подтверждают. Для наглядности отразим данные табл. 3 в виде диаграммы (рис. 2).

Некоторые бактерии (*Bacillus* sp.) демонстрируют высокую адаптивность, встречаясь практически во всех точках, в то время как другие (*Pseudomonas* sp.) имеют более ограниченное распространение.

Далее рассмотрим указанные тенденции подробнее. Прежде чем анализировать данные, представленные в табл. 3, следует немного углубиться в понимание особенностей формирования микробного сообщества в почвах.

Биомасса микроорганизмов характеризует состояние почвенных условий в целом, так как трофические цепи внутри почвы формируются под влиянием климата местности, количества и качества органического опада и отпада, степени и направленности антропологического воздействия [Казеев и др., 2003; Звягинцев и др., 2005].

Микроорганизмы, встречающиеся в проанализированных образцах, играют важную роль в экосистемах почвы, способствуя различным процессам, которые поддерживают здоровье и продуктивность почвы. Ниже приводится краткое описание их функций:

• *Bacillus* sp.: эти бактерии участвуют в разложении органических веществ, способствуя минерализации питательных веществ и улучшая структуру почвы. Некоторые виды также обладают антибактериальными свойствами и могут подавлять патогены;

Таблица 3

Бактериологический анализ образцов

Bacteriological analysis of samples

Номер точки	1		2		3	4	5	6	7	8		9	10	11	12		13	
	1.1 B	1.2A	2.1 A	2.2 A	3.1 A	3.2 A	7.1 A	7.2 B	8.1 A	8.2 A1	8,3 AB	9.1 A	7.1 A	7.2 B	8.1 A 0	8.2 A1	8,3 AB	9.1 A	9.2 B	10.1 A	10.2 A	11.1 AB	11.2 A0	12.1 A	12.2 AB	13.1 A	13.2
Bacillus sp.	$3{,}1*10^6$	$3{,}5*10^7$	$1{,}5*10^6$	$8*10^7$	$4*10^7$	$5{,}2*10^7$	$3{,}1*10^6$	$1{,}1*10^6$	$1{,}4*10^8$	$2{,}7*10^8$	$9{,}9*10^7$	$2*10^6$	$3{,}1*10^6$	$1{,}1*10^6$	$1{,}4*10^8$	$2{,}7*10^8$	$9{,}9*10^7$	$2*10^6$		$3{,}8*10^7$	$5{,}4*10^6$	$1{,}2*10^8$	$2{,}8*10^7$	$3{,}4*10^6$	$3{,}2*10^6$		$1{,}3*10^8$
Pseudomonas sp.	$4{,}6*10^7$	$1{,}8*10^8$	$9{,}2*10^7$	$1{,}2*10^7$					$9{,}3*10^7$			$9{,}3*10^7$															
Azotobacter sp.	$2{,}9*10^8$	$3{,}3*10^8$	$2{,}9*10^8$	$3{,}3*10^8$				$6{,}5*10^6$									$6{,}5*10^6$						$6*10^7$	$7{,}9*10^7$	$1*10^5$	$3{,}6*10^8$	$7{,}2*10^6$	
Streptomyces sp.	$2{,}9*10^8$	$2{,}9*10^8$												$1{,}9*10^8$														
Flavo-bacterium sp.		$2{,}8*10^7$																									
Rhizobuim sp.		$1{,}1*10^8$				$1{,}5*10^8$		$2{,}4*10^8$																			
Nitrobacter sp.		$7{,}8*10^7$		$6{,}7*10^7$	$5*10^5$	$8{,}2*10^6$	$2{,}2*10^8$	$1{,}2*10^8$		$1{,}2*10^8$					$2{,}2*10^8$	$1{,}2*10^8$	$1{,}2*10^8$			$5{,}1*10^7$		$5{,}1*10^7$	$2{,}2*10^8$	$1{,}2*10^8$	$6{,}4*10^7$	$2*10^8$	
Azospirillum sp.			$1{,}3*10^7$																								
Nitrosomonas sp.						$4{,}7*10^6$			$4{,}7*10^6$																		
Rhizobuim sp.						$1{,}5*10^8$	$1{,}3*10^8$			$1{,}5*10^8$	$3{,}3*10^8$				$1{,}3*10^8$								$2*10^5$			$2{,}9*10^8$	$1{,}3*10^8$	
Arthrobacter sp.						$8{,}9*10^6$		$6{,}5*10^6$		$8{,}9*10^6$	$1{,}3*10^8$				$6{,}5*10^6$							$7{,}1*10^6$	$1{,}2*10^8$	$8{,}7*10^7$	$1{,}3*10^8$		$1{,}3*10^8$	
Staphylo-coccus sp.						$1{,}3*10^7$			$1{,}3*10^7$			$4{,}3*10^7$										$2{,}5*10^7$						
Strepto-coccus sp.									$4{,}3*10^7$													$1{,}3*10^6$						
Nitrosolobus sp.																						$2{,}4*10^8$						
Прочие актиномицеты	$1{,}5*10^7$		$2{,}4*10^8$		$1{,}6*10^6$	$4{,}8*10^8$	$2{,}7*10^8$	$1{,}2*10^8$	$2{,}9*10^8$	$1{,}6*10^8$	$1{,}6*10^8$	$2{,}5*10^8$	$2{,}7*10^8$	$1{,}2*10^8$	$2{,}9*10^8$	$1{,}6*10^8$	$1{,}6*10^8$	$2{,}5*10^8$	$5{,}4*10^7$		$2{,}3*10^8$	$2{,}3*10^8$	$3{,}7*10^8$	$2{,}5*10^8$	$9{,}4*10^7$	$3*10^8$	$3*10^8$

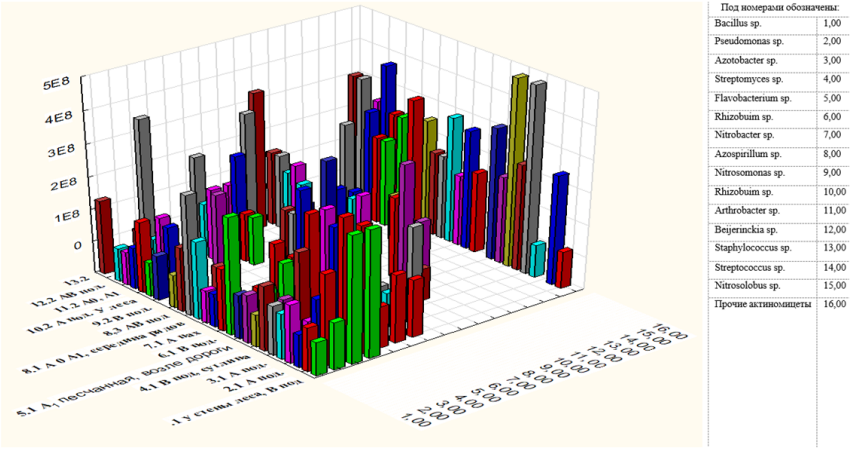


Рис. 2. Бактериологический анализ почв
Fig. 2. Bacteriological analysis of soils

• *Pseudomonas* sp.: эти бактерии известны своей способностью к разложению различных органических веществ и токсинов, а также участвуют в процессе биолизиса. Они могут фиксировать атмосферный азот и производить фитогормоны, способствуя росту растений;

• *Azotobacter* sp.: это свободноживущие бактерии, которые фиксируют атмосферный азот и делают его доступным для растений. Они также участвуют в разложении органических веществ;

• *Streptomyces* sp.: эти актиномицеты играют важную роль в разложении органических веществ. Они могут продуцировать антибиотики, подавляющие рост патогенных микроорганизмов в почве;

• *Flavobacterium* sp.: эти бактерии участвуют в разложении сложных органических веществ и играют роль в углеродном цикле, способствуя минерализации углерода;

• *Rhizobium* sp.: эти бактерии образуют симбиотические отношения с бобовыми растениями, фиксируя атмосферный азот в корнях растений и обогащая почву питательными веществами;

• *Nitrobacter* sp.: эти бактерии участвуют в процессе нитрификации, превращая нитриты в нитраты, которые являются доступными формами азота для растений;

• *Azospirillum* sp.: эти бактерии также фиксируют атмосферный азот и способствуют увеличению роста растений, а также улучшают усвоение ими питательных веществ;

• *Nitrosomonas* sp.: эти бактерии являются первичными нитрификаторами, которые окисляют аммоний до нитритов, участвуя в процессе нитрификации;

• *Arthrobacter* sp.: эти бактерии разлагают сложные органические соединения, способствуя минерализации питательных веществ и улучшая биологическую активность почвы;

• *Beijerinckia* sp.: эти бактерии способны фиксировать атмосферный азот и участвуют в разложении органических веществ, улучшая плодородие почвы;

• *Staphylococcus* sp.: некоторые виды этих бактерий могут быть патогенными, но также участвовать в разложении органических веществ и поддержании микробиологического баланса в почве;

• *Streptococcus* sp.: эти бактерии могут участвовать в разложении органических веществ и поддержании микробиологического баланса в почве;

• *Nitrosolobus* sp.: эти бактерии также участвуют в нитрификации, превращая аммоний в нитриты, что является важным этапом в цикле азота.

Таким образом, перечисленные микроорганизмы выполняют различные функции, включая разложение органических веществ, фиксацию азота, нитрификацию и подавление патогенов, что делает их важными для здоровья и плодородия почвы.

Для того чтобы оценить, как различаются условия в верхнем и бывшем пахотном горизонтах, посчитаем коэффициент корреляции Пирсона (табл. 4, 5). Это позволит оценить, есть ли взаимосвязи между численностью разных микроорганизмов в каждом горизонте. Однако для полного анализа данных недостаточно, поэтому в таблицах приведена корреляция для тех групп, в которых было необходимое количество данных.

По полученным результатам хорошо видна взаимосвязь между некоторыми бактериями. Это, скорее всего, обусловлено влиянием сходных условий и/или участием данных микроорганизмов в одной трофической цепочке. Наиболее сильные взаимосвязи отмечены в верхнем горизонте между *Bacillus* sp. и *Azotobacter* sp. и *Azotobacter* sp.и прочими актиномицетами; в нижнем горизонте – между *Bacillus* sp. и *Azotobacter* sp., а также *Rhizobium* sp. и *Nitrobacter* sp., что, по-видимому, связано с активностью азотного цикла в данном горизонте. Поскольку не все данные соответствуют требованиям, необходимым при расчёте корреляции Пирсона, далее, для уточнения полученных зависимостей, мы применим корреляцию Спирмена (табл. 6, 7).

Таблица 4

Корреляционный анализ по образцам из верхнего горизонта

Correlation analysis for samples from the upper horizon

Микроорганизм 1	Микроорганизм 2	Коэффициент корреляции (r)	Интерпретация
Bacillus sp.	*Pseudomonas* sp.	0,45	Умеренная положительная связь
Bacillus sp.	*Azotobacter* sp.	0,78	Сильная положительная связь
Bacillus sp.	*Streptomyces* sp.	0,32	Слабая положительная связь
Pseudomonas sp.	*Azotobacter* sp.	0,61	Умеренная положительная связь
Pseudomonas sp.	*Streptomyces* sp.	0,28	Слабая положительная связь
Azotobacter sp.	*Streptomyces* sp.	0,67	Умеренная положительная связь
Rhizobium sp.	*Nitrobacter* sp.	0,53	Умеренная положительная связь
Arthrobacter sp.	Прочие актиномицеты	0,71	Сильная положительная связь

Таблица 5

Результаты корреляционного анализа в бывшем пахотном горизонте

Results of correlation analysis in the former arable horizon

Микроорганизм 1	Микроорганизм 2	Коэффициент корреляции (r)	Интерпретация
Bacillus sp.	*Pseudomonas* sp.	0,12	Слабая положительная связь
Bacillus sp.	*Azotobacter* sp.	0,65	Умеренная положительная связь
Bacillus sp.	*Streptomyces* sp.	0,41	Умеренная положительная связь
Pseudomonas sp.	*Azotobacter* sp.	0,34	Слабая положительная связь
Pseudomonas sp.	*Streptomyces* sp.	0,19	Слабая положительная связь
Azotobacter sp.	*Streptomyces* sp.	0,58	Умеренная положительная связь
Rhizobium sp.	*Nitrobacter* sp.	0,62	Умеренная положительная связь
Arthrobacter sp.	Прочие актиномицеты	0,69	Сильная положительная связь

Данный анализ подтвердил ранее выявленные зависимости. В обоих проанализированных горизонтах наблюдается положительная корреляция между микроорганизмами, участвующими в азотном цикле (*Azotobacter* sp., *Rhizobium* sp., *Nitrobacter* sp.), а в верхнем горизонте сильнее выражены связи между микроорганизмами, участвующими в разложении органики (*Streptomyces* sp., прочие актиномицеты).

Таблица 6

Результаты корреляционного анализа Спирмена (верхний горизонт)

Results of Spearman correlation analysis (upper horizon)

Микроорганизм 1	Микроорганизм 2	Коэффициент Спирмена	Интерпретация
Bacillus sp.	*Pseudomonas* sp.	0,45	Умеренная положительная связь
Bacillus sp.	*Azotobacter* sp.	0,78	Сильная положительная связь
Bacillus sp.	*Streptomyces* sp.	0,32	Слабая положительная связь
Bacillus sp.	*Flavobacterium* sp.	0,12	Слабая положительная связь
Pseudomonas sp.	*Azotobacter* sp.	0,61	Умеренная положительная связь
Pseudomonas sp.	*Streptomyces* sp.	0,28	Слабая положительная связь
Azotobacter sp.	*Streptomyces* sp.	0,67	Умеренная положительная связь
Azotobacter sp.	*Flavobacterium* sp.	0,05	Корреляция отсутствует
Rhizobium sp.	*Nitrobacter* sp.	0,53	Умеренная положительная связь
Arthrobacter sp.	Прочие актино-мицеты	0,71	Сильная положительная связь
Nitrosomonas sp.	*Beijerinckia* sp.	0,08	Слабая положительная связь
Staphylococcus sp.	*Streptococcus* sp.	0,03	Корреляция отсутствует

Таблица 7

Результаты корреляционного анализа Спирмена (бывший пахотный горизонт)

Results of Spearman correlation analysis (former arable horizon)

Микроорганизм 1	Микроорганизм 2	Коэффициент Спирмена	Интерпретация
Bacillus sp.	*Pseudomonas* sp.	0,12	Слабая положительная связь
Bacillus sp.	*Azotobacter* sp.	0,65	Умеренная положительная связь
Bacillus sp.	*Streptomyces* sp.	0,41	Умеренная положительная связь
Bacillus sp.	*Flavobacterium* sp.	0,10	Слабая положительная связь
Pseudomonas sp.	*Azotobacter* sp.	0,34	Слабая положительная связь
Pseudomonas sp.	*Streptomyces* sp.	0,19	Слабая положительная связь
Azotobacter sp.	*Streptomyces* sp.	0,58	Умеренная положительная связь
Azotobacter sp.	*Flavobacterium* sp.	0,07	Корреляция отсутствует
Rhizobium sp.	*Nitrobacter* sp.	0,62	Умеренная положительная связь
Arthrobacter sp.	Прочие актино-мицеты	0,69	Сильная положительная связь
Nitrosomonas sp.	*Beijerinckia* sp.	0,06	Корреляция отсутствует
Staphylococcus sp.	*Streptococcus* sp.	0,04	Корреляция отсутствует

Интересно и наличие в нескольких пробах редких микроорганизмов (например, *Flavobacterium* sp., *Nitrosomonas* sp.) однако анализ их роли в микробном сообществе требует дополнительных данных о плодородии и почвенном покрове на изучаемых объектах и будет произведен в следующих статьях по данном объектам.

Обсуждение. Проведенный анализ образцов позволяет разделить все пробы почв на несколько групп:

1. В образцах 1, 2, 3, 6 и 12 отмечено более высокое содержание азотфиксирующих бактерий, что влияет на плодородие почв и указывает на положительную динамику наблюдаемых процессов; наличие актиномицетов говорит об активном разложении органики и, по-видимому, активном процессе гумусообразования;

2. В образцах 4,5,7,8 10 и 11, скорее всего, процессы гумусообразования идут медленнее, чем в вышеописанных образцах. Это связано с обилием *Bacillus* sp. и *Pseudomonas* sp., которые часто встречаются в почвах с умеренным содержанием органического вещества;

3. Не очень понятно, какие процессы можно зафиксировать в пробах 9 и 13, так как там мало микроорганизмов и встречаются редкие виды;

4. Отдельно стоит отметить точки 4 и 6: в них есть горизонты с высокой численностью редких микроорганизмов (*Nitrosolobus* sp., *Beijerinckia* sp.). Это может быть связано с уникальными условиями (например, близость к реке или специфический состав почвы).

По собранным данным легко выявить и различия процессов, происходящих в верхнем и нижележащем горизонтах:

1. В верхних горизонтах микроорганизмов, разлагающих органику, больше, чем в нижнем;

2. Бактерии, участвующие в азотном цикле, чаще встречаются в бывшем пахотном горизонте, что предположительно связано с внесением в него питательных веществ в процессе эксплуатации заброшенной пашни;

3. Увеличение численности микроорганизмов, связанных с азотным циклом (*Nitrobacter* sp., *Nitrosomonas* sp.), отмечено в обоих горизонтах (в верхнем сильнее), что говорит о процессах саморемедиации почвы;

4. В некоторых точках (6, 12) численность микроорганизмов в бывшем пахотном слое близка к таковой в верхнем горизонте, что может свидетельствовать о более активном восстановлении.

Заключение. В ходе исследования состава почвенной биоты мы смогли пронаблюдать картину постепенной саморемедиации бывших пахотных почв

после их исключения из активного сельскохозяйственного пользования. Так, часто встречающиеся в образцах актиномицеты и бактерии, участвующие в азотном цикле, играют ключевую роль в разложении и преобразовании органического вещества. Их высокая численность в верхнем горизонте указывает на активное формирование лесной почвы. Встретились в образцах и более редкие микроорганизмы, например, *Flavobacterium* sp., только в одной пробе (точка 1, бывший пахотный слой). Это может указывать на специфические условия в этой точке (например, повышенная влажность).

Видимо, на заброшенных сельскохозяйственных угодьях в ходе зарастания лесом происходит постепенное восстановление почвенной микрофлоры. Верхний горизонт характеризуется активным разложением органического вещества, в то время как бывший пахотный слой восстанавливает свои функции, связанные с азотным циклом, что важно для формирования устойчивой лесной экосистемы.

Исследование на данный момент продолжается: идет анализ структуры древостоя, закончено определение агрохимических показателей, проанализированных образцов, а также проанализирован состав растительных сообществ на местах отбора проб. Данные, полученные в этих исследованиях, будут проанализированы и лягут в основу следующих статей по данным объектам.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Билай В.И., Пидопличко Н.М. Токсинообразующие микроскопические грибы и вызываемые ими заболевания человека и животных. Киев: Наукова думка, 1970. 299 с.

Газизуллин А.Х. Почвенно-экологические условия формирования лесов Среднего Поволжья. Т. 1: Почвы лесов Среднего Поволжья, их генезис, систематика и лесорастительные свойства. Казань: Школа, 2005. 495 с.

Гримберг А.А. Использование и охрана земельных ресурсов на региональном уровне // Экономика и экология территориальных образований. 2015. №1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-i-ohrana-zemelnyh-resursov-na-re gio nalnom-urovne (дата обращения: 01.03.2025)

Гродзинский А.М. Аллелопатия растений и почвоутомление. Киев: Наукова думка, 1991. 429 с.

Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Колос, 1985. 351 с.

Звягинцев Д.Г., Бабьева И.П., Зенова Г.М. Биология почв. М.: МГУ, 2005. 445 с.

Казеев К.Ш., Колесников С.И., Вальков В.Ф. Биологическая диагностика и индикация почв: методология и методы исследований. Ростов-н/Д: РГУ, 2003. 202 с.

Методы почвенной микробиологии и биохимии / под ред. Д.Г. Звягинцева. М.: МГУ, 1991. 302 с.

Мохамед Х.А. Ассоциативная азотфиксация в ризосфере различия сортов риса: дис. ... канд. биол. наук. М., 1988. 240 с.

Сатаева Л.В. Применение статистических методов к решению некоторых вопросов мониторинга загрязнения почв: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Обнинск, 1990. 277 с.

Свистова И.Д., Парамонов А.Ю. Влияние лекарственных растений на микромицеты и биологическую активность почвы // Проблемы медицинской микологии. 2011. Т. 13, №3. С. 50-53.

Qin H., Wang H., Strong P.J., Li Y., Xu Q., Wu Q. Rapid soil fungal community response to intensive management in a bamboo forest developed from rice paddies // Soil Biology and Biochemistry. 2014. Vol. 68. P. 177-184. DOI: 10.1016/j.soilbio.2013.09.031.

Soria R., de la Rosa J.M., González-Pérez J.A., Bastida, F., Ortega R., Miralles I. Assessing organic amendments for improving SOM dynamics and microbial functioning in degraded quarry soils // Environmental Technology and Innovation. 2025. Vol. 39. Art. no. 104323. DOI: 10.1016/j.eti.2025.104323.

Tedersoo L., Bahram M., Põlme S., Kõljalg U., Yorou N.S., Wijesundera R., Villarreal Ruiz L., Vasco-Palacios A.M., Quang Thu P., Suija A., Smith M.E., Sharp C., Saluveer E., Saitta A., Rosas M., Riit T., Ratkowsky D., Pritsch K., Põldmaa K., Piepenbring M., Phosri C., Peterson M., Parts K., Pärtel K., Otsing E., Nouhra E., Njouonkou A.L., Nilsson R.H., Morgado L.N., Mayor J., May T.W., Majuakim L., Lodge D.J., See Lee S., Larsson K.-H., Kohout P., Hosaka K., Hiiesalu I., Henkel T.W., Harend H., Guo L., Greslebin A., Grelet G., Geml J., Gates G., Dunstan W., Dunk C., Drenkhan R., Dearnaley J., De Kesel A., Dang Tan, Chen Xin, Buegger F., Brearley F.Q., Bonito G., Anslan S., Abell S., Abarenkov K. Global diversity and geography of soil fungi // Science. 2014. Vol. 346, iss. 6213. Art. no. 1256688. DOI: 10.1126/science.1256688.

Toledo S., Martínez Pastur G., Rodríguez Souilla J., Peri P.L. Effects of land use types and spatial heterogeneity on soil microbial biomass and activity along environmental gradients in Austral ecosystems // Total Environment Microbiology. 2025. Vol. 1, iss. 3. Art. no. 100028. DOI: 10.1016/j.temicr.2025.100028.

Ye Z., Zhu X., Zhi Y., Lin H., Wu J. The role of forest mushroom systems in soil fungal community reorganization and carbon fractions // Agriculture, Ecosystems & Environment. 2025. Vol. 397. Art. no. 110073. DOI: 10.1016/j.agee.2025.110073.

References

Bilaï V.I., Pidoplichko N.M. Toxinoforming Microscopic Fungi and Diseases Caused by Them in Humans and Animals. Kyiv: Naukova Dumka, 1970. 299 p. (In Russ.)

Dospekhov B.A. Field Experiment Methodology. Moscow: Kolos, 1985. 351 p. (In Russ.)

Gazizullin A.Kh. Soil-Environmental Conditions for Forest Formation in the Middle Volga Region: Soils of Middle Volga Forests, Their Genesis, Systematics, and Forest-Planting Properties. Kazan: Shkola, 2005. 495 p. (In Russ.)

Grimberg A.A. Use and conservation of land resources at the regional level. *Economy and ecology of territorial formations*, 2015, no. 1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-i-ohrana-zemelnyh-resursov-na-regionalnom-urovne (accessed: 01.03.2025). (In Russ.)

Grodzinsky A.M. Allelopathy of Plants and Soil Fatigue. Kyiv: Naukova Dumka, 1991. 429 p. (In Russ.)

Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I., Valkov V.F. Biological Diagnostics and Soil Indicators: Methodology and Research Methods. Rostov-on-Don: RSU, 2003. 202 p. (In Russ.)

Methods in Soil Microbiology and Biochemistry. Moscow: MSU, 1991. 302 p. (In Russ.)

Mohamed Kh.A. Associative Nitrogen Fixation in Rhizosphere Differences among Rice Varieties. Diss. ... Cand. Biol. Sci. Moscow, 1988. 240 p. (In Russ.)

Qin H., Wang H., Strong P.J., Li Y., Xu Q., Wu Q. Rapid soil fungal community response to intensive management in a bamboo forest developed from rice paddies. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, vol. 68, pp. 177-184. DOI: 10.1016/j.soilbio.2013.09.031.

Sataeva L.V. Application of Statistical Methods to Solve Certain Soil Pollution Monitoring Issues. Diss. ... Cand. Phys.-Math. Sci. Obninsk, 1990. 232 p. (In Russ.)

Soria R., de la Rosa J.M., González-Pérez J.A., Bastida, F., Ortega R., Miralles I. Assessing organic amendments for improving SOM dynamics and microbial functioning in degraded quarry soils. *Environmental Technology and Innovation*, 2025, vol. 39, art. no. 104323. DOI: 10.1016/j.eti.2025.104323.

Svistova I.D., Paramonov A.Yu. Influence of Medicinal Plants on Micromycetes and Soil Biological Activity. *Problems in Medical Mycology*, 2011, vol. 13, no. 3, pp. 50-53. (In Russ.)

Tedersoo L., Bahram M., Põlme S., Kõljalg U., Yorou N.S., Wijesundera R., Villarreal Ruiz L., Vasco-Palacios A.M., Quang Thu P., Suija A., Smith M.E., Sharp C., Saluveer E., Saitta A., Rosas M., Riit T., Ratkowsky D., Pritsch K., Põldmaa K., Piepenbring M., Phosri C., Peterson M., Parts K., Pärtel K., Otsing E., Nouhra E., Njouonkou A.L., Nilsson R.H., Morgado L.N., Mayor J., May T.W., Majuakim L., Lodge D.J., See Lee S., Larsson K.-H., Kohout P., Hosaka K., Hiiesalu I., Henkel T.W., Harend H., Guo L., Greslebin A., Grelet G., Geml J., Gates G., Dunstan W., Dunk C., Drenkhan R., Dearnaley J., De Kesel A., Dang Tan, Chen Xin, Buegger F., Brearley F.Q., Bonito G., Anslan S., Abell S., Abarenkov K. Global diversity and geography of soil fungi. *Science*, 2014, vol. 346, iss. 6213, art. no. 1256688. DOI: 10.1126/science.1256688.

Toledo S., Martínez Pastur G., Rodríguez Souilla J., Peri P.L. Effects of land use types and spatial heterogeneity on soil microbial biomass and activity along

environmental gradients in Austral ecosystems. *Total Environment Microbiology*, 2025, vol. 1, iss. 3, art. no. 100028. DOI: 10.1016/j.temicr.2025.100028.

Ye Z., Zhu X., Zhi Y., Lin H., Wu J. The role of forest mushroom systems in soil fungal community reorganization and carbon fractions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2025, vol. 397, art. no. 110073. DOI: 10.1016/j.agee.2025.110073.

Zvyagintsev D.G., Babieva I.P., Zenova G.M. Soil Biology. Moscow: MSU, 2005. 445 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 29.05.2025

Гибадуллин Н.Ф., Дурова А.С., Семенова Е.И., Гайфуллин И.И. Изучение структуры и состава микробных сообществ, формирующихся в процессе зарастания лесом бывших пахотных почв Республики Татарстан // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 363–382. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.363-382

В данной работе представлен подробный анализ микробного сообщества почв Республики Татарстан, сформировавшегося под воздействием различных типов растительности — смешанных и чистых сосновых сообществ — на бывших пахотных землях. Образцы почвы собраны как из верхнего горизонта, так и с ранее используемого пахотного слоя, что позволяет оценить изменения в микробной структуре в зависимости от исторического использования земли. Исследование направлено на выявление взаимосвязей между различными группами микроорганизмов, участвующих в азотном цикле и разложении органического вещества, а также на определение их роли в процессе восстановления плодородия почвы. Для анализа использовались методы корреляционного анализа с применением коэффициентов Пирсона и Спирмена, что позволило выявить наличие умеренных и сильных положительных связей между микроорганизмами. Эти связи свидетельствуют о сходных условиях среды и их участии в одной трофической цепочке. В результате исследования были выделены несколько групп образцов, характеризующихся различной численностью азотфиксирующих бактерий и актиномицетов, что отражает динамику гумусообразования и изменения уровня плодородия почвы. Работа подчеркивает важность микробного сообщества в процессе саморемедиации почвы после прекращения сельскохозяйственного использования. Установленные взаимосвязи между микроорганизмами и их роль в восстановлении экосистемы открывают новые перспективы для дальнейших исследований, включая изучение структуры древостоя и агрохимических показателей почвы. Полученные данные будут использованы в будущих публикациях для более глубокого понимания комплексных изменений в заброшенных сельскохозяйственных угодьях.

Ключевые слова: сельскохозяйственные земли, микромицеты, освоение заброшенных земель, культуры сосны.

Gibadullin N.F., Durova A.S., Semenova E.I., Gaifullin I.I. Study of the structure and composition of microbial communities formed during the process of forest overgrowth of former arable soils in the Republic of Tatarstan. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 363–382 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.363-382

This study presents a detailed analysis of the soil microbial community in the Republic of Tatarstan, which has developed under the influence of different types of vegetation—mixed and pure pine communities—on former arable lands. Soil samples were collected from both the upper horizon and the previously cultivated layer, allowing for an assessment of changes in microbial structure depending on land use history. The research aims to identify relationships between various groups of microorganisms involved in the nitrogen cycle and organic matter decomposition, as well as their roles in soil fertility recovery processes. Correlation analysis using Pearson's and Spearman's coefficients revealed moderate to strong positive relationships among microorganisms. These connections indicate similar environmental conditions and participation in a common trophic chain. As a result of the study, several groups of samples were distinguished based on differing populations of nitrogen-fixing bacteria and actinomycetes, reflecting the dynamics of humus formation and changes in soil fertility levels. The work emphasizes the importance of microbial communities in soil self-remediation after cessation of agricultural use. The established relationships between microorganisms and their roles in ecosystem restoration open new avenues for further research, including studies on forest structure and agrochemical soil indicators. The obtained data will be utilized in future publications to deepen understanding of complex changes occurring in abandoned agricultural lands.

K e y w o r d s : agricultural lands, micromycetes, reclamation of abandoned lands, pine cultivation.

ГИБАДУЛЛИН Нурсиль Фоатович – участковый лесничий Матюшинского участкового лесничества Пригородного лесничества г. Казани, доцент кафедры лесоводства и лесных культур факультета лесного хозяйства и экологии Казанского государственного аграрного университета, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 4388-8244.

420111, ул. Лесная, д. 15, г. Казань, Республика Татарстан, Россия. E-mail: karina.klimakova@icloud.com

GIBADULLIN Nursil F. – PhD (Agriculture), district forester in Matyushinskoye district forestry, Prigorodnoye forestry of Kazan, Associate Professor of the Department of Forestry and Forest Cultures, Kazan State Agrarian University. SPIN-code: 4388-8244.

420111. Lesnaya str. 15. Kazan. Republic of Tatarstan. Russia. E-mail: karina.klimakova@icloud.com

ДУРОВА Анастасия Сергеевна – доцент кафедры лесных культур Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 7073-0332. ORCID: 0000-0001-7234-920X.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. А, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: soilbox@mail.ru

DUROVA Anastasia S. – PhD (Agricultural), Associate Professor of Silviculture Department, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 7073-0332. ORCID: 0000-0001-7234-920X.

194021. Institute per. 5A. St. Petersburg. Russia. E-mail: soilbox@mail.ru

СЕМЕНОВА Екатерина Игоревна – младший научный сотрудник НИО мониторинга лесных экосистем Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства, аспирант Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пр., д. 21, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: 21.01.1990@mail.ru

SEMENOVA Ekaterina I. – Junior Researcher at the Scientific Research Department of Forest Ecosystem Monitoring, St. Petersburg Scientific Research Institute of Forest Management PhD student at St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 21. St. Petersburg. Russia. E-mail: 21.01.1990@mail.ru

ГАЙФУЛЛИН Ильдар Ильфатович - руководитель ООО Метро Кэш энд Керри.

193091, ул. Ультрамариновая д. 10, Санкт-Петербург. E-mail: Pimenta.spb@icloud.com

GAIFULLIN Ildar I. – Head of LLC «Metro Cash & Carry»

193091. Ultramarinovaya str. 10. St. Petersburg. E-mail: Pimenta.spb@icloud.com

УДК 634.73

Ю.В. Александрова, О.П. Лебедева, Н.А. Бабич

ОПЫТ КЛОНАЛЬНОГО МИКРОРАЗМНОЖЕНИЯ ОТБОРНОЙ ФОРМЫ ГОЛУБИКИ УЗКОЛИСТНОЙ *VACCINIUM ANGUSTIFOLIUM* AITON

Введение. Истощение природных запасов лесных ягодных ресурсов вследствие интенсивной антропогенной нагрузки – один из актуальных вопросов, стоящих перед исследователями[1]. Использование недревесных ресурсов леса регламентируется Лесным кодексом Российской Федерации[2] и Правилами заготовки и сбора недревесных лесных ресурсов[3].

Восполнение потерь ягодных ресурсов леса возможно с помощью создания специализированных ягодных плантаций. Высокий спрос на ягодную продукцию леса обусловлен ценными качествами в области нутрициологии и фармакологии.

Одним из высокоценных пищевых и лекарственных видов ягодных растений является голубика узколистная (*Vaccinium angustifolium* Aiton). Зимостойкость и способность произрастать на бедных кислых почвах делает вид перспективным для выращивания в условиях Европейского Севера.

Получение посадочного материала голубики узколистной методом клонального микроразмножения позволяет получить генетически идентичные растения, что гарантирует сохранение акклиматизационных способностей, сортовых характеристик, в том числе вкусовых качеств, урожайности и устойчивости к заболеваниям. Несмотря на необходимость наличия специализированного оборудования, стерильных условий и квалифицированного персонала, метод клонального микроразмножения растений позволяет значительно ускорить процесс размножения относительно традиционных методов, таких как черенкование или деление куста, что особенно важно для быстрого масштабирования производства и удовлетворения спроса на посадочный материал.

---

[1] Распоряжение Правительства Российской Федерации «Об утверждении стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года» от 11.02.2021 № 312-р.

[2] Лесной кодекс Российской Федерации от 04.12.2006 № 200-ФЗ (ред. от 03.08.2018) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2018).

[3] Правила заготовки и сбора недревесных лесных ресурсов. Утверждены приказом Минприроды России от 28.07.2020 N 496.

Культурой сортов голубики занимаются российские и зарубежные исследователи [Морозов, Гордей, 2010; Тяк, Тяк, 2013; Грибок и др., 2014; Морозов и др., 2016; Божидай, Кухарчик, 2017; Макеев и др., 2017; Макаров и др., 2021; Cheon et al., 2021; Figiel-Kroczyńska et al., 2022]. Для каждой культуры необходим подбор индивидуальных протоколов клонального микроразмножения, что связано с биологическими особенностями видов и сортов [Cüce, Sökmen, 2017; Nakhooda, Jain, 2017; Schuchovskia et al., 2020; Cheon et al., 2021].

Цель наших исследований – подбор протокола клонального микроразмножения отборной формы голубики узколистной (*Vaccinium angustifolium* Aiton) для плантационного выращивания.

Материалы и методика исследования. В Верхнетоемском районе Архангельской области ООО «Леском» на сортоиспытательном участке плантации был произведен отбор маточного растения для разработки протоколов полного цикла культивирования в условиях *in vitro* гибридной формы голубики узколистной и дальнейшего тиражирования. Высота экземпляра не превышает уровень снежного покрова, растение формирует вертикально растущие побеги с крупными плодами, что позволяет проводить сбор урожая комбайнами [Инновационная…, 2021; Чернов, 2023].

Лабораторные исследования проведены на базе лаборатории клонального микроразмножения растений и экспериментальной гидропоники Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. Методика исследований основывалась на работах [Бутенко, 1964; Деменко, 2007; Технология…, 2013] с подбором малоопасных препаратов для протокола стерилизации.

Для первоначальной обработки растительного материала в условиях *in vivo* были отсечены первые 10 см ежегодного прироста маточного растения. Черенки промывались с мылом под проточной водой в течение 15-20 минут для первичного удаления вирулентных организмов с поверхности растений. Индукцию почек до появления побегов производили в условиях вегетационной установки при повышенной влажности воздуха. Индуцированные побеги размером 1 см с 1-2 почками отделяли от основного черенка, далее стерилизовали в 2 этапа.

На первом этапе экспланты помещали на 30 минут в раствор 2% «Белизна» (содержание гипохлорита натрия 5-15%), а затем переносили в условия ламинар-бокса. После двукратного промывания стерильной водой производили вторичную обработку в 5% растворах «Лизоформин 3000» и «Бриллиант» при разном времени экспозиции – 5, 10 и 15 минут. Смыв агента проводили трехкратно дистиллированной водой. Двухэтапная стерилизация растений направлена на удаление патогенных микроорганизмов с поверхности культивируемых объектов.

После стерилизации первичные экспланты растений помещали на питательную среду Murashige and Skoog (MS), pH 5,2-5,4, содержащую макро- и микроэлементы [Figiel-Kroczyńska et al., 2022], витамины Тиамин – 0,5 мг/л, Пиродоксин – 0,5 мг/л, никотиновую кислоту – 0,2 мг/л, аскорбиновую кислоту – 1,0 мг/л, стимулирующие процессы органогенеза.

Состояние эксплантов и наличие контаминации питательной среды оценивали посредством визуального осмотра. В каждом варианте опыта учитывалось по 30 пробирочных растений, повторность опыта трехкратная. В процессе культивирования с интервалом 5 суток визуально фиксировали результаты введения в асептическую культуру путем расчета доли жизнеспособных, стерильных и здоровых эксплантов [Александрова и др., 2023]. Жизнеспособными отмечали экспланты, не утратившие способности к пролиферации, вне зависимости от наличия или отсутствия видимых признаков контаминации, выявление которых дает представление о влиянии стерилизующего агента на эксплант. К категории «стерильные» относили все пробирки без видимых признаков контаминации. При этом в данной категории были учтены как сохранившие способность к регенерации, так и некротирующие экспланты. Дальнейшие этапы эксперимента проводили с эксплантами, отнесенными к категории «здоровые» – являющиеся стерильными и способные к регенерации. Выделенные экспланты культивировали в течение 5 недель в условиях культуральной комнаты [Макаров, 2022].

На этапе тиражирования необходимо стимулировать образование и рост побегов с использованием росторегулирующих веществ различной направленности. Для этого к стандартной среде MS, pH 5,2-5,4, добавляли мезоинозит 100 мг/л, индолилуксусную кислоту (ИУК), 6-бензиламинопурин (6-БАП), N6-(дельта 2-изопентенил)-аденин (2-ip), кинетин. В табл. 1 представлены варианты опыта по комбинации и содержанию росторегулирующих веществ. Тиражирование производили путем деления побега на сегменты с 1 почкой.

Ввиду образования корней у регенерантов на этапе тиражирования, отдельно этап укоренения не проводили. Верхнюю часть регенеранта отсекали для дальнейшего тиражирования, а укоренённый сегмент перемещали в вегетационную установку для адаптации.

Укоренённые растения *in vitro* размером вегетативной и корневой частей около 2 см отмывали от агаризированной питательной среды в растворе калия перманганата ($KMnO_4$), пересаживали в кассету РКЛ-81 (486 шт/м^2), наполненную субстратом торф 4/5, перлит 1/5, и адаптировали в условиях изолированной камеры вегетационной установки [Гущин и др., 2024].

Адаптацию микрорастений проводили в течение 16 суток. Первые 2 суток в камере поддерживали 100% влажность, которую снижали каждые двое суток на 20% для активации работы устьичного аппарата растений.

Через 12 суток камеру открывали и проводили закаливание растений при комнатной температуре 21-23°С и относительной влажности воздушной среды 60-65%. Полив производили методом подтопления с интервалом 1 раз в неделю питательным составом Tripart Flora Series (Flora Grow). Освещение растений осуществляли светодиодными модулями полного спектра с диапазоном длин волн 440-660 нм., 5-8 тыс. лк при фотопериоде 16 ч [Макаров и др., 2023; Лебедева и др., 2024].

После адаптации в условиях вегетационной установки растения были перенесены в теплицу на доращивание при дневной температуре 20-24°С, ночной температуре 18°С, влажности воздуха 65%, без дополнительного освещения.

Статистическую обработку полученных данных проводили с помощью программного пакета Microsoft Office 2016.

Результаты и обсуждение исследований. После 10 суток наблюдений не было зафиксировано пробирок с наличием контаминации. Учёт жизнеспособных, стерильных и здоровых эксплантов представлен в табл. 2.

Таблица 1

Схема опыта для этапа тиражирования

The scheme of experiment for multiplication stage

Вариант опыта	Гормоны, добавленные в питательную среду, мл/л			
	ИУК	6-БАП	2-ip	Кинетин
I	1,0	–	2,0	–
II	0,4	0,75	1,0	1,0
III	0,2	–	1,0	–
IV	0,1	–	1,5	1,25

Таблица 2

Результаты опыта по стерилизации эксплантов *Vaccinium angustifolium* Aiton, %

The results of the sterilization experiment of explants *Vaccinium angustifolium* Aiton, %

Стерилизующий раствор	Категория	Время экспозиции, мин		
		5	10	15
Белизна 2% + «Лизоформин 3000»	Жизнеспособные	100,0	90,0	86,6
	Стерильные	66,7	73,3	83,3
	Здоровые	66,7	73,3	76,6
Белизна 2% + «Бриллиант»	Жизнеспособные	83,3	80,0	63,3
	Стерильные	56,6	56,6	70,0
	Здоровые	56,6	56,6	66,7

Представленные в табл. 2 данные показывают, что при использовании раствора 5% «Лизоформин 3000» в течение 5 минут сохраняется 100% жизнеспособных эксплантов, а при использовании раствора «Бриллиант» – 83,3%. При увеличении времени экспозиции до 10 и 15 минут доля жизнеспособных эксплантов снижается, при этом доля здоровых и стерильных экземпляров увеличивается. Количество эксплантов, простерилизованных с помощью раствора «Лизоформин 3000», относительно количества эксплантов, простерилизованных с помощью раствора «Бриллиант», значительно выше, что говорит о щадящем воздействии агента «Лизоформин 3000» на ткани растений. Таким образом, наиболее приемлемым считаем использование раствора «Лизоформин 3000» на этапе стерилизации при получении асептической культуры голубики узколистной.

На этапе тиражирования для пролиферации необходимо регулировать гормональную составляющую питательной среды. Тиражирование проводили путем деления побега на черенки с 1 почкой. По результатам выращивания регенерантов на средах с содержанием фитогормонов отмечали количество сформировавшихся почек на побегах голубики узколистной (рис. 1), среднюю длину побегов (рис. 2) и сроки пассирования микрорастений.

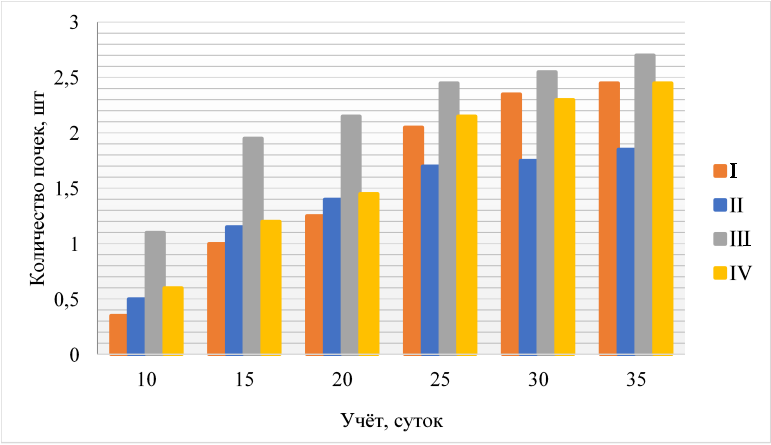


Рис. 1. Динамика увеличения количества почек на побегах *Vaccinium angustifolium* Aiton согласно вариантам опыта (I-IV)

Fig. 1. Dynamics of the increase in the number of bud on the shoots of *Vaccinium angustifolium* Aiton according to experiment options (I-IV)

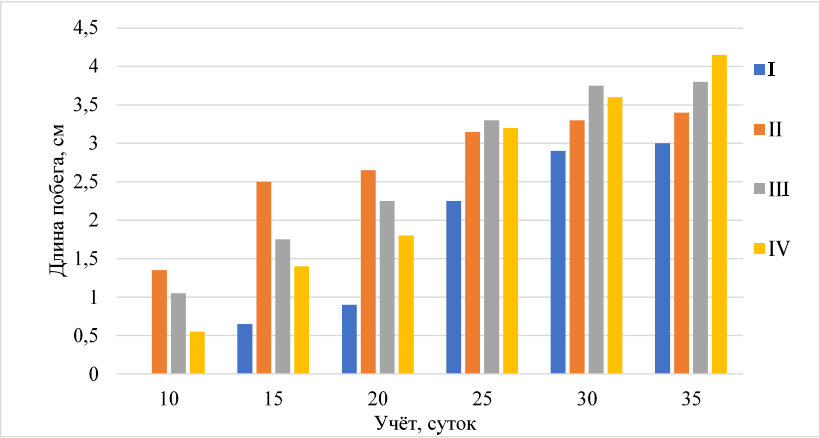


Рис. 2. Динамика увеличения средней длины побегов *Vaccinium angustifolium* Aiton согласно вариантам опыта (I-IV)

Fig. 2. Dynamics of the increase in the mean length of shoots of *Vaccinium angustifolium* Aiton according to experiment options (I-IV)

Динамика развития микропобегов гибридной формы голубики в пробирке происходила равномерно, но отмечен медленный рост регенерантов по сравнению с литературными данными [Макаров, 2022]. Наибольшее среднее количество почек, образовавшихся на побегах голубики, отмечено в III варианте опыта с добавлением ИУК и 2-ip, что согласуется с результатами авторов, которые отмечают отзывчивость голубики на гормон 2-ip [Куликова и др., 2023]. Однако применение гормонов ИУК и 2-ip в соотношении 1:2 соответственно приводит к более медленному органогенезу. Влияние кинетина на количество междоузлий несущественно, но применение его в сочетании с 2-ip в IV варианте опыта показывает лучшие результаты по влиянию на скорость роста побегов. Добавление 6-БАП с увеличением дозы ауксина – II вариант опыта – приводит к сильному разрастанию каллуса и снижению скорости роста микропобегов.

Активный рост регенерантов начинается после 20 суток. При делении регенерантов на черенки с одной почкой на 35 сутки коэффициент размножения равен 3, что соответствует литературным данным [Макаров, 2022]. Согласно исследованиям С.С. Макарова коэффициент размножения можно увеличить за счет увеличения интервала между пассажами, что важно учитывать при массовом тиражировании регенерантов.

Оптимальными составами питательной среды для тиражирования побегов голубики узколистной являются варианты III, IV.

По коэффициенту Стьюдента результаты не достоверны, стандартные отклонения находятся в диапазонах: по приросту побега – от 4,25 до 4,49 см; по количеству междоузлий – от 1,63 до 3,03.

Во всех вариантах опыта отмечен ризогенез и все полученные растения с этапа тиражирования переходили на этап адаптации, в связи с чем разработка технологии этапа укоренения является неактуальной.

Адаптацию микрорастений проводили по отработанной методике в вегетационной установке [Гущин и др., 2024]. Помещенные в условия водно-дисперсионной среды вегетационной установки регенеранты сохраняют тургор (рис. 3). В процессе снижения подачи тумана происходит процесс активации работы устьичного аппарата микрорастений, что позволяет сохранить максимальное количество регенерантов. За период адаптации 16 суток у 80% растений отмечено начало роста зачаточных листьев; доля адаптировавшихся растений – 98,3%.

Рис. 3. Адаптация растений *Vaccinium angustifolium* Aiton в камере вегетационной установки

Fig. 3. Adaptation of *Vaccinium angustifolium* Aiton plants in the controlled growth chamber environment

Выводы. В результате проведенных исследований произведен полный цикл клонального микроразмножения отобранной в северных широтах формы голубики узколистной.

• Лучшие результаты по сохранности и доле выхода жизнеспособных и стерильных эксплантов отмечены при использовании 5% раствора «Лизоформин 3000» при экспозиции 15 минут. При стерилизации сегментов раствором «Бриллиант» у большого количества эксплантов отмечены ожоги и некрозы, регенерация отсутствует;

• Наибольшее среднее количество почек, образовавшихся на побегах голубики, культивируемых в условиях *in vitro,* отмечено при добавлении в питательную среду гормонов 2-ip (1,0-1,5 мл/л) и ИУК (0,1-0,2 мл/л);

• На этапе мультипликации средний коэффициент размножения – не более 3 на учётный период 35 суток;

• В течение периода адаптации растений к условиям *ex vitro* в специализированной вегетационной установке доля адаптировавшихся растений составила 98,3 %.

Сведения о финансировании исследования. Исследование выполнено за счет средств Программы развития САФУ на 2021-2035 гг., договор Д-384.2024.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Александрова Ю.В., Лебедева О.П., Бабич Н.А. Исследование различных дезинфицирующих средств при введении в культуру *in vitro* эксплантов древесных растений // Охрана, инновационное восстановление и устойчивое управление лесами. Forestry – 2023: мат. межд. лес. форума. Воронеж, 2023. С. 392-400. DOI: 10.58168/Forestry2023_392-400.

Божидай Т.Н., Кухарчик Н.В. Влияние гормонального состава питательной среды и субстрата для адаптации на размножение сортов голубики узколистной // Опыт и перспективы возделывания ягодных растений семейства Брусничные на территории Беларуси и сопредельных стран: мат. межд. науч. семинара. Минск, 2017. С. 3-7.

Бутенко Р.Г. Культура изолированных растительных тканей и физиология морфогенеза растений. М.: Наука, 1964. 270 с.

Грибок Н.А., Букляревич А.Г., Веевник А.А., Яковлев А.П. Перспективы тиражирования посадочного материала голубики узколистной // Опыт и перспективы возделывания голубики на территории Беларуси и сопредельных стран: мат. межд. науч.-практ. конф. Минск, 2014. С. 35-39.

Гущин А.В., Лебедева О.П., Александрова Ю.В., Мелехов В.И., Бабич Н.А., Демин И.Ю. Патент на изобретение № 2826463 Вегетационная установка для

адаптации и выращивания растений *in vitro*: № 2024105922; заявл. 07.03.2024, опубл. 11.09.2024.

Деменко В.И. Микроклональное размножение садовых растений: учеб. пособие / ФГОУ ВПО РГАУ – МСХА им. К. А. Тимирязева. М., 2007. 55 с.

Инновационная система уборки голубики в 4 раза снижает стоимость сбора урожая //Агробизнес. 2021. URL: https://agbz.ru/news/innovatsionnaya-sistema-uborki-golubiki-v-4-raza-snizhaet-stoimost-sbora-urozhaya/ (дата обращения: 14.07.2025)

Куликова Е.И. Макаров С.С., Кузнецова И.Б., Чудецкий А.И., Сунгурова Н.Р., Кульчицкий А.Н. Влияние 2-изопентиладенина на органогенез северно-российских форм голубики топяной (*Vaccinium uliginosum* L.) в культуре *in vitro* // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2023. № 4(102). С. 120-125. DOI: 10.37670/2073-0853-2023-102-4-120-125.

Лебедева О.П., Александрова Ю.В., Мелехов В.И., Бабич Н.А. Патент на изобретение № 2828836 Способ адаптации растений-регенерантов к условиям ex vitro; заявл. 01.12.2023, опубл. 21.10.2024.

Макаров С.С. Научно-методическое обоснование технологии размножения и плантационного выращивания лесных ягодных растений: дис. … д-ра с.-х. наук. Пушкино, 2022. 467 с.

Макаров С.С., Кузнецова И.Б., Куликова Е.И., Чудецкий А.И. Влияние состава питательной среды и росторегулирующих веществ на ризогенез голубики узколистной *in vitro* // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2021. № 6 (92). С. 103-109. DOI: 10.37670/2073-0853-2021-92-6-103-109.

Макаров С.С., Антонов А.М., Александрова Ю.В., Лебедева О.П., Кузнецова И.Б. Адаптация триплоидной осины к условиям ex vitro с применением гидропонной установки // Сибирский лесной журнал. 2023. № 3. С. 27-33. DOI: 10.15372/SJFS20230304.

Макеев В.А., Тяк Г.В., Макеева Г.Ю. Опыт культивирования голубики узколистной на выработанных торфяниках Костромской области // Лесохозяйственная информация. 2017. № 2. С. 91-102. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2017.2.09.

Морозов О.В., Гордей Д.В. Способность голубики узколистной (*Vaccinium angustifolium* Ait.) к вегетативному и генеративному размножению при выращивании посадочного материала // Устойчивое управление лесами и рациональное лесопользование: мат. межд. науч.-практ. конф. Минск, 2010. Кн. 2. С. 440-443.

Морозов О.В., Гордей Д.В., Сауткин Ф.В., Буга С.В., Ярмолович В.А. Культивирование голубики узколистной (*Vaccinium angustifolium* Ait.) в Белорусском Поозерье. Минск: БГТУ, 2016. 195 с.

Технология получения оздоровленного от вирусов посадочного материала плодовых и ягодных культур. М.: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2013. 91 с.

Тяк Г.В., Тяк А.В. Выращивание сеянцев голубики узколистной на выработанном торфянике // Новые и нетрадиционные растения и перспективы их использования: мат. X межд. симпозиума. Пущино, 2013. Т. 1. С. 37-40.

Чернов Г. Руководство по машинному сбору голубики для свежего рынка // Питомник Черновых. 2023. URL: https://www.blueberry.by/post/руководство-по-машинному-сбору-голубики-для-свежего-рынка (дата обращения: 14.07.2025)

Cheon M.G., Lee S.H., Park K.M., Choi S.-T., Hwang Y.H., Chang Y.H., Kim J.G. Growth and Yield Response of Highbush Blueberry 'Duke' to Hydroponic Cultivation // Journal of Bio-Environment Control. 2021. Vol. 30, iss. 3. P. 244-249.

Cüce M., Sökmen A. In vitro production protocol of *Vaccinium uliginosum* L. (bog bilberry) growing in the Turkish flora // Turkish Journal of Agriculture and Forestry. 2017. Vol. 41, iss. 4. P. 294-304.

Figiel-Kroczyńska M., Krupa-Małkiewicz M., Ochmian I. Efficient micropropagation protocol of three cultivars of highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) // Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca. 2022. Vol. 50. P. 1-13.

Lloyd G., McCown B.H. Commercially-feasible micropropagation of mountain laurel, *Kalmia latifolia*, by use of shoot-tip culture // Int. Plant Prop. Soc. Proc. 1980. Vol. 30. P. 421–427.

Nakhooda M., Jain S.M. Clonal and Micropropagation // Encyclopedia of Applied Plant Sciences. 2017. P. 428-432.

Schuchovskia C., Sant'Anna-Santosb B.F., Marrac R.C., Biasi L.A. Morphological and anatomical insights into de novo shoot organogenesis of *in vitro* 'Delite' rabbiteye blueberries // Heliyon. 2020. Vol. 6, iss. 1. Art. no. e05468. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e05468.

References

Aleksandrov Iu.V., Lebedeva O.P., Babich N.A. Research of various disinfectants when introducing in vitro extracts of woody plants into culture. *Protection, innovative restoration and sustainable forest management. Forestry-2023*: mat. of int. forestry forum. Voronezh, 2023, pp. 392-400. DOI: 10.58168/Forestry2023_392-400. (In Russ.)

Bozhidai T.N., Kukharchik N.V. The influence of the hormonal composition of the nutrient medium and substrate for adaptation on the reproduction of varieties of narrow-leaved blueberry. *Experience and prospects of cultivation of berry plants of the Lingonberry family on the territory of Belarus and neighboring countries*: mat. of int. sci. workshop. Minsk, 2017, pp. 3-7. (In Russ.)

Butenko R.G. Culture of isolated plant tissues and the physiology of plant morphogenesis. Moscow: Nauka, 1964. 270 p. (In Russ.)

Cheon M.G., Lee S.H., Park K.M., Choi S.-T., Hwang Y.H., Chang Y.H., Kim J.G. Growth and Yield Response of Highbush Blueberry 'Duke' to Hydroponic Cultivation. *Journal of Bio-Environment Control*, 2021, vol. 30, iss. 3, pp. 244-249.

Chernov G. Guide to machine harvesting of blueberries for the fresh market. *The Chernov nursery,* 2023. URL: https://www.blueberry.by/post/руководство-по-машинному-сбору-голубики-для-свежего-рынка (accessed: 14.07.2025) (In Russ.)

Cüce M., Sökmen A. In vitro production protocol of *Vaccinium uligi-nosum* L. (bog bilberry) growing in the Turkish flora. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 2017, vol. 41, iss. 4, pp. 294-304.

Demenko V.I. Microclonal reproduction of garden plants: a textbook / FGOU VPO RGAU – MSHA named after K. A. Timiryazev. Moscow, 2007. 55 p. (In Russ.)

Figiel-Kroczyńska M., Krupa-Małkiewicz M., Ochmian I. Efficient micropropagation protocol of three cultivars of highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.). *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 2022, vol. 50, pp. 1-13.

Gribok N.A., Buklyarevich A.G., Veevnik A.A., Yakovlev A.P. Prospects for replicating the planting material of narrow-leaved blueberries. *Experience and prospects of blueberry cultivation in Belarus and neighboring countries*: mat. of int. sci.-pract. conf. Minsk, 2014, pp. 35-39. (In Russ.)

Gushchin A.V., Lebedeva O.P., Aleksandrova Iu.V., Melekhov V.I., Ba-beach N.A., Demin I.Yu. Patent for invention No. 2826463 Vegetation plant for adaptation and cultivation of plants in vitro: No. 2024105922; appl. 07.03.2024, publ. 11.09.2024. (In Russ.)

An innovative blueberry harvesting system reduces the cost of harvesting by 4 times. *Agribusiness,* 2021. URL: https://agbz.ru/news/innovatsionnaya-sistema-uborki-golubiki-v-4-raza-snizhaet-stoimost-sbora-urozhaya/ (accessed 14.07.2025) (In Russ.)

Kulikova E.I. Makarov S.S., Kuznetsova I.B., Chudetskiy A.I., Sungurova N.R., Kulchitskiy A.N. The effect of 2-isopentyladenine on the organogenesis of Northern Russian forms of poplar blueberry (*Vaccinium uliginosum* L.) in in vitro culture. *Izvestiya Orenburg State Agrarian University*, 2023, no. 4(102), pp. 120-125. DOI: 10.37670/2073-0853-2023-102-4-120-125. (In Russ.)

Lebedeva O.P., Alexandrova Yu.V., Melekhov V.I., Babich N.A. Patent for invention No. 2828836 Method of adaptation of regenerated plants to ex vitro conditions; appl. 12/01/2023, publ. 10/21/2024. (In Russ.)

Lloyd G., McCown B.H. Commercially-feasible micropropagation of mountain laurel, *Kalmia latifolia*, by use of shoot-tip culture. *Int. Plant Prop. Soc. Proc*., 1980, vol. 30, pp. 421–427.

Makarov S.S., Scientific and methodological substantiation of the technology of cultivation and plantation cultivation of forest berry plants. Diss. … Dr. Agr. Sci. Pushkino, 2022. 467 p. (In Russ.)

Makarov S.S., Kuznetsova I.B., Kulikova E.I., Chudetsky A.I. Influence of the composition of the nutrient medium and growth-regulating substances on the rhizogenesis of narrow-leaved blueberries in vitro. *Izvestiya Orenburg State Agrarian University*, 2021, no. 6 (92), pp. 103-109. DOI: 10.37670/2073-0853-2021-92-6-103-109. (In Russ.)

Makarov S.S., Antonov A.M., Aleksandrova Iu.V., Lebedeva O.P., Kuznetsova I.B. Adaptation of triploid aspen to ex vitro conditions using a hydroponic installation. *Siberian Forest Journal*, 2023, no. 3, pp. 27-33. DOI: 10.15372/SJFS20230304. (In Russ.)

Makeev V.A., Tyak G.V., Makeeva G.Yu. Experience of cultivation of narrow-leaved blueberries on the developed peat bogs of the Kostroma region. *Forestry information*, 2017, no. 2, pp. 91-102. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2017.2.09. (In Russ.)

Morozov O.V., Gordey D.V. The ability of narrow-leaved blueberries (*Vaccinium angustifolium* Ait.) to vegetative and generative reproduction when growing planting material. *Sustainable forest management and rational forest management*: mat. of int. sci.-pract. conf. Minsk, 2010, vol. 2, pp. 440-443. (In Russ.)

Morozov O.V., Gordey D.V., Sautkin F.V., Buga S.V., Yarmolovich V.A. Cultivation of narrow-leaved blueberries (*Vaccinium angustifolium* Ait.) in the Belarusian Lake district. Minsk: BSTU, 2016. 195 p. (In Russ.)

Nakhooda M., Jain S.M. Clonal and Micropropagation. *Encyclopedia of Applied Plant Sciences*. 2017, pp. 428-432.

Schuchovskia C., Sant'Anna-Santosb B.F., Marrac R.C., Biasi L.A. Morphological and anatomical insights into de novo shoot organogenesis of *in vitro* 'Delite' rabbiteye blueberries. *Heliyon*, 2020, vol. 6, iss. 1, art. no. e05468. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e05468.

Technology for obtaining virus-free planting material of fruit and berry crops. Moscow: Russian Scientific Research Institute of Information and Technical and Economic Research on engineering and technical support of the agro-industrial complex, 2013. 91 p. (In Russ.)

Tyak G.V., Tyak A.V. Growing seedlings of narrow-leaved blueberry on a developed peat bog. *New and non-traditional plants and prospects for their use*: mat. of X int. symposium. Pushchino, 2013, vol. 1, pp. 37-40. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 29.10.2025

Александрова Ю.В., Лебедева О.П., Бабич Н.А. Опыт клонального микроразмножения отборной формы голубики узколистной *Vaccinium angustifolium* Aiton // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 383–396. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.383-396

В статье приведены результаты исследований по клональному микроразмножению формы голубики узколистной (*Vaccinium angustifolium* Aiton), отобранной на сортоиспытательном участке плантации в Архангельской области. Для клонального микроразмножения видов, форм и сортов необходимо подбирать индивидуальный протокол, соответствующий биологическим особенностям тиражируемых объектов. Для первоначальной обработки растительного материала в условиях *in vivo* были отсечены первые 10 см ежегодного прироста

маточного растения. На этапе стерилизации при введении в культуру *in vitro* для стерилизации эксплантов голубики узколистной применяли 5% раствор «Лизоформин 3000» и 5% раствор «Бриллиант» при времени экспозиции 5, 10 и 15 минут. Наибольшая доля здоровых эксплантов зафиксирована при использовании раствора «Лизоформин 3000» в течение 15 минут – 76,6%. На этапе тиражирования при добавлении в питательную среду гормонов 2-ip (1,0-1,5 мл/л) и ИУК (0,1-0,2 мл/л) отмечено наибольшее среднее количество сформировавшихся почек и наибольшие значения средней длины микропобегов голубики узколистной. Период между пассажами составляет 35 суток. При тиражировании регенерантов сегментами, содержащими по 1 почке, коэффициент размножения равен 3. С целью увеличения количества выхода посадочного материала верхняя часть регенеранта была отсечена для дальнейшего тиражирования, а укоренённый сегмент с двумя почками перемещали в вегетационную установку для адаптации. Адаптацию микрорастений проводили по отработанной методике в вегетационной установке в течение 16 суток, что позволяет сохранять максимальное количество адаптируемых растений.

Ключевые слова: микроклональное размножение, побегообразование, корнеобразование, питательная среда, регуляторы роста, *in vitro*.

Aleksandrova I.V., Lebedeva O.P., Babich N.A. Experience in clonal micropropagation of the selected form of *Vaccinium angustifolium* Aiton. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 383–396 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.383-396

The article presents the results of research on the clonal micropropagation of the form of narrow-leaved blueberry (*Vaccinium angustifolium* Aiton) collected at the variety testing site of a plantation in the Arkhangelsk region. For clonal micropropagation of species, forms and varieties, it is necessary to select an individual protocol corresponding to the biological characteristics of the replicated species. For the initial treatment of plant material *in vivo*, the first 10 cm of annual growth of the donor plant were cut off. At the sterilization stage, when introducing into the in vitro culture, a 5% solution of “Lysoformin 3000” and a 5% solution of “Brilliant” were used to sterilize the explants of narrow-leaved blueberry at an exposure time of 5, 10 and 15 minutes. The largest proportion of healthy explants was recorded when using “Lysoformin 3000” solution for 15 minutes – 76.6%. At the stage of micro-reproduction proper, when hormones 2-ip (1.0-1.5 ml/l) and indolylacetic acid (0.1-0.2 ml/l) were added to the nutrient medium, the largest average number of formed buds and the highest values of the average length of micro-shoots of narrow-leaved blueberries were marked. The period between passages lasts 35 days. When replicating regenerants with segments containing 1 bud each, the reproduction coefficient is 3. In order to increase the amount of planting material yield, the upper part of the plant was cut off for further replication, and the rooted segment with two buds was moved to the

vegetation plant for adaptation. The adaptation of micro-plants was carried out according to a proven technique in a vegetation installation for 16 days, which allows you to save the maximum number of adaptable plants.

K e y w o r d s: micropropagation, shoot formation, root formation, nutrient medium, growth regulators, *in vitro*.

АЛЕКСАНДРОВА Юлия Васильевна – доцент Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 8560-4497. ORCID: 0000-0002-2802-1124.

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: yu.aleksandrova@narfu.ru

ALEKSANDROVA Iuliia V. – PhD (Agriculture), Associate Professor, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. SPIN-code: 8560-4497. ORCID: 0000-0002-2802-1124.

163002. Northern Dvina emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: yu.aleksandrova@narfu.ru

ЛЕБЕДЕВА Ольга Петровна – ассистент Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. SPIN-код: 6744-8015. ORCID: 0000-0002-5282-4904.

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: o.lebedeva@narfu.ru

LEBEDEVA Olga P. – Assistent, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. SPIN-code: 6744-8015. ORCID: 0000-0002-5282-4904.

163002. Northern Dvina emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: o.lebedeva@narfu.ru

БАБИЧ Николай Алексеевич – профессор Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова, доктор сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 3176-1811. ORCID: 0000-0001-7463-2519.

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: n.babich@narfu.ru

BABICH Nikolay A. – DSc (Agriculture), Professor, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. SPIN-code: 3176-1811. ORCID: 0000-0001-7463-2519.

163002. Northern Dvina emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: n.babich@narfu.ru

УДК 582.632.1 : 575 + 630*32+ 630* 811.6

Л.В. Ветчинникова, А.Ф. Титов, Е.Д. Сафронычева, А.В. Жигунов

ОСОБЕННОСТИ РОСТА СЕЯНЦЕВ КАРЕЛЬСКОЙ БЕРЕЗЫ, ПОЛУЧЕННЫХ В РЕЗУЛЬТАТЕ СВОБОДНОГО ОПЫЛЕНИЯ, И ВЫЯВЛЕНИЕ СРЕДИ НИХ НОСИТЕЛЕЙ ПРИЗНАКА «УЗОРЧАТАЯ ДРЕВЕСИНА» С ПОМОЩЬЮ МОЛЕКУЛЯРНОГО МАРКЕРА BPCW1

Введение. В настоящее время карельская береза (*Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti) считается разновидностью березы повислой, хотя в вопросе о ее таксономическом статусе по-прежнему существуют разные точки зрения [Ветчинникова, Титов, 2020]. Главной ее отличительной особенностью является высокодекоративная и высокоценная узорчатая древесина, которая на протяжении многих лет неизменно привлекает к себе внимание. Одним из следствий этого явилось существенное сокращение численности популяций карельской березы в последнее столетие [Vetchinnikova, Titov, 2021]. В природных условиях она сохранилась лишь в отдельных районах Беларуси (преимущественно в Витебской, Минской и Могилевской областях) и России (в Республике Карелия). Дополнительно усугубляет ситуацию то обстоятельство, что естественное возобновление у карельской березы выражено крайне слабо.

При выявлении карельской березы (среди других видов березы) особую роль играет визуальная диагностика признаков, косвенно указывающих на формирование узорчатой древесины. Наиболее важными среди них являются выпуклости или утолщения, внешне различимые на стволе (иногда и на скелетных ветвях кроны) деревьев [Ветчинникова, Титов, 2021]. Однако визуально заметными они становятся в среднем только в возрасте 8 лет и позднее [Соколов, 1970; Ермаков, 1986; Евдокимов, 1989]. К тому же доля деревьев с такими признаками при свободном опылении составляет в потомстве всего 2–3% [Johnsson, 1951], реже до 25% (или даже 50%) [Любавская, 1978; Larsen, 1940; Heikinheimo, 1951]. Однако не исключено, что в природных условиях некоторые деревья, внешне очень похожие на березу повислую, могут иметь в «скрытом» виде узорчатую древесину с разной степенью насыщенности текстуры. В дальнейшем при скрещивании таких условно «безузорчатых» деревьев в следующих поколениях вполне можно ожидать появления с какой-то частотой «узорчатых» форм. Тем не

менее выявить их в природных условиях в раннем (и даже в более позднем) возрасте до сих пор не удавалось. Безошибочно к этому типу можно отнести только те растения, которые получены в результате контролируемого опыления деревьев карельской березы между собой. Прямые же методы прижизненной диагностики «узорчатости» у растений, особенно на ранних этапах онтогенеза, до сих пор отсутствовали.

Новые возможности в диагностике карельской березы открывает использование молекулярных маркеров. Так, совсем недавно на основе анализа более 37 тысяч SNP (Single Nucleotide Polymorphism), локализованных на 10-й хромосоме в интервале протяженностью 1,2 млн. п.н., обнаружены участки, связанные с фенотипом «узорчатости древесины» [Gubaev et al., 2024]. Детальный анализ этой части генома показал, что в непосредственной близости с SNP_3465040 на удалении 160 п.н. у 92% изученных деревьев с «узорчатым» фенотипом наблюдается генетический полиморфизм в виде делеции размером 54 п.н., которая может быть представлена как в гомо-, так и гетерозиготном состоянии. На основе этих данных был разработан и предложен для практического применения молекулярный маркер, получивший название **BpCW**1 (**B**etula **p**endula **C**urly **W**ood 1) [Жигунов и др., 2024]. Эти исследования были выполнены на примере близкородственного 15- и 35-летнего семенного потомства, полученного в результате контролируемого опыления [Ветчинникова и др., 2023]. Сеянцы карельской березы от свободного опыления в этом плане пока не изучались, поэтому целью данной работы стало исследование особенностей роста сеянцев карельской березы, полученных в результате свободного опыления, и выявление среди них носителей признака «узорчатая древесина» с применением ДНК-маркера BpCW1.

Объекты и методы исследований. Объектом исследований служило однолетнее семенное потомство карельской березы *Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti. Семена собирали с деревьев, произрастающих на территории Гатчинского ПЛСУ (12 кв., выдел 4–5 Таицкого участкового лесничества, вблизи п. Терволово Ленинградской области), в учебно-производственном питомнике Лисинского лесного колледжа (96-й кв. Шапкинского участкового лесничества, Тосненский район Ленинградской области) (для удобства изложения в тексте данное семенное потомство условно обозначено «Шапки») и в дендропарке Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства («СПбНИИЛХ»).

Сбор семян от свободного опыления проводили в июле-августе 2022 и 2023 гг., а проращивание – весной на следующий после сбора год (2023 и 2024 гг.). Посев семян осуществляли рядами в пластиковые ящики в условиях теплицы, расположенной на территории Ботанического сада Санкт-

Петербургского государственного лесотехнического университета. Спустя две недели после появления всходов растения пикировали (пересаживали) в пластиковые контейнеры. В качестве субстрата использовали верховой слабо разложившийся торф, нейтрализованный доломитовой мукой до pH_{KCl} 5,0 и обогащенный комплексом макро- и микроэлементов. В течение вегетационного периода проводили стандартные для выращивания сеянцев подкормки и уходы.

Определение ростовых показателей (высота и диаметр у основания стебля на уровне корневой шейки) проводили 1 раз в неделю в июле и 1 раз в две недели в августе. Высоту растений измеряли с помощью линейки, а диаметр – штангенциркулем. Вариабельность показателей оценивали с помощью коэффициента вариации (C, %) [Мамаев, 1973].

Выделение ДНК из листьев проводили модифицированным CTAB-методом [Rahimah et al., 2006]. Реакционная смесь для ПЦР (полимеразная цепная реакция) содержала 1 × Taq-буфер (2,5 мМ Mg2+); 200 мкМ дНТФ; ДНК-полимеразу Taq 2,5 ЕД («Евроген», Москва); 0,4 мкМ каждого из праймеров (5'-GGTTGGAAGAGCTCCATGAT и 5'-GGAAGAATAAATAAGTCTGAGA TGCC); около 20 нг матричной ДНК и стерильную дистиллированную воду в общем объеме 25 мкл. Программа амплификации включала начальную стадию денатурации при 95°C в течение 3 мин, затем 30 циклов: денатурация при 95°C в течение 30 с, отжиг матрицы с праймерами при 58°C – 30 с, элонгация при 72°C – 45 с и заключительный цикл элонгации при 72°C – 5 мин. Анализ ПЦР-продуктов проводили методом электрофореза в 1,0–1,5% агарозном геле в горизонтальных блоках при напряженности электрического поля 5–10 В/см. В качестве электролита использовали трис-ацетатный буфер (40 мМ трис-ацетат; pH 8,0; 0,02 М ацетат натрия; 0,002 М EDTA). О ходе электрофореза судили по миграции бромфенолового синего (Serva, Германия), предварительно добавленного в пробы. Визуализацию результатов осуществляли в ультрафиолетовом свете после экспозиции геля в растворе бромистого этидия (10 мкг/мл) с помощью установки видео документации гелей Gel-Doc (Bio-Rad, США).

Результаты исследований. Исследования показали, что, несмотря на большой объем собранных (несколько сотен штук) и высеянных семян карельской березы, количество выживших сеянцев оказалось незначительным. В частности, в 2023 г. из семян, собранных в дендропарке СПбНИИЛХа, выращено 22 растения, а в 2024 г. – 51 растение из семян, собранных с 11 деревьев карельской березы, произрастающих на разных участках (Гатчинский ПЛСУ – 4 дерева, «Шапки» – 5 и «СПбНИИЛХ» –

2). По всей вероятности, это обусловлено низким качеством семян, которое у березы (независимо от вида) зависит не только от внешних факторов (температура, осадки и др.) в период опыления и дальнейшего эмбрионального развития, но и от морфофизиологических свойств пыльцы. Имеются сведения, что у карельской березы пыльца характеризовалась очень низкой жизнеспособностью и небольшой длиной пыльцевой трубки, что значительно снижает эффективность процессов опыления, оплодотворения и получения полноценных семян [Николаевская и др., 2008].

Анализ ростовых показателей сеянцев карельской березы, полученных в результате свободного опыления, показал наличие у них существенных различий в зависимости от года и места сбора семян. В частности, высота сеянцев, выращенных из семян, собранных в дендропарке СПбНИИЛХа (в 2022 г.), уже в июне 2023 г. составила в среднем 12,7 см (табл. 1), а к началу сентября – 51,4 см, варьируя от 15,9 до 99,0 см (рис. 1a). Диаметр стволика у корневой шейки также увеличился в среднем с 1,6 мм в июне до 3,9 мм в сентябре, колеблясь от 1,8 до 7,5 мм. У части растений наблюдали образование боковых побегов в нижней части стебля (рис. 1b), что свойственно карельской березе и косвенно свидетельствует о формировании в дальнейшем узорчатой древесины на ранних этапах ее развития [Соколов, 1950].

Таблица 1

Высота и диаметр сеянцев карельской березы, полученных в результате свободного опыления (место сбора семян – дендропарк СПбНИИЛХа, Ленинградская область, число растений – 22) (2023 г.)

Height and diameter of curly birch seedlings obtained as a result of open pollination (seed collection site – St. Petersburg Research Institute of Forestry, Leningrad Region, number of plants 22) (2023)

Показатель	Месяц			
	июнь	июль	август	сентябрь
	Высота			
Среднее значение, см	12,7±9,4	35,0±22,7	50,6±29,0	51,4±28,6
Размах изменчивости, см	1,9–26,5	8,0–81,5	15,0–99,0	15,9–99,0
Коэффициент вариации (C), %	70,6	62,1	55,6	54,2
	Диаметр (у корневой шейки)			
Среднее значение, мм	1,6±0,6	2,8±1,3	3,7±1,5	3,9±1,6
Размах изменчивости, мм	1,1–3,1	1,7–6,0	1,8–7,5	1,8–7,5
Коэффициент вариации (C), %	33,4	39,3	42,2	41,5

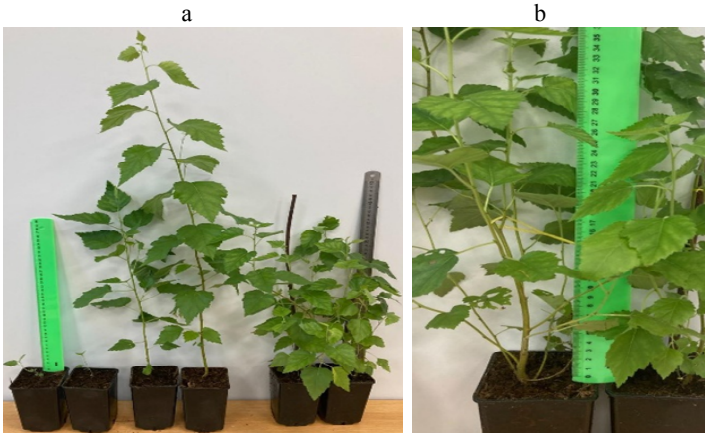


Рис. 1. Внешний вид однолетних растений карельской березы (a) и пример образования у сеянцев боковых побегов в нижней части стебля (b). Фото А.В. Жигунова

Fig. 1. The appearance of annual curly birch plants (a) and an example of the formation of lateral shoots in seedlings in the lower part of the stem (b). Photo by A.V. Zhigunov

Другую картину наблюдали в 2024 г., когда абсолютные значения ростовых показателей у сеянцев, выращенных из семян из дендропарка СПбНИИЛХа (собранных в 2023 г.), оказались значительно ниже (табл. 2), причем не только по сравнению с сеянцами, выращенными в 2023 г., но и относительно сеянцев, сбор семян которых проводился на территории Гатчинского ПЛСУ и в насаждении «Шапки» (в 2023 г.). Так, наиболее крупные сеянцы как по высоте, так и по диаметру были получены из семян Гатчинского ПЛСУ. Их высота составила в среднем 20,5 см, варьируя от 3,0 до 69,5 см (табл. 2). При этом 43% растений имели высоту менее 10 см, а 17%, наоборот, 48 см и выше. Диаметр у корневой шейки также был больше у сеянцев (в среднем 2,5 мм, варьируя от 1,0 до 8,0 мм), семена которых собраны на Гатчинском ПЛСУ. Сеянцы, выращенные из семян, собранных в насаждении «Шапки», по высоте были в 1,8 раза ниже, а по диаметру в 1,4 раза тоньше по сравнению с семенным потомством, семена которого собраны на Гатчинском ПЛСУ (табл. 2). Наименьшие значения по высоте, как отмечено выше, наблюдали у сеянцев из дендропарка СПбНИИЛХа. В среднем они были ниже на 12,3 и 3,2 см по высоте и тоньше на 0,9 и 0,2 мм по диаметру у корневой шейки по сравнению с сеянцами с Гатчинского ПЛСУ и насаждения «Шапки» соответственно. Однако по массе семена, собранные в дендропарке СПбНИИЛХа в 2023 г., были крупнее и в среднем в 1,3 раза тяжелее, чем из других насаждений в тот же год (табл. 2).

Таблица 2

Высота, диаметр и масса семян семенного потомства карельской березы, полученного в результате свободного опыления, в зависимости от места сбора семян (Ленинградская обл., 2024 г.)

Height, diameter and weight of seeds of curly birch seed progeny obtained as a result of open pollination depending on the place of seed collection (Leningrad region, 2024)

Показатель	Место сбора семян (год сбора – 2023)		
	«СПбНИИЛХ»	Гатчинский ПЛСУ	«Шапки»
	Высота		
Число деревьев, шт.	12	23	16
Среднее значение, см	8,2±4,0	20,5±20,3	11,4±13,3
Размах изменчивости, см	2,0–15,0	3,0–69,5	1,0–54,0
Коэффициент вариации (С), %	49,4	99,4	116,8
	Диаметр (у корневой шейки)		
Число деревьев, шт.	12	23	16
Среднее значение, мм	1,6±0,5	2,5±1,7	1,8±1,1
Размах изменчивости, мм	1,0–2,5	1,0–8,0	1,0–5,0
Коэффициент вариации (С), %	33,2	69,4	61,5
	Масса 500 шт. семян		
Среднее значение, мг	0,12±0,5	0,09±0,02	0,09±0,01
Размах изменчивости, мг	0,12	0,06–0,12	0,08–0,11
Коэффициент вариации (С), %	0	18,9	13,3

Существенные различия, отмеченные у сеянцев по ростовым показателям и их варьированию, нашли отражение в очень высоких значениях коэффициента вариации, особенно по высоте (99,4% – Гатчинский ПЛСУ и 116,8% – «Шапки»). Возможно, что это, хотя бы отчасти, является отражением полиморфизма жизненных форм, характерного для карельской березы (рис. 1). Неслучайно еще в 1970-е гг., на основании опытов по выращиванию карельской березы А.Я. Любавская [1966] предлагала проводить первичную сортировку сеянцев по скорости роста, разделяя быстро- и медленнорастущие растения на три группы до начала их посадки на постоянное место. Ранее, в 1930-е гг., в результате обследования природных популяций Н.О. Соколов [1950] предложил классифицировать карельскую березу по высоте как высокоствольную, короткоствольную и кустообразную.

Важным обстоятельством является тот факт, что при свободном опылении у карельской березы можно получить большое количество семян, но закрепить в потомстве ценные признаки материнских растений, обладающих узорчатой текстурой древесины, и выявить их довольно трудно.

В данной работе мы использовали молекулярный маркер BpCW1, который весьма надежно зарекомендовал себя как метод диагностики «узорчатости» у карельской березы в возрасте 15 лет и старше [Gubaev et al., 2024]. В результате ПЦР-анализа однолетнего семенного потомства от свободного опыления у 18 из 42 сеянцев получены продукты амплификации длиной 530 п.н. и/или 476 п.н. При этом у трех растений (3.1, 15.1 и 23.1) аллели (476 п.н.) были гомозиготными, а у 15 – гетерозиготными (476/530 п.н.) (рис. 2). Ранее показано, что наличие разницы в длине фрагментов (54 п.н.) обусловлено делецией, которая в семенном потомстве карельской березы проявляется у носителей признака «узорчатая древесина», а ее отсутствие и гомозиготность по аллелю, соответствующему 530 п.н., наоборот, характеризуют растения как «безузорчатые».

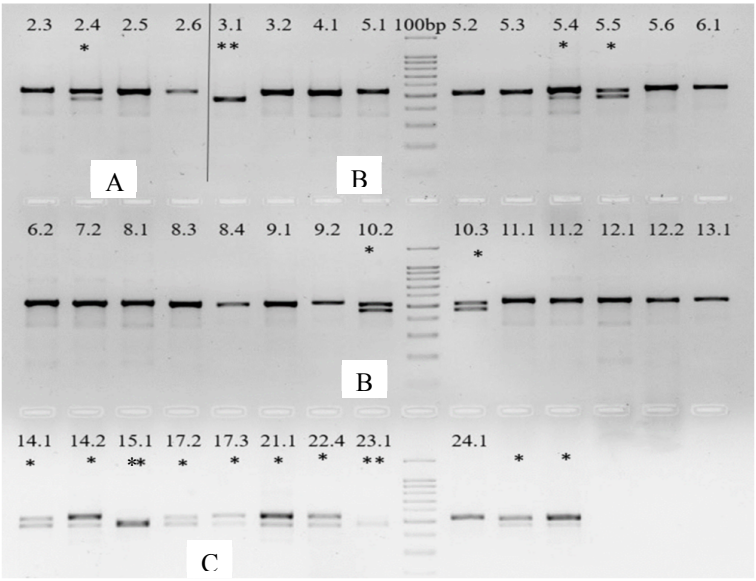


Рис. 2. Визуализация продуктов ПЦР-амплификации в гетеро- (*) или гомозиготном (**) состоянии, выявленных с использованием ДНК-маркера BpCW1, сцепленного с признаком «узорчатости» у семенного потомства, семена которого собраны в дендропарке СПбНИИЛХа (A), на Гатчинском ПЛСУ (B), в насаждении «Шапки» (C). Цифрами обозначены номера сеянцев

Fig. 2. Visualization of PCR amplification products in a hetero- (*) or homozygous (**) state, identified using the BpCW1 DNA marker linked to the “patterned” trait in seed progeny, the seeds of which were collected in the arboretum of the St. Petersburg Research Institute of Forestry (A), the Gatchina Plant Protection Plant (B), and the “Shapki” plantation (C). The numbers indicate the seedling numbers.

Соотношение «узорчатые»:«безузорчатые» среди сеянцев, семена которых собраны с деревьев, растущих в дендропарке СПбНИИЛХа, на Гатчинском ПЛСУ и в насаждении «Шапки», составило 6:6; 5:17 и 7:1 соответственно. Добавим также, что в семенном потомстве «Шапки» у 8 изученных растений не удалось получить качественное разделение полос на электрофореграмме, что связано с различными причинами.

Сравнительный анализ ростовых показателей также свидетельствует, что «безузорчатые» растения по абсолютным значениям превышали «узорчатые» независимо от места сбора семян (рис. 3a). Например, «безузорчатые» сеянцы, семена которых были собраны на Гатчинском ПЛСУ и в насаждении «Шапки», были больше «узорчатых» по высоте в 1,7 и 1,8 раза, а по диаметру – в 1,5 и 1,2 раза соответственно (рис. 3b). У сеянцев из дендропарка СПбНИИЛХа отмечена подобная тенденция, но абсолютные значения были ниже. Добавим также, что высокий размах изменчивости, выявленный по ростовым показателям у «узорчатых» особей (табл. 3), подтвердил целесообразность их разделения на группы по скорости роста до начала посадки.

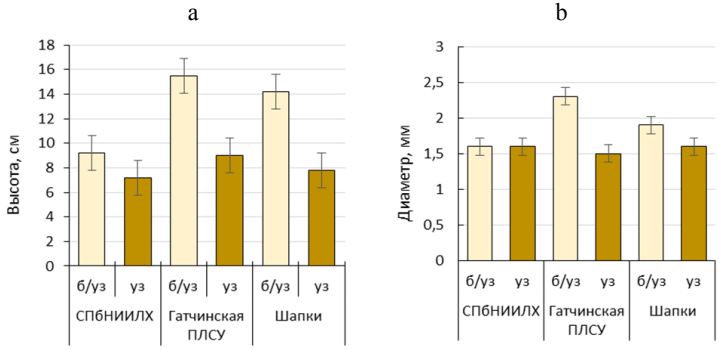


Рис. 3. Высота (a) и диаметр у корневой шейки (b) у разных форм карельской березы в зависимости от места сбора семян.
Здесь и на рис. 4: б/уз – «безузорчатые», уз. – «узорчатые» формы

Fig. 3. Height (a) and diameter at the root collar (b) of different forms of curly birch depending on the seed collection location.
Here and in Fig. 4: б/уз – “unpatterned” forms, уз. – “patterned” forms

Таблица 3

Ростовые показатели у «безузорчатых» и «узорчатых» форм карельской березы, выявленных с помощью молекулярного маркера BpCW1

Growth parameters of «patternless» and «patterned» forms of curly birch identified using the molecular marker BpCW1

Показатель	Месяц			
	июнь	июль	август	сентябрь
Карельская береза «безузорчатая» форма (n=19)				
	Высота			
Среднее значение, м	13,4±9,4	36,6±22,7	52,1±29,0	52,8±28,6
Размах изменчивости, м	1,9–26,5	8,0–81,5	15,0–99,0	15,9–99,0
Коэффициент вариации (C), %	70,6	62,1	55,6	54,2
	Диаметр (у корневой шейки)			
Среднее значение, мм	2,0±0,7	3,5±1,4	4,2±1,8	4,4±1,8
Размах изменчивости, мм	1,1–3,1	1,7–6,0	1,8–7,5	1,8–7,5
Коэффициент вариации (C), %	33,4	39,3	42,2	41,5
Карельская береза «узорчатая» форма (n=3)				
	Высота			
Среднее значение, см	–	26,0±7,9	41,5±12,7	42,8±12,9
Размах изменчивости, см	–	17,0–32,0	27,0–50,5	28,0–51,0
Коэффициент вариации (C), %	–	30,5	30,6	30,0
	Диаметр (у корневой шейки)			
Среднее значение, мм	1,2±0,2	2,1±0,8	3,2±1,1	3,4±1,2
Размах изменчивости, мм	1,0–1,3	1,3–2,8	2,2–4,3	2,3–4,7
Коэффициент вариации (C), %	13,1	35,8	32,5	35,7

Примечание. Прочерк означает отсутствие данных

Наиболее активный прирост в высоту у «безузорчатых» сеянцев наблюдали с июня по июль (рис. 4а), тогда как у «узорчатых» растений он был меньшим по величине, но более продолжительным и длился с июня по август. К началу сентября в обоих группах рост растений прекратился.

Радиальный прирост у сеянцев наиболее активно происходил до середины июля, затем его скорость уменьшилась, но ее снижение у «узорчатых» растений по сравнению с «безузорчатыми» было более плавным (рис. 4b).

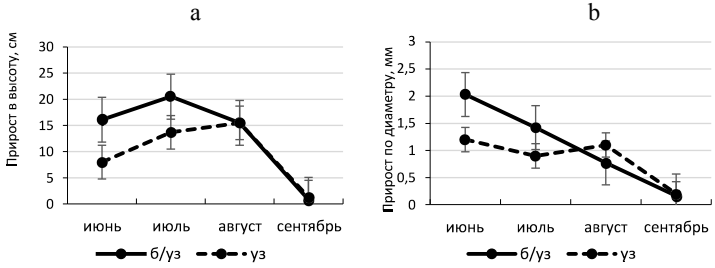


Рис. 4. Динамика прироста сеянцев разных форм карельской березы по высоте (a) и по диаметру у корневой шейки (b)

Fig. 4. Dynamics of growth of seedlings of different forms of Karelian birch by height (a) and by diameter at the root collar (b)

Выводы.

1. Семенное потомство карельской березы, полученное в результате свободного опыления, отличается по ростовым показателям значительной вариабельностью. По-видимому, в определенной степени это зависело от года (погодных условий), места сбора семян и формы роста деревьев, участвующих в опылении.

2. Использование молекулярного маркера BpCW1 позволило выявить среди однолетних сеянцев карельской березы, полученных в результате свободного опыления, потенциально «узорчатые» и «безузорчатые» растения. В частности, у 18 из 42 сеянцев идентифицированы продукты амплификации, которые характерны для «узорчатых» растений. При этом у трех из них аллели (476 п.н.) были гомозиготными, а у 15 – гетерозиготными (476/530 п.н.). Эти данные говорят о том, что в семенном потомстве карельской березы, полученном в результате свободного опыления, обязательно присутствуют растения как с признаками «узорчатой» текстуры древесины, так и с обычной прямоволокнистой, т.е. «безузорчатые». Вероятно, это объясняется тем, что карельская береза может переопыляться с деревьями других близкородственных видов березы (например, с березой повислой и березой пушистой).

3. В целом по ростовым показателям «безузорчатые» сеянцы превышали «узорчатые» независимо от места сбора семян. В среднем они были больше по высоте почти вдвое, а по диаметру – в 1,5 раза. Однако очевидно, что только этого показателя недостаточно, чтобы провести их разделение на «узорчатые» и «безузорчатые», учитывая полиморфизм жизненных форм, характерный для карельской березы. Широкий размах изменчивости ростовых показателей у «узорчатых» форм карельской березы также подтвердил целесообразность разделения ее сеянцев на группы по скорости роста на ранних этапах их развития.

4. Использование молекулярного маркера BpCW1 показало: несмотря на то, что при семенном размножении и свободном опылении карельской березы происходит расщепление признаков в потомстве, число растений с «узорчатой» древесиной может быть существенно выше, чем считалось ранее. Однако из-за низкой конкурентоспособности такие растения уступают в росте «безузорчатым» и, по всей вероятности, погибают уже на ранних этапах развития. Возможно этим, наряду с другими причинами, объясняется низкий уровень естественного возобновления карельской березы.

5. Результаты проведенной работы подтвердили вывод о возможности использования семян от свободного опыления для выращивания посадочного материала карельской березы при условии выявления у сеянцев наличия потенциальной «узорчатости» с помощью молекулярного маркера BpCW1 уже на ранних этапах их развития, что невозможно сделать обычными методами, основанными на анализе только внешних (морфологических) признаков.

Вклад авторов. Жигунов А.В. – формирование задачи, организация исследований, руководство проектом; Сафронычева Е.Д. – ПЦР-анализ; Ветчинникова Л.В. – анализ данных, их визуализация, написание и редактирование текста статьи; Титов А.Ф. – написание и редактирование текста статьи. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Сведения о финансировании исследования. Исследование выполнено за счет средств Российского научного фонда (проект № 22-16-00096-П «Выявление генетических факторов, контролирующих признак «узорчатость древесины» у карельской березы с использованием высокопроизводительного генотипирования»).

Благодарности. Авторы благодарят Е.К. Потокину, Д.С. Каржаева, В.А. Волкова, Р.Ф. Губаева, Е. Григорьеву, М.В. Тисс и всех других участников коллектива, проводящего разносторонние исследования в рамках проекта РНФ.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф. Карельская береза: разновидность или самостоятельный вид? // ИВУЗ. Лесной журнал. 2020. № 1. С. 26–48. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-26-48.

Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф. Карельская береза: важнейшие результаты и перспективы исследований: монография. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2021. 243 с.

Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф., Костина Е.Э., Жигунов А.В. Сибсовое потомство карельской березы на Заонежской лесосеменной плантации // ИВУЗ. Лесной журнал. 2023. № 5. С. 9–26. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-9-26.

Евдокимов А.П. Биология и культура карельской березы. Л.: Изд-во ЛГУ, 1989. 222 с.

Ермаков В.И. Механизмы адаптации березы к условиям Севера. Л.: Наука, 1986. 144 с.

Жигунов А.В., Ветчинникова Л.В., Губаев Р.Ф., Каржаев Д.С., Волков В.А., Потокина Е.К. BpCW1 – молекулярный маркер для выявления генотипов карельской березы на ранних стадиях развития. Патент на изобретение РФ № 2823809. 2024.

Любавская А.Я. Селекция и разведение карельской березы. М., 1966. 124 с.

Любавская А.Я. Карельская береза. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 158 с.

Мамаев С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений. М., 1973. 284 с.

Николаевская Т.С., Ветчинникова Л.В., Лебедева О.Н., Кузнецова Т.Ю. Морфофизиологическая характеристика пыльцы различных видов березы в условиях Восточной Фенноскандии // Труды КарНЦ РАН. Сер. Биогеография. 2008. Вып. 14. С. 84–91.

Соколов Н.О. Карельская береза. Петрозаводск: Гос. изд. Карело-Финской ССР, 1950. 116 с.

Соколов Н.О. Отбор и выращивание березы карельской в Ленинградской области с использованием самосева // Лесная генетика, селекция и семеноводство. Петрозаводск, 1970. С. 277–281.

Gubaev R., Karzhaev D., Grigoreva E., Lytkin K., Safronycheva E., Volkov V., Nesterchuk V., Vetchinnikova L., Zhigunov A., Potokina E. Dissection of figured wood trait in curly birch (*Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti) using high-throughput genotyping // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. Art. no. 5058. DOI: 10.1038/s41598-024-55404-y.

Heikinheimo O. Kokemuksia visakoivun kasvatuksesta // Commun. Inst. Forest. Fenn. 1951. Vol. 39, no. 5. P. 4–26.

Johnsson H. Avkommor av masurbjork // Svenska Skogsvf. Tidskr. 1951. Bd. 49, no. 1. S. 34–45.

Larsen C.M. Masurbirk. Rejseberetning – Masurbirk i Finland // Materialet i arboretet. Dansk Skovforen. Tidsskr. 1940. Vol. 25. P. 33–72.

Rahimah A.R., Cheah S.C., Rajinder S. Freeze-drying of oil palm (*Elaeis guineensis*) leaf and its effect on the quality of extractable DNA // J. Oil Palm Res. 2006. Vol. 18. P. 296–304.

Vetchinnikova L.V., Titov A.F. Specific Characteristics of Karelian Birch Population Structure // Biology Bulletin Reviews. 2021. Vol. 11, no 4. P. 414–427. DOI: 10.1134/S2079086421040095.

References

Evdokimov A.P. Biology and culture of curly birch. Leningrad: LSU, 1989. 222 p. (In Russ.)

Ermakov V.I. Mechanisms of birch adaptation to the North conditions. Leningrad: Nauka, 1986. 144 p. (In Russ.).

Gubaev R., Karzhaev D., Grigoreva E., Lytkin K., Safronycheva E., Volkov V., Nesterchuk V., Vetchinnikova L., Zhigunov A., Potokina E. Dissection of figured wood trait in curly birch (*Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti) using high-throughput genotyping. *Scientific Reports*, 2024, vol. 14, art. no. 5058. DOI: 10.1038/s41598-024-55404-y.

Heikinheimo O. Kokemuksia visakoivun kasvatuksesta. *Commun. Inst. Forest. Fenn*., 1951, vol. 39, no. 5, pp. 4–26.

Johnsson H. Avkommor av masurbjork. *Svenska Skogsvf. Tidskr.,* 1951, bd. 49, no. 1, ss. 34–45.

Larsen C.M. Masurbirk. Rejseberetning – Masurbirk i Finland. *Materialet i arboretet. Dansk Skovforen. Tidsskr*., 1940, vol. 25, pp. 33–72.

Lyubavskaya A.Ya. Selection and breeding of Karelian birch. Moscow, 1966. 124 p. (In Russ.)

Lyubavskaya A.Ya. Karelian birch. Moscow: Lesnaya promyshlennost, 1978. 158 p. (In Russ.)

Mamaev S.A. Forms of intraspecific variability of woody plants. Moscow, 1973. 284 p. (In Russ.)

Nikolaevskaya T.S., Vetchinnikova L.V., Lebedeva O.N., Kuznetsova T.Yu. Morphophysiological characteristics of pollen of different birch species in the conditions of Eastern Fennoscandia. *Transactions of Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences. Ser. Biogeography*, 2008, iss. 14, pp. 84–91. (In Russ.)

Rahimah A.R., Cheah S.C., Rajinder S. Freeze-drying of oil palm (*Elaeis guineensis*) leaf and its effect on the quality of extractable DNA. *J. Oil Palm Res*., 2006, vol. 18, pp. 296–304.

Sokolov N.O. Curly birch. Petrozavodsk. 1950. 116 p. (In Russ.)

Sokolov N.O. Selection and cultivation of Karelian birch in the Leningrad region using self-seeding. *Forest genetics, selection and seed production*. Petrozavodsk, 1970, pp. 277–281. (In Russ.)

Vetchinnikova L.V., Titov A.F. Curly birch: a variety or a separate species? *IVUZ. Forestry journal*, 2020, no. 1, pp. 26–48. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-26-48. (In Russ.)

Vetchinnikova L.V., Titov A.F. Specific Characteristics of Curly Birch Population Structure. *Biology Bulletin Reviews*, 2021, vol. 11, no. 4, pp. 414–427. DOI: 10.1134/S2079086421040095.

Vetchinnikova L., Titov A. CURLY BIRCH: major research results and prospects for future research: monograph. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2021. 243 p. (In Russ.)

Vetchinnikova L.V., Titov A.F., Kostina E.E., Zhigunov A.V. Sibs progeny of curly birch on Zaonezhskaya forest seed plantation. *IVUZ. Forestry journal*, 2023, no. 5, pp. 9–26. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-9-26. (In Russ.)

Zhigunov A.V., Vetchinnikova L.V., Gubaev R.F., Karzhaev D.S., Volkov V.A., Potokina E.K. BpCW1 – a molecular marker for identifying curly birch genotypes at early stages of development. Patent for invention of the Russian Federation No. 2823809. 2024. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 29.11.2024

Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф., Сафронычева Е.Д., Жигунов А.В. Особенности роста сеянцев карельской березы, полученных в результате свободного опыления, и выявление среди них носителей признака «узорчатая древесина» с помощью молекулярного маркера BpCW1 // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 397–413. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.397-413

Приводятся результаты изучения роста однолетних сеянцев карельской березы, полученных в результате свободного опыления деревьев, произрастающих в Ленинградской области на территории Гатчинского ПЛСУ, в учебно-производственном питомнике Лисинского лесного колледжа (насаждение «Шапки») и дендропарке Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства («СПбНИИЛХ»). Показано, что ростовые показатели сеянцев существенно различались в зависимости от года и места сбора семян. Так, высота сеянцев из дендропарка СПбНИИЛХа к осени 2023 г. составила в среднем 51,4 см, а диаметр у корневой шейки – 1,6 мм. В 2024 г. наибольшие средние значения этих показателей зафиксированы у сеянцев, выращенных из семян, собранных на Гатчинском ПЛСУ (соответственно, 20,5 см и 2,5 мм), а наименьшие – у сеянцев из дендропарка СПбНИИЛХа (соответственно, 8,2 см и 1,6 мм). Использование молекулярного маркера BpCW1 позволило уже в первый год жизни сеянцев выявить среди них носителей признака «узорчатая древесина», что внешне проявляется, как правило, в возрасте 8 лет и даже позднее. В результате ПЦР-анализа у 43%

изученных сеянцев обнаружены продукты амплификации в гомо- или гетерозиготном (476 п.н. или 476/530 п.н.) состоянии, свойственные «узорчатым» растениям карельской березы, что существенно выше, чем считалось ранее для семенного потомства, полученного в результате свободного опыления. Из анализа ростовых показателей следует, что «безузорчатые» растения по средним значениям высоты и диаметра превышают «узорчатые» примерно в 1,5 раза независимо от места сбора семян. Однако только этого показателя недостаточно, чтобы провести их разделение на «узорчатые» и «безузорчатые» растения, учитывая полиморфизм жизненных форм, характерный для карельской березы. На основании проведенной работы сделан вывод о возможности использования семян от свободного опыления для выращивания посадочного материала карельской березы при условии выявления среди них носителей признака «узорчатая древесина» с помощью молекулярного маркера BpCW1, что в раннем возрасте практически невозможно сделать методами, основанными на анализе только внешних (морфологических) признаков.

Ключевые слова: карельская береза, *Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti, семенное потомство, рост, узорчатая древесина.

Vetchinnikova L.V., Titov A.F., Safronicheva E.D., Zhigunov A.V. Growth patterns of curly birch seedlings produced through open pollination and identification of the individuals carrying the ‘figured grain’ trait using BpCW1 molecular marker. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 397–413 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.397-413

The article reports the results of research on the growth of one-year-old curly birch seedlings produced through open pollination and growing in the Leningrad Region in the Gatchina permanent seed production stand (PSPS), training nursery of the Lisino Forest College (Shapki plantation), and arboretum of the St. Petersburg Forestry Research Institute (StPFRI). It is demonstrated that the seedlings’ parameters varied significantly depending on the seed collection year and method. Thus, the average height of seedlings in the StPFRI arboretum by the fall 2023 was 51.4 cm and their root collar diameter was 1.6 mm. In 2024, the average values of these parameters were the highest in seedlings grown from seeds collected in the Gatchina PSPS (20.5 cm and 2.5 mm, respectively) and the lowest in seedlings originating from the StPFRI arboretum (8.2 cm and 1.6 mm). Application of the BpCW1 molecular marker permitted detecting the seedlings with the ‘figured grain’ trait as early as in their first year, whereas this trait would normally have exterior manifestations only at 8 years of age or even later. PCR analysis revealed homo- or heterozygous (476 base pairs or 476/530 base pairs) amplification products

characteristic of figured-grain curly birch plants in 43% of the analyzed seedlings, which is notably higher than accepted previously for seed progeny from open pollination. Our analysis of the growth parameters shows that the 'non-figured' plants had approximately 1.5-fold higher average height and diameter than the 'figured' plants irrespective of the seed provenance. However, these parameters are insufficient for differentiating between 'figured' and 'non-figured' plants considering the life-form polymorphism of curly birch. It is concluded that seeds from open pollination can be used to produce curly birch planting stock provided that the 'figured grain' trait is identified in them by the BpCW1 molecular marker, which is nearly unidentifiable at an early age using conventional methods based on the analysis of exterior (morphological) traits.

K e y w o r d s : curly birch, *Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti, seed progeny, growth, patterned wood.

ВЕТЧИННИКОВА Лидия Васильевна – доцент, главный научный сотрудник лаборатории лесных биотехнологий Института леса ФИЦ «Карельский научный центр Российской академии наук», доктор биологических наук. SPIN-код: 7683-6378. ResearcherID: J-5665-2018. ORCID: 0000-0003-2091-905X.

185910, ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Россия. E-mail: vetchin@krc.karelia.ru

VETCHINNIKOVA Lidya V. – DSc (Biology), Assistant Professor, Chief Researcher in the Laboratory for Forest Biotechnology, Forest Research Institute KarRC RAS. SPIN-code: 7683-6378. ResearcherID: J-5665-2018. ORCID: 0000-0003-2091-905X.

185910. Pushkinskaya str. 11. Petrozavodsk. Russia. E-mail: vetchin@krc.karelia.ru

ТИТОВ Александр Федорович – член-корреспондент РАН, профессор, главный научный сотрудник лаборатории экологической физиологии растений Института биологии ФИЦ «Карельский научный центр Российской академии наук», доктор биологических наук. SPIN-код: 2324-5060. ResearcherID: A-6705-2014. ORCID: 0000-0001-6880-2411.

185910, ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Россия. E-mail: titov@krc.karelia.ru

TITOV Aleksandr F. – DSc (Biology), RAS Corr. Fellow, Professor, Chief Researcher in the Laboratory of Plant Ecophysiology, Institute of Biology KarRC RAS. SPIN-code: 2324-5060. ResearcherID: A-6705-2014. ORCID: 0000-0001-6880-2411.

185910. Pushkinskaya str. 11. Petrozavodsk. Russia. E-mail: titov@krc.karelia.ru

САФРОНЫЧЕВА Елизавета Дмитриевна – младший научный сотрудник Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. SPIN-код: 4971-2924. ResearcherID: JNT-0110-2023. ORCID: 0009-0001-7015-5230.

194021, Институтский пр., д. 21, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: esafronycheva@mail.ru

SAFRONYCHEVA Elizaveta D. – Junior Researcher in St. Petersburg Forestry Research Institute. SPIN-code: 4971-2924. ResearcherID: JNT-0110-2023. ORCID: 0009-0001-7015-5230.

194021. Institute av. 21. St. Petersburg. Russia. E-mail: esafronycheva@mail.ru

ЖИГУНОВ Анатолий Васильевич – профессор кафедры лесных культур Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 6704-5792. ResearcherID: AAK-8124-2020. ORCID: 0000-0001-8707-7526.

194024, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: a.zhigunov@bk.ru

ZHIGUNOV Anatolii V. – DSc (Agriculture), Professor, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 6704-5792. ResearcherID: AAK-8124-2020 ORCID: 0000-0001-8707-7526.

194024. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: a.zhigunov@bk.ru

УДК 632.51

В.Ф. Ковязин, Т.И. Балтыжакова, А.Ю. Романчиков, Н.А. Суранов

ОЦЕНКА РАСПРОСТРАНЕНИЯ БОРЩЕВИКА СОСНОВСКОГО (*HERACLEUM SOSNOWSKYI* MANDEN.) СРЕДСТВАМИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ПО ДАННЫМ АЭРОФОТОСЪЕМКИ

Введение. Одной из актуальных проблем современной экологии является распространение инвазивных видов растений, таких как борщевик Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.). Этот вид активно вытесняет другие, местные виды растений, что приводит к снижению биоразнообразия в природных экосистемах [Dueñas et al., 2021]. Кроме негативного влияния на экосистемы борщевик также опасен для человека, поскольку его сок содержит фототоксичные вещества и при контакте с кожей под воздействием солнечного излучения вызывает сильные ожоги [Bogdanov et al., 2021]. Экономический ущерб заключается в том, что борщевик Сосновского быстро распространяется по землям всех категорий и интенсивно заселяет придорожные полосы и сельскохозяйственные угодья.

Появление борщевика Сосновского в центральной и северо-западной частях России произошло в 40-е гг. XX века, когда его предполагалось использовать в качестве кормовой культуры для скота. Его преимущество как кормовой культуры состоит в высокой урожайности, быстром росте, высоком содержании белков в биомассе и устойчивости к неблагоприятным условиям.

Позже стало известно о его токсичности и агрессивном распространении, что послужило причиной отказа от его использования [Богданов и др., 2020], однако этот вид успел широко распространиться по центральной и северо-западной частям России. Свой вклад в этот процесс внесла ликвидация крупных сельскохозяйственных предприятий после распада СССР, вследствие чего значительные площади земель стали неиспользуемыми и начали активно зарастать борщевиком [Нецветова, Саловаров, 2022].

На сегодняшний день борщевик занимает значительные площади. В соответствии с прогнозом ученых из Сколтеха [Koldasbayeva et al., 2022] к 2060-м гг. он распространится еще больше. На рис. 1 представлены карты прогнозного распространения борщевика в европейской части России на период 2040-2060 гг. Одной из предпосылок его распространения является

повышение влажности в сочетании с глобальным потеплением, которое создает идеальные условия для роста борщевика, особенно в северо-западных регионах России [Далькэ и др., 2018].

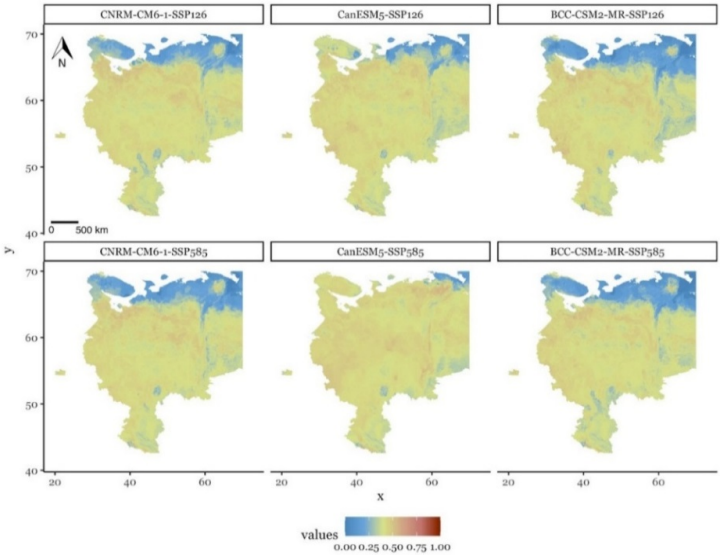


Рис. 1. Карты прогнозного распространения борщевика на территории европейской части РФ в 2040-60 гг. Красный цвет соответствует высокому риску распространения борщевика, темно-желтый – умеренному, синий – низкому [Koldasbayeva et al., 2022]

Примечание. В вертикальных рядах показаны модели глобального потепления (CNRM-CM6-1, CanESM5 и BCC-CSM2-MR), в верхней строке – оптимистичный сценарий сокращения атмосферных выбросов (SSP126), в нижней – пессимистичный (SSP585).

Fig. 1. Maps of the predicted distribution of hogweed in the European part of the Russian Federation in 2040-60. Red color corresponds to a high risk of spreading hogweed, dark yellow corresponds to a moderate risk, blue corresponds to a low risk [Koldasbayeva et al., 2022]

С учетом вышесказанного можно судить о высокой скорости распространения, агрессивности и токсичности вида, что подтверждает необходимость срочной борьбы с борщевиком уже сейчас. Перед планированием мероприятий по уничтожению борщевика на конкретной территории важно предварительно оценить его распространение. Для поиска и выявления

мест расположения инвазивной растительности эффективны методы дистанционного зондирования Земли, которые позволяют оперативно получать достоверные данные [Рутман и др., 2018]. При этом у аэрофотосъемки (АФС) есть преимущество перед спутниковой, так как она позволяет получать снимки с лучшим разрешением и, соответственно, обнаруживать на них растения меньшего размера. Таким образом, для предварительного охвата обширных территорий эффективно использовать спутниковые снимки, а для дальнейшего детального мониторинга на уровне муниципальных образований целесообразно применять АФС.

На рис. 1 демонстрируется, что при любых траекториях глобального потепления борщевик Сосновского продолжит свое распространение на европейской части России.

После получения данных дистанционного зондирования (спутниковых и аэрофотоснимков) важным этапом становится обоснованный выбор алгоритма автоматизированной обработки изображений [Осипов и др., 2021].

Машинные методы обработки данных сводятся к задачам классификации. В пиксельно-ориентированных методах каждый пиксель относится к определенному классу на основе спектральной информации. В объектно-ориентированных методах группа пикселей объединяется в объект, который затем анализируется как единое целое. При этом учитывается не только значение пикселя, но и информация о форме и текстурах [Marpu et al., 2008].

В группу пиксельно-ориентированных методов входят следующие:

- Дерево классификации и регрессии (Classification and Regression Tree (CART): заключается в построении дерева принятия решений для определения класса пикселя [Shetty, 2019];
- Метод случайного леса (Random Forest (RF) – усовершенствованный предыдущий метод, в котором строится ансамбль деревьев принятия решения [Xie, 2019];
- Метод опорных векторов (Support vector machine (SVM): алгоритм формирует линию или гиперплоскость, которая классифицирует данные, разделяя их на разные классы [Talukdar et al., 2020];
- Метод минимального расстояния (Minimal distance (MD): для каждого класса вычисляется средний вектор спектральных характеристик, после чего определяется расстояние между ним и вектором значений пикселя [Basheer et al., 2022];
- Метод максимального правдоподобия (Maximum Likelihood (ML): определяется вероятность принадлежности пикселя к конкретному классу,

при этом предполагается, что значения признаков следуют нормальному распределению с учетом априорной вероятности для каждого класса [Norovsuren et al., 2019].

В настоящей работе анализируется возможность идентификации борщевика Сосновского по материалам дистанционного зондирования с использованием перспективных методик обработки изображений.

В исследовании применяются объектно-ориентированная классификация (ООК) и алгоритм «Случайный лес» (RF). Объектно-ориентированная классификация работает с группой пикселей, дополнительные степени свободы позволяют лучше распознавать объекты, игнорируя шумы на изображении [Гурченков и др., 2017]. Алгоритм «Случайный лес» эффективно классифицирует данные, учитывая не только цвет, но и текстуру.

Эти методы считаются более гибкими и точными по сравнению с классическими подходами. Они хорошо справляются с распознаванием сложных структур и текстур растений. По результатам работы методик проведена оценка точности и сделан вывод об их пригодности.

Целью настоящей работы является изучение эффективности применения методов автоматизированной классификации для обнаружения борщевика Сосновского на территории Ленинградской области с применением данных дистанционного зондирования.

Практическая значимость результатов исследования заключается в их применении для разработки стратегий по контролю распространения борщевика Сосновского и сохранению разнообразия видов в экосистеме.

Материалы и методика исследования. Для исследования использованы 2 разных типа исходных данных.

1. Аэрофотоснимки, полученные беспилотным воздушным судном (БВС) «Геоскан 201». Съемка проведена в июле 2023 г., в период цветения борщевика Сосновского. В это же время в Ленинградской области цветут многие другие зонтичные травянистые растения: сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria* L.), дикая морковь (*Daucus carota* L.), дудник лекарственный (*Angelica archangelica* L.) и пастернак посевной (*Pastinaca sativa* L.) [Jahodova…, 2009; *Aegopodium*…, 2025]. Пространственное разрешение снимков, или ground sample distance (GSD) – 3 см/пикс. Территория съемки расположена юго-западнее п. Оредеж в Лужском районе Ленинградской области, сам аэрофотоснимок показан на рис. 2. На изображении можно распознать травянистую и кустарниковую растительность, среди которых встречаются белые вкрапления борщевика Сосновского. Этот аэрофотоснимок отображает исследуемую область №1 в табл. 3.

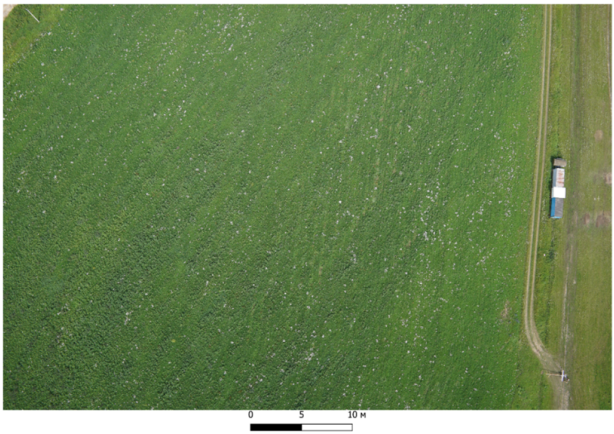


Рис. 2. Аэрофотоснимок тестового участка в Лужском районе Ленинградской области, полученный беспилотным воздушным судном «Геоскан 201» с пространственным разрешением 3 см/пикс.

Fig. 2. The image of the aerial photography of the test site in the Luga district of the Leningrad region, obtained by the Geoscan 201 unmanned aerial vehicle with a spatial resolution of 3 cm/pixel

Перед выполнением аэрофотосъемки проводились подготовительные полевые работы, которые заключались в выезде на местность, верификации местоположения борщевика Сосновского, планировании полетного задания, подготовки БВС к взлету и выполнении полета. Полет выполнен преимущественно над открытым полем с минимальным древесным покровом (доля деревьев и высоких кустарников ниже 10%), что позволило сконцентрироваться на тестировании методики автоматизированной классификации и не предусматривало выделения борщевика под кронами в придорожных полосах. Если же говорить о необходимости выделения борщевика под кронами, то лучшим решением станет использование NDVI и других спектральных вегетационных индексов.

Отличительным признаком борщевика Сосновского при проведении аэрофотосъемки в период вегетации является характерный белый цвет соцветия. Также можно выделить текстурную однородность внутри соцветия.

2. Открытые данные с веб-ресурса Яндекс.Карты [Спутниковая…, 2024]. Съемка проведена летом 2022 г., скриншоты сделаны при GSD 15 см/пикс. и 30 см/пикс. Выбраны две тестовые области на территории д. Ручьи и г. Мурино Ленинградской области. Примеры изображений одной и той же территории при разном GSD приведены на рис. 3 и 4. Эти два изображения характерны для тестового участка № 2 в табл. 2.

Рис. 3. Аэрофотоснимок тестового участка на территории д. Ручьи Ленинградской области, полученный по данным Яндекс.Карты с GSD 15 см/пикс. [Спутниковая…, 2024]

Fig. 3. Aerial view of the test site in the village of Ruchi, Leningrad region, obtained according to Yandex.Maps with GSD 15 cm/pixel [Спутниковая…, 2024]

Рис. 4. Аэрофотоснимок тестового участка на территории д. Ручьи Ленинградской области, полученный по данным Яндекс.Карты с GSD 30 см/пикс. [Спутниковая…, 2024]

Fig. 4. Aerial view of the test site in the village of Ruchyi, Leningrad region, obtained according to Yandex.Maps with GSD 30 cm/pixel [Спутниковая…, 2024]

Данные, полученные с Яндекс.Карт, преобразовали в плоскую прямоугольную систему координат в универсальной поперечной проекции Меркатора UTM 36N (EPSG:32636). Данная операция была обязательной, поскольку на исходных снимках отсутствуют координаты, из-за чего они непригодны для геопространственных операций. Хотя в QGIS существуют онлайн-подложки, они подключаются как «живые» сервисы и не позволяют применять различные растровые операции обработки к пикселям.

Применение разных видов исходных материалов позволит оценить их пригодность для выявления борщевика. В отличие от данных АФС, где борщевик представлен отдельными кустами, на данных с Яндекс.Карт отмечаются крупные заросли, что может повлиять на итоговую точность классификации. Важно отметить, что данные с Яндекс.Карт являются открытыми.

Основным используемым программным обеспечением в работе является геоинформационная система QGIS. В этой программе проведена обработка исходных аэрофотоснимков, выполнена классификация и рассчитана площадь, занимаемая борщевиком.

В процессе детектирования борщевика на тестовых участках использовался следующий порядок действий:

- Машинное обучение методом RF (программа QGIS, модуль «dzetsaka»):
  1. подготовка обучающей выборки (векторные полигоны);
  2. выполнение алгоритма RF;
  3. визуальная оценка полученных растровых карт;
  4. фильтрация шумов;
  5. автоматическая векторизация растра;
  6. подсчет площади, занимаемой борщевиком Сосновского.
- Объектно-ориентированная классификация (программа QGIS, модуль «Orfeo Toolbox» (OTB):
  1. автоматическая сегментация исходного изображения;
  2. расчет спектральных характеристик каждого сегмента (зональная статистика);
  3. подготовка обучающей выборки (точечный слой);
  4. объединение атрибутов по расположению (классы обучающей выборки присваиваются соответствующим сегментам);
  5. обучение модели;
  6. классификация с применением полученной модели;
  7. подсчет площади, занимаемой борщевиком Сосновского.

Качество результатов определения площади территории, занимаемой борщевиком, оценивалось путем сравнения с площадями, полученными в результате экспертного дешифрирования, а также анализа матрицы ошибок классификации.

При анализе матрицы ошибок классификации учитывался ряд показателей [Congalton, 1991]:

1. Общая точность классификации (Overall accuracy) (1):

$$OA = \frac{\sum D}{N} * 100, \quad (1)$$

где ΣD – сумма диагональных элементов матрицы ошибок (общее число верно классифицированных пикселей); N– общее число пикселей.

2. Точность производителя (Producer's accuracy) отражает, насколько результаты классификации соответствуют эталонным данным согласно дешифрированию эксперта (2):

$$PA = \frac{D_{ij}}{R_i} * 100, \quad (2)$$

где D_{ij} – количество правильно классифицированных пикселей в i-й строке ячейки по диагонали; R_i – общее количество пикселей в i-й строке.

3. Точность пользователя (User's Accuracy) демонстрирует потребителю, насколько класс объектов соответствует действительности (3):

$$UA = \frac{D_{ij}}{C_j} * 100, \quad (3)$$

где D_{ij} – количество правильно классифицированных пикселей в j-м столбце ячейки по диагонали; C_j – общее количество пикселей в j-м столбце

4. Средняя точность производителя MPA (4):

$$MPA = \frac{\sum PA_{ij}}{M}, \quad (4)$$

где M – количество классов объектов.

5. Средняя точность пользователя MUA (5):

$$MUA = \frac{\sum UA_{ij}}{M}. \quad (5)$$

6. Средневзвешенная точность (Mean Accuracy) (6):

$$MA = \frac{OA + UA}{2}. \quad (6)$$

7. Пропуск классификации (Omission error) отображает число контрольных точек, которых не хватает в каждом классе (7):

$$OE = 100 - RA. \quad (7)$$

8. Ложная классификация (Comission error) отображает число лишних контрольных точек, определенных в каждый класс (8):

$$CE = 100 - UA. \quad (8)$$

9. Коэффициент каппа κ, который сопоставляет число точек в каждой из ячеек матрицы с возможностью распределения контрольных точек как случайной величины (9):

$$\kappa = \frac{N\sum_{\substack{i=1\\j=1}}^{m} D_{ij} - \sum_{\substack{i=1\\j=1}}^{m} R_i * C_j}{N^2 - \sum_{\substack{i=1\\j=1}}^{m} R_i * C_j}. \quad (9)$$

Коэффициент каппа представляет собой комплексный показатель точности классификации. Он изменяется в пределах от 0 до 1 и показывает согласованность классификации: чем значение ближе к 1, тем более согласован результат. Его значение можно интерпретировать в соответствии с критериями согласия Лэндиса и Коэна.

Результаты исследования. Перед проведением классификации алгоритмом RF составлена обучающая выборка, которая включает в себя классы, выявленные в ходе анализа изображения (табл. 1).

Таблица 1

Выявленные на изображении классы объектов

Classes of objects identified in the image

№	Наименование класса
1	Борщевик Сосновского (*Heracleum sosnowskyi*)
2	Кустарниковая и древесная растительность
3	Травянистая растительность
4	Асфальтовое покрытие
5	Грунтовое покрытие
6	Иные объекты искусственного происхождения
7	Водные объекты

Примечание: в 6-й класс включены все прочие объекты искусственного происхождения

Обучающая выборка представляет собой векторные полигональные объекты, покрывающие анализируемые изображения. В атрибутах полигонов указаны номер и наименование классов. Пример подготовленной обучающей выборки для одного из изображений приведен на рис. 5.

Рис. 5. Пример формирования обучающей выборки для изображения тестового участка на территории д. Ручьи Ленинградской области. Фиолетовыми контурами на изображении показаны границы отдельных классов объектов

Fig. 5. An example of the formation of a training sample for the image of a test site in the village of Ruchyi, Leningrad region. The purple outlines in the image show the boundaries of individual classes of objects

Для повышения точности выявления зарослей борщевика Сосновского в классе № 6 выделено значительное количество искусственных объектов. Именно в этом классе сосредоточено большое разнообразие элементов, схожих по цвету и текстуре с борщевиком, и способных снизить точность его определения. Другие выделяемые классы, например, древесная растительность, на результат выделения борщевика влияют в меньшей степени. Количество классов в задаче определяется наличием различных объектов на снимках и не связано напрямую с точностью выделения конкретного вида. Точность классификации зависит от качества и достаточности обучающей выборки, а не от числа классов. После подготовки обучающей выборки проводилась процедура обработки алгоритмом RF, по результатам которой получена классификационная карта (рис. 6). Далее проводилась фильтрация шумов. В данном случае под шумом понимается неверно классифицирован-

ный вследствие схожести спектральных характеристик пиксель. Использован модальный вид фильтрации, который возвращает наиболее часто встречающееся значение внутри окна фильтрации. Помимо стандартного окна фильтрации размером 3х3 пикселя дополнительно была проведена фильтрация с размером окна 7х7 пикселей, что позволило более эффективно устранить шумы, однако увеличение размера окна фильтрации могло привести к потере некоторых данных. Отфильтрованная классификационная карта отражена на рис. 7. По ней проведена автоматическая векторизация и расчет площади, занимаемой борщевиком, при помощи калькулятора полей.

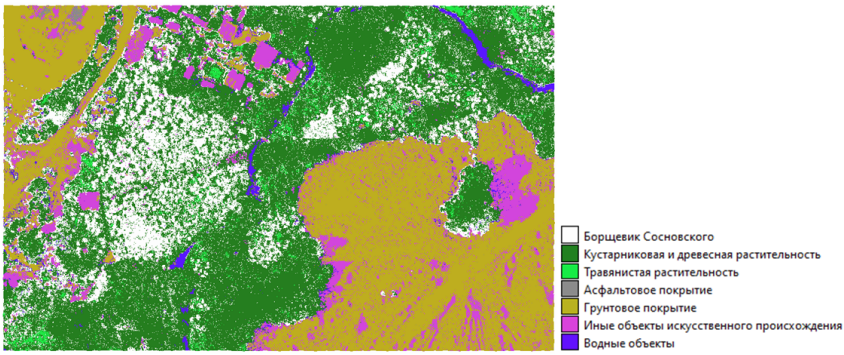


Рис. 6. Классификационная карта, полученная в результате обработки материалов аэрофотосъемки алгоритмом RF

Fig. 6. A classification map obtained as a result of processing aerial photography materials using the RF algorithm

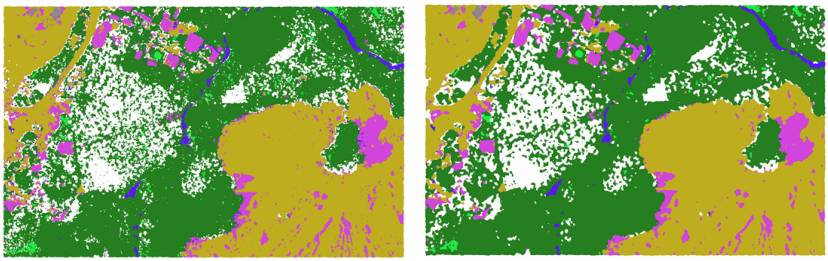


Рис. 7. Классификационная карта после применения алгоритма фильтрации (слева окно фильтрации 3х3, справа –7х7)

Fig. 7. Classification map after applying the filtering algorithm (3x3 filtering is on the left, 7x7 on the right)

Для анализа изображений методом ООК использованы инструменты, которые внедрены в программу с модулем Orfeo Toolbox. Первым этапом объектной классификации является автоматическая сегментация изображений (инструмент «Segmentation»), результат которой приведен на рис. 8.

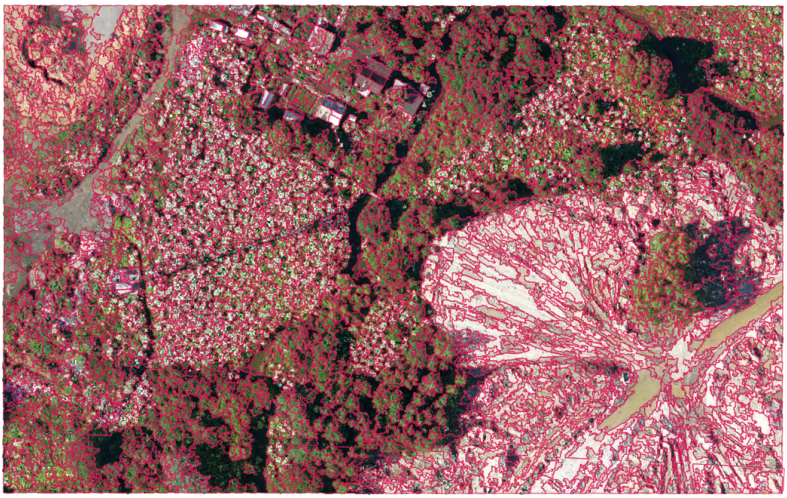


Рис. 8. Аэрофотоснимок тестового участка, полученный по данным Яндекс.Карты, с результатами автоматической сегментации . Красные линии – границы выделенных сегментов

Fig. 8. An aerial view of the test area obtained from Yandex.Maps, with the results of automatic segmentation. The red lines are the boundaries of the highlighted segments

С целью дальнейшего обучения модели проведен расчет спектральных характеристик сегментов, наиболее важными из которых являются среднее значение и стандартное отклонение пикселей в сегменте изображения. В качестве обучающей выборки здесь используется точечный слой, ее подготовка осуществляется после проведения сегментации. Значение класса в обучающей выборке перенесено на ближайший сегмент карты. Таким образом, получены сегменты с верным значением класса, на основе которых и происходит обучение модели. С использованием полученной модели выполнена классификация. Результатом стала векторная карта местности, по которой проведен расчет площади класса «Борщевик». Полученная классификационная карта приведена на рис. 9.

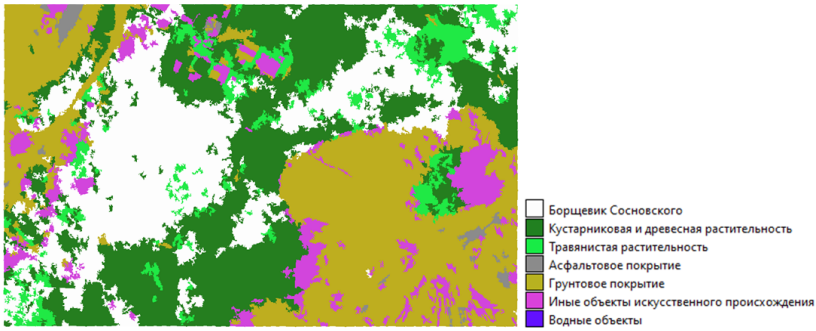


Рис. 9. Итоговая классификационная карта (метод объектной классификации)
Fig. 9. Final classification map (object-based classification)

При рассмотрении итоговых классификационных карт, полученных двумя разными методами обработки изображений, заметно, что карта, полученная объектным способом, содержит более однородные участки и на ней более четко выделяются объекты.

Обработка изображений с GSD 3 см/пикс., полученных в результате аэрофотосъемки (АФС), проводилась аналогичным образом.

В табл. 2-3 приведены расхождения площадей, полученных в результате классификации, с площадями, полученными в результате визуального дешифрирования и векторизации. Важно учитывать, что такой способ не подтверждает верное расположение борщевика на изображении, то есть не оценивает точность работы классификатора.

Согласно оценке отклонения площадей от эталонного значения в табл. 2 наиболее точным методом можно назвать объектно-ориентированный. Это может быть связано с тем, что на используемых открытых данных хорошо видны крупные заросли борщевика, легко распознаваемые как целостные объекты. При использовании фильтрационного окна размером 3х3 часто остаются отдельные шумы, что снижает общую точность. Так, на одном из тестовых участков ошибка достигла 53%. Если сравнивать между собой результаты, полученные на основе данных с разным пространственным разрешением, то, как можно было ожидать, более детальное изображение с GSD 15 см/пикс. дало более точные результаты, чем GSD 30 см/пикс.

Результаты подсчета площади по АФС отличаются. Лучшие результаты получены при использовании окна фильтрации 3х3. Это объясняется тем, что на исходных снимках борщевик представлен отдельными растениями. Алгоритмы сегментации группируют пиксели в более крупные области, учитывая их пространственные взаимосвязи, из-за чего захватываются дополнительные площади.

Таблица 2

Отклонения площадей от результатов экспертного дешифрирования (по открытым данным)

Deviations of areas from the results of expert decryption (open data)

№	Отклонения площади					
	Пространственное разрешение 15 см					
	Объектный метод		Фильтрация 3х3		Фильтрация 7х7	
	$м^2$	%	$м^2$	%	$м^2$	%
Участок №1	+169,9	+3,0	+211,9	+3,7	+22,0	+0,4
Участок №2	+123,4	+1,7	+140,7	+2,0	–194,4	–2,7
Участок №3	+237,8	+14,8	–273,8	–17,0	–539,1	–33,5
	Пространственное разрешение 30 см					
Участок №1	+1571,6	+7,5	+2839,8	+13,5	+2092,3	+10,0
Участок №2	+832,7	+2,6	+1579,8	+5,0	–3423,0	–10,8
Участок №3	+85,0	+2,9	+1579,0	+53,2	–464,5	–15,6

Таблица 3

Отклонения площадей от результатов экспертного дешифрирования (по данным АФС)

Deviations of areas from the results of expert decryption (aerial photography)

№	Отклонения площади					
	Объектный метод		фильтрация 3х3		фильтрация 7х7	
	$м^2$	%	$м^2$	%	$м^2$	%
Исследуемая область № 1	+643,8	+42,6	–316,1	–20,9	–430,9	–28,5
Исследуемая область № 2	+443,2	+84,9	+28,4	+5,5	–73,5	–14,1

Анализ точности работы классификатора позволяет установить, насколько тесно классы объектов на снимке соответствуют информационным классам на местности. Оценка выполнялась с применением матрицы ошибок, содержащей погрешность классификации каждого класса. Размерность квадратной матрицы равна числу классов.

Для вычисления матрицы ошибок использован модуль ОТВ. Входящими данными являются итоговые растровые классификационные карты и векторный слой контрольных точек.

Количество контрольных точек равнялось 50. По матрице ошибок рассчитывается ряд статистических параметров точности классификации,

в соответствии с формулами (1)–(9). Эти параметры вычислены для каждой матрицы ошибок, полученной по различным классификационным картам разными методами обработки (24 матрицы). Пример итогового расчета представлен в табл. 4, основная часть которой представляет собой матрицу ошибок классификации. Диагональные элементы матрицы – верно классифицированные данные. Значение «2» в шестой строке пятого столбца говорит о том, что 2 контрольные точки, относящиеся к искусственным объектам, неверно классифицированы как грунт.

Таблица 4

Пример матрицы ошибок и расчета статистических показателей точности классификации

An example of an error matrix and calculation of statistical classification accuracy indicators

Эталон	Классифицируемые данные							∑	PA, %	OE, %
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.			
1.	13	1	0	0	0	0	0	14	92,9	7,1
2.	0	9	0	0	0	0	0	9	100,0	0,0
3.	1	1	3	0	0	0	0	5	60,0	40,0
4.	0	0	0	3	0	0	0	3	100,0	0,0
5.	0	0	0	0	10	0	0	10	100,0	0,0
6.	0	0	0	0	2	4	0	6	66,7	33,3
7.	0	1	1	0	1	0	0	3	0,0	100,0
∑	14	12	4	3	13	4	0	50	MPA 74,2%	MUA 86,6%
UA, %	92,9	75,0	75,0	100,0	76,9	100,0	0,0	–	OA 84,0%	MA 85,3%
CE, %	7,1	25,0	25,0	0,0	23,1	0,0	0,0	–	κ=0,80	

Примечание: Классы указаны в соответствии с табл. 1. OA – общая точность классификации, PA – точность производителя, UA – точность пользователя, MPA – средняя точность производителя, MUA – средняя точность пользователя, MA – средневзвешенная точность, OE – пропуск классификации, CE – ложная классификация, κ – коэффициент каппа, который сопоставляет число точек в каждой из ячеек матрицы с возможностью распределения контрольных точек как случайной величин. κ показывает согласованность классификации: чем значение ближе к 1, тем более согласован результат. Выделение цветами использовано для улучшения восприятия таблицы

Аналогичным образом проведен анализ точности работы классификатора каждого из автоматизированных методов обработки изображений.

По результатам анализа достоверности классификационных карт, полученных по открытым данным, можно судить о высоком уровне точности классификации. Наиболее точным методом можно назвать объектно-ориентированный. Коэффициент каппа принимает значения от 0,63 до 0,83 (в среднем 0,80). Это говорит о существенной согласованности результатов.

Точность классификации аэрофотоснимков также имеет высокие значения от 0,73 до 0,82 (в среднем 0,77).

Обсуждение. Результаты использования автоматизированных методов обработки изображений для обнаружения борщевика Сосновского продемонстрировали высокие показатели точности.

В ходе применения первого метода оценки точности получилось так, что для используемых открытых данных наилучшим методом стала объектно-ориентированная классификация, а для снимков АФС, имеющих меньшее GSD, – метод RF с наименьшим размером окна фильтрации 3x3. Это связано с особенностями зарастания тестовых участков, так как на участках, где осуществлялась АФС, борщевик представлен в виде отдельных растений, а на участках, взятых из открытых данных, – крупными зарослями. Высокая ошибка классификации обуславливается спецификой объектного метода, который объединяет пиксели в крупные кластеры объектов, тем самым охватывая избыточные области. Исходя из этого можно говорить о том, что метод обработки нужно подбирать под имеющиеся исходные данные, чтобы обеспечить получение максимальной точности.

Результаты второго метода оценки точности говорят о высокой точности работы классификатора для всех применяемых методов. Таким образом, объектная классификация в случае представления борщевика в виде отдельных растений верно его идентифицирует, но неверно оценивает занимаемую им площадь.

Представленные в работе алгоритмы могут быть использованы для обнаружения борщевика Сосновского на более крупных территориях (например, на территории Ленинградской области). При этом используемые модели классификации еще нуждаются в доработках и корректировках, так как другие территории могут содержать иные объекты, влияющие на общую точность.

Заключение. Применение методик, используемых в исследовании, позволяет обнаруживать борщевик Сосновского и эффективно планировать

дальнейшие мероприятия по борьбе с ним. При этом использованы современные автоматизированные технологии обработки, обеспечивающие высокую производительность труда и достоверность результатов.

Вклад авторов. Суранов Н.А. – разработка методики, выполнение аналитических расчетов, оценка точности результатов исследования; Ковязин В.Ф. – оценка результатов исследования, анализ практической значимости, подготовка статьи к публикации; Балтыжакова Т.И. – анализ результатов расчетов, подготовка статьи к публикации; Романчиков А.Ю. – разработка методики, подготовка статьи к публикации.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Богданов В.Л., Осипов А.Г., Гарманов В.В. Методика мониторинга засорения земель борщевиком Сосновского по данным дистанционного зондирования // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2020. № 59. С. 69-74.

Гурченков А.А., Мурынин А.Б., Трекин А.Н., Игнатьев В.Ю. Метод объектно-ориентированной классификации объектов подстилающей поверхности в задаче аэрокосмического мониторинга состояния импактных районов Арктики // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Естественные науки. 2017. № 3. С. 135-146.

Далькэ И.В., Чадин И.Ф., Захожий И.Г., Малышев Р.В., Маслова С.П. Моделирование географических пределов распространения *Heracleum sosnowskyi* Manden. в таежной зоне европейской части России // Экология и география растений и растительных сообществ: мат. IV Межд. науч. конф. Екатеринбург, 2018. С. 219-224.

Нецветова Е.В., Саловаров В.О. Борьба с инвазивными чужеродными видами в концепции Конвенции о биологическом разнообразии // Вестник ИрГСХА. 2022. № 112. С. 121-136.

Рутман В.В., Кантор Г.Я., Адамович Т.А., Товстик Е.В., Ашихмина Т.Я. Идентификация зарослей борщевика Сосновского по данным дистанционного зондирования земли // Экология родного края: проблемы и пути их решения: мат. XIII Всерос. науч.-практ. конф. с межд. уч. Киров, 2018. С. 81-85.

Осипов А.Г., Дмитриев В.В., Ковязин В.Ф. Методика оценки и картографирования природно-аграрного потенциала ландшафтов // Геодезия и картография. 2021. Т. 82, № 9. С. 11-20.

Спутниковая карта Санкт-Петербурга // Яндекс.Карты. URL: https://yandex.ru/maps/2/saint-petersburg/sputnik/ (дата обращения: 01.06.2024).

Aegopodium podagraria // Plants for a future. URL: https://pfaf.org/user/plant.aspx?LatinName=Aegopodium+podagraria (дата обращения: 05.05.2025).

Basheer S., Wang X., Farooque A.A., Nawaz R.A., Liu K., Adekanmbi T., Liu S. Comparison of Land Use Land Cover Classifiers Using Different Satellite Imagery and Machine Learning Techniques // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, no. 19. Art. no. 4978.

Bogdanov V., Osipov A., Garmanov V., Efimova G., Grik A., Zavarin B., Terleev V., Nikonorov A. Problems and monitoring the spread of the ecologically dangerous plant *Heracleum sosnowskyi* in urbanized areas and methods to combat it // E3S Web Conf. EDP Sciences. 2021. Vol. 258. Art. no. 08028.

Congalton R.G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data // Remote Sensing of Environment. 1991. Vol. 37. P. 35-46.

Dueñas M.A., Hemming D.J., Roberts A., Diaz-Soltero H. The threat of invasive species to IUCN-listed critically endangered species: A systematic review // Glob. Ecol. Conserv. 2021. Vol. 26. Art. no. 01476.

Jahodova S. Heracleum sosnowskyi (Sosnowskyi's hogweed) // CABI Compendium. 2009. No. 108958. DOI: 10.1079/cabicompendium.108958.

Koldasbayeva D., Tregubova P., Shadrin D., Gasanov M., Pukalchik M. Large-scale forecasting of *Heracleum sosnowskyi* habitat suitability under the climate change on publicly available data // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. Art. no. 6128.

Marpu P.R., Niemeyer I., Nussbaum S., Gloaguen R. A procedure for automatic object-based classification // Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Berlin, 2008. Chapter 2.4. P. 169-184.

Norovsuren B., Tseveen B., Batomunkuev V., Renchin T., Natsagdorj E., Yangiv A., Mart Z. Land cover classification using maximum likelihood method (2000 and 2019) at Khandgait valley in Mongolia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 381, no. 1. Art. no. 012054.

Shetty S. Analysis of Machine Learning Classifiers for LULC Classification on Google Earth Engine: master's thesis. Enschede, The Netherlands: University of Twente, 2019. 73 p.

Talukdar S., Singha P., Mahato S., Fahad S., Pal S., Liou Y-A., Rahman A. Land-use land-cover classification by machine learning classifiers for satellite observations – a review // Remote Sensing. 2020. Vol. 2, no. 7. Art. no. 1135.

Xie Z., Chen Y., Lu D., Li G., Chen E. Classification of land cover, forest, and tree species classes with Ziyuan-3 multispectral and stereo data // Remote Sensing. 2019. Vol. 11, no. 2. Art. no. 164.

References

Aegopodium podagraria // Plants for a future. URL: https://pfaf.org/user/plant.aspx?LatinName=Aegopodium+podagraria (accessed: 05.05.2025).

Basheer S., Wang X., Farooque A.A., Nawaz R.A., Liu K., Adekanmbi T., Liu S. Comparison of Land Use Land Cover Classifiers Using Different Satellite Imagery and Machine Learning Techniques. *Remote Sensing*, 2022., vol. 14, no. 19, art. no. 4978.

Bogdanov V.L., Osipov A.G., Garmanov V.V. Methodology for monitoring land contamination with Sosnowsky's hogweed according to remote sensing data. *Izvestiya Saint-Petersburg state agrarian university*, 2020, no. 59, pp. 69-74. (In Russ.)

Bogdanov V., Osipov A., Garmanov V., Efimova G., Grik A., Zavarin B., Terleev V., Nikonorov A. Problems and monitoring the spread of the ecologically dangerous plant *Heracleum sosnowskyi* in urbanized areas and methods to combat it. *E3S Web Conf. EDP Sciences*, 2021, vol. 258, art. no. 08028.

Congalton R.G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 1991, vol. 37. pp. 35-46.

Dalke I.V., Chadin I.F., Zakhozhy I.G., Malyshev R.V., Maslova S.P. Modeling of geographical distribution limits of *Heraculum sosnowskyi* Manden. in the taiga zone of the European part of Russia. *Ecology and geography of plants and plant communities: proceedings of the IV int. sci. conf*. Yekaterinburg, 2018, pp. 219-224. (In Russ.)

Dueñas M.A., Hemming D.J., Roberts A., Diaz-Soltero H. The threat of invasive species to IUCN-listed critically endangered species: A systematic review. *Glob. Ecol. Conserv.*, 2021, vol. 26, art. no. 01476.

Jahodova S. Heracleum sosnowskyi (Sosnowskyi's hogweed). *CABI Compendium*, 2009, no. 108958. DOI: 10.1079/cabicompendium.108958.

Gurchenkov A.A., Murynin A.B., Trekin A.N., Ignatiev V.Yu. Object-oriented classification of substrate surface objects in Arctic impact regions aerospace monitoring. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Natural Sciences,* 2017, no. 3, pp. 135-146. (In Russ.)

Koldasbayeva D., Tregubova P., Shadrin D., Gasanov M., Pukalchik M. Large-scale forecasting of *Heracleum sosnowskyi* habitat suitability under the climate change on publicly available data. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, art. no. 6128.

Marpu P.R., Niemeyer I., Nussbaum S., Gloaguen R. A procedure for automatic object-based classification. *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*. Berlin, 2008, chapter 2.4, pp. 169-184.

Netsvetova E.V., Salovarov V.O. The fight against invasive alien species in the concept of the Convention on Biological Diversity. *Vestnik IrGSHA*, 2022, no. 112, pp. 121-136. (In Russ.)

Norovsuren B., Tseveen B., Batomunkuev V., Renchin T., Natsagdorj E., Yangiv A., Mart Z. Land cover classification using maximum likelihood method (2000 and 2019) at Khandgait valley in Mongolia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 381, no. 1, art. no. 012054.

Osipov A.G., Dmitriev V.V., Kovyazin V.F. Methodology for assessing and mapping the natural and agricultural potential of landscapes. *Geodesy and Cartography*, 2021, vol. 82, no. 9, pp. 11-20. (In Russ.)

Rutman V.V., Kantor G.Ya., Adamovich T.A., Tovstik E.V., Ashikhmina T.Ya. Identification of thickets of Sosnowsky's hogweed according to remote sensing of the Earth. *Ecology of the native land: problems and ways to solve them:* mat. of the XIII All-Russ. sci.-pract. conf. with int. part. Kirov, 2018, pp. 81-85. (In Russ.)

Satellite map of St. Petersburg. *Yandex.Maps*. URL: https://yandex.ru/maps/2/saint-petersburg/sputnik/ (accessed: 01.06.2024). (In Russ.)

Shetty S. Analysis of Machine Learning Classifiers for LULC Classification on Google Earth Engine: master's thesis. Enschede, The Netherlands: University of Twente, 2019. 73 p.

Talukdar S., Singha P., Mahato S., Fahad S., Pal S., Liou Y-A., Rahman A. Land-use land-cover classification by machine learning classifiers for satellite observations – a review. *Remote Sensing*, 2020, vol. 2, no. 7, art. no. 1135.

Xie Z., Chen Y., Lu D., Li G., Chen E. Classification of land cover, forest, and tree species classes with Ziyuan-3 multispectral and stereo data. *Remote Sensing*, 2019, vol. 11, no. 2, art. no. 164.

Материал поступил в редакцию 31.01.2025

Ковязин В.Ф., Балтыжакова Т.И., Романчиков А.Ю., Суранов Н.А. Оценка распространения борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) средствами автоматизированной классификации по данным аэрофотосъемки // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 413–435. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.413-435

Инвазивные растения представляют собой значительную угрозу для местных экосистем и сельского хозяйства. Их быстрое распространение требует разработки эффективных методов выявления и контроля. Одним из таковых является картирование на основе данных дистанционного зондирования. Геоинформационное картирование инвазивных видов растений, в частности борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.), представляет собой актуальную задачу для экологического мониторинга. В статье рассматриваются современные методы анализа данных дистанционного зондирования для выявления территорий, занятых борщевиком Сосновского. Исследование проводилось в Ленинградской области, где проблема распространения этого растения носит острый характер. В качестве исходных данных используются аэрофотоснимки и открытые данные с картографического сервиса Яндекс.Карты с пространственным разрешением 3, 15 и 30 см/пикс., на которых отображены территории, заросшие борщевиком Сосновского. Задачи исследования заключались в разработке методики обработки изображений для обнаружения борщевика Сосновского на основе применения алгоритмов автоматизированной классификации. Программными средствами обработки данных являлись геоинформационная система QGIS, а также ее дополнительные плагины «dzetsaka» и «Orfeo Toolbox». Точность результатов исследования проверялась с использованием данных, полученных посредством экспертного дешифрирования и ручной векторизации. В результате были сформированы 24 классификационные карты, полученные разными методами автоматизированной

классификации. В ходе анализа точности получены матрицы ошибок классификации и таблицы отклонения площадей, занимаемых борщевиком Сосновского. При этом результат оценки точности классификатора свидетельствует о высокой достоверности классификации представленных методов. Представленные в исследовании алгоритмы обработки могут применяться для поиска и обнаружения борщевика Сосновского на территории Ленинградской области.

Ключевые слова: Инвазивные растения, борщевик Сосновского, мониторинг растительности, дистанционное зондирование, геоинформационные системы.

Kovyazin V.F., Baltyzhakova T.I., Romanchikov A.Yu., Suranov N.A. Assessment of the distribution of Sosnowsky's hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) habitats using automated classification based on aerial photography data. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 413–435 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.413-435

Invasive plants pose a significant threat to local ecosystems and agriculture, and their rapid spread necessitates the development of effective methods for detection and control, one of which is mapping based on remote sensing data. Geoinformation mapping of invasive plant species, particularly Sosnowsky's hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden.), is a pressing task for ecological monitoring. This study examines modern methods for analyzing remote sensing data to identify areas occupied by Sosnowsky's hogweed. The research was conducted in the Leningrad Region, where the spread of this plant is a critical issue. The input data consisted of aerial photographs and open-source data from the Yandex.Maps cartographic service with ground sample distance of 3, 15, and 30 cm/pixel, which depicted territories overgrown with Sosnowsky's hogweed. The objectives of the study were to develop an image processing technique for detecting Sosnowsky's hogweed based on the use of automated classification algorithms. The data processing was performed using the QGIS geoinformation system and its additional plugins, «dzetsaka» and «Orfeo Toolbox». The accuracy of the research results was verified using data obtained through expert classification and manual vectorization. As a result, 24 classification maps were generated using different methods of automated classification. Accuracy analysis produced error matrices and tables showing the deviation in the areas occupied by Sosnowsky's hogweed. Nevertheless, the accuracy assessment confirmed the high reliability of the presented classification methods. The algorithms developed in this study can be applied to detect and monitor Sosnowsky's hogweed in the Leningrad Region.

Keywords: invasive plants, Sosnovsky's hogweed, vegetation monitoring, remote sensing, geoinformation systems.

КОВЯЗИН Василий Федорович – профессор Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, доктор биологических наук. SPIN-код: 6311-5821. ORCID: 0000-0002-3118-8515.

199106, 21-я линия В.О., д. 2, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: vfkedr@mail.ru

KOVYAZIN Vasiliy F. – DSc (Biological), Professor of St. Petersburg Mining University. SPIN-code: 6311-5821. ORCID: 0000-0002-3118-8515.

199106. 21st line of Vasilyevskiy Island 2. St. Petersburg. Russia. E-mail: vfkedr@mail.ru

БАЛТЫЖАКОВА Татьяна Игоревна – доцент Национального исследовательского университета ИТМО, кандидат технических наук. SPIN-код: 7912-1563. ORCID: 0000-0001-9160-1167.

197101, Кронверкский пр., д. 49, лит. А, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: tatiyana.baltyzhakova@gmail.com

BALTYZHAKOVA Tatiana I. – PhD (Technical), Associate Professor of ITMO University. SPIN-code: 7912-1563. ORCID: 0000-0001-9160-1167.

197101. Kronverksky av. 49. Let. A. St. Petersburg. Russia. E-mail: tatiyana.baltyzhakova@gmail.com

РОМАНЧИКОВ Алексей Юрьевич – доцент Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, кандидат технических наук. SPIN-код: 2225-9877. ORCID: 0000-0002-4215-7837.

199106, 21-я линия В.О., д. 2, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: romanchicov@inbox.ru

ROMANCHIKOV Aleksey Yu. – PhD (Technical), Associate Professor of St. Petersburg Mining University. SPIN-code: 2225-9877. ORCID: 0000-0002-4215-7837.

199106. 21st line of Vasilyevskiy Island 2. St. Petersburg. Russia. E-mail: romanchicov@inbox.ru

СУРАНОВ Николай Алексеевич – аспирант Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 9569-8333. ORCID: 0009-0001-8087-0924.

194021, Институтский пер., д. 5., лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: nik.suranov.00@mail.ru

SURANOV Nikolay A. – PhD Student, St. Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 9569-8333 ORCID: 0009-0001-8087-0924.

194021. Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: nik.suranov.00@mail.ru

3. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ЛЕСОЗАГОТОВОК

УДК 630*812

Е.А. Баканач, С.А. Угрюмов

АНАЛИЗ РАБОТЫ МНОГООПЕРАЦИОННЫХ ЛЕСНЫХ МАШИН В УСЛОВИЯХ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА

Введение. Анализ отчетных данных лесозаготовительных машин является важным и актуальным направлением исследований в сфере лесопромышленного комплекса. В России основная часть древесины заготавливается с применением многооперационных лесных машин (харвестеров и форвардеров) по скандинавской технологии. Такие машины оборудованы бортовыми компьютерами для контроля объема, размеров и классификации качества и породы заготавливаемой древесины [Мануковский и др., 2020].

Вопрос своевременного контроля размерно-качественных характеристик заготовленной древесины, на основе которого можно оперативно корректировать работу лесозаготовительной техники, является актуальным, а его решение позволяет повысить эффективность лесозаготовки с уменьшением издержек производства [Уразова, Васильев, 2020].

В условиях спада российской экономики из-за воздействия масштабных внешнеторговых и финансовых санкций и ограничений произошло нарушение работы всех промышленных комплексов России, в том числе лесопромышленного [Цатрян, 2023; Галактионов и др., 2024].

По данным Росстата объемы лесозаготовок с 2021 по 2024 гг. снизились примерно на 20%. В 2021 г. было заготовлено 233 млн м^3 круглых лесоматериалов, в 2022 г. – 195 млн м^3 , в 2023 г. – 186…190 млн м^3, в 2024 г. – 195 млн м^3 [Лесопромышленный…, 2025]. Аналогично, примерно в такой же пропорции, уменьшилось производство продукции деревопереработки.

Европейские санкции и разрыв торгово-технологических связей стали одними из главных негативных факторов, которые осложнили развитие лесопромышленной отрасли. В частности, с 2022 г. был запрещен экспорт лесопродукции в Европу, что заставило предприятия переориентироваться на другие рынки (к примеру, китайский).

В настоящее время наблюдается относительно небольшое увеличение объемов заготовки и переработки древесины, что объясняется, во-первых, оживлением внутреннего спроса после стагнации в 2022–2023 гг., значительным увеличением экспорта лесопродукции в страны СНГ, прежде всего в Казахстан и Узбекистан, поиском партнеров в нейтральных странах и ростом экспорта в этом направлении. Динамика экспорта лесопродукции через третьи страны претерпела значительные изменения после введения санкций. Основной тренд – переориентация экспорта с европейского направления на азиатские рынки, прежде всего Китай. Также вырос экспорт в Турцию, ОАЭ, Гонконг, Корею, Иран, Таиланд, Малайзию, Ливан, Израиль, Индию, Монголию.

В России около 80% древесины заготавливается в круглом виде по сортиментной скандинавской технологии с применением многооперационных валочно-сучкорезно-раскряжевочных машин, оснащенных программным обеспечением для контроля объема и размерно-качественных характеристик заготовленной древесины, а также иных параметров [Инновационные…, 2015].

Проблема повышения качества учета, контроля размерно-качественных характеристик древесины, получаемой в процессе лесозаготовки, является одним из основных аспектов в условиях рыночных отношений для лесозаготовительных предприятий и является фактором регулирования издержек производства [Герасимов и др., 2012].

Зарубежные производители многооперационных лесных машин (к примеру, Ponsse, John Deere, Komatsu и т.д.) снабжают свою технику программным обеспечением собственной разработки для сбора и мониторинга данных о заготовке. Однако поддержка этого программного обеспечения отсутствует в РФ в условиях санкций, при этом отечественного альтернативного программного обеспечения для анализа отчетных данных харвестеров на рынке нет. Дефицит собственных отечественных решений повышает риски технологической зависимости от зарубежных производителей и снижает конкурентоспособность отрасли в целом.

Требуется разработка новых инструментов обработки данных, генерируемых в процессе лесозаготовки, что соответствует приоритетным направлениям научно-технологического развития России, согласно новой Стратегии научно-технологического развития РФ (утверждённой Указом Президента РФ № 145 от 28.02.2024 г.).

В настоящее время отсутствует программное обеспечение, которое можно было бы применять на российских предприятиях для обработки отчетных данных с различных харвестеров. Каждое фирменное программное

обеспечение (Timbermatic от John Deere, Opti от Ponsse и т.д.) имеет собственную архитектуру и закрытый характер. Это затрудняет итоговый анализ, особенно если в парке организации присутствуют машины разных производителей. Имеющиеся отчеты в бортовых компьютерах многооперационных лесозаготовительных машин в основном представлены в текстовом виде и включают в себя минимальное количество информации, что не всегда удобно и полезно. В связи с этим требуется разработка собственного программного обеспечения на основе алгоритма анализа отчетных файлов, полученных с бортовых компьютеров, который включает в себя парсинг данных, расчет ключевых статистических показателей (распределения диаметров, длин, объемов, средний сбег стволов, схемы раскряжевок и др.).

Целью работы является исследование эффективности работы многооперационных лесных машин применительно к типичным условиям Северо-Западного Федерального округа путем анализа отчетных данных из бортовых компьютеров.

Объект исследования – процесс заготовки древесины по скандинавской технологии с применением многооперационных лесных машин (харвестер и форвардер).

Предмет исследования – размерно-качественные характеристики заготовленных сортиментов из отчетных данных, полученных из бортовых компьютеров многооперационных лесных машин.

Методика исследования. В ходе исследования были изучены размерные параметры сортиментов, заготовленных с применением валочно-сучкорезно-раскряжевочных машин на базе гусеничных экскаваторов Caterpillar и Komatsu с харвестерной головкой LogMax 6000, оснащенных бортовыми компьютерами Parker Motomit IT 6,5 и осуществляющих лесозаготовки в Ленинградской области и Республике Карелия. Были проанализированы отчетные данные лесозаготовок в Волховском, Лодейнопольском, Подпорожском и Олонецком лесничествах.

Для анализа и визуализации отчетных данных с бортовых компьютеров многооперационных лесных машин составлена программа на языке Python (версия 3.9), которая может быть использована как как рабочее приложение для сотрудников лесозаготовительных предприятий [Баканач, Угрюмов, 2025]. Программа позволяет обрабатывать массивы данных из файлов, выгруженных из бортовых компьютеров в формате stm., производить систематизацию полученных данных, выполнять расчет статистиче-

ских характеристик анализируемых параметров работы машин, а также визуализировать их в виде схем и графиков.

Массивы данных, характеризующие работу лесозаготовительной машины, экспортируются в данную программу (рис. 1).

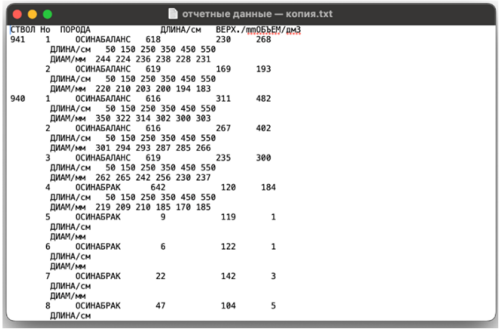


Рис. 1. Отчетные данные, экспортированные из бортового компьютера многооперационной лесной машины

Fig. 1. Report data exported from the on-board computer of a multi-purpose forest machine

Программа позволяет обработать и систематизировать загруженные массивы данных, а также вывести итоговую информацию о распределении диаметров заготовленных сортиментов, объема и породного состава заготовленной древесины, визуализировать схемы раскряжевки каждого заготовленного дерева. Кроме того, программа позволяет определить показатель сбега каждого заготовленного сортимента, а также визуализировать данные о среднем сбеге в зависимости от породного состава древесины.

Результаты исследований.

После обработки полученных файлов с помощью языка программирования Python и библиотек Numpy, Re, Matplotlib было определено соотношение заготовленных хвойных и лиственных пород древесины по лесничествам (рис. 2).

Как можно заметить, на лесосеке Волховского лесничества абсолютно преобладают хвойные породы (более 95%). В Лодейнопольском лесничестве, наоборот, наблюдается преобладание лиственных пород, а именно неликвидной и низкокачественной осины. В Подпорожском лесничестве ситуация аналогичная, но доля хвойных пород заметно больше. На лесосеке Олонецкого лесничества доля хвойных пород составляет почти 60%.

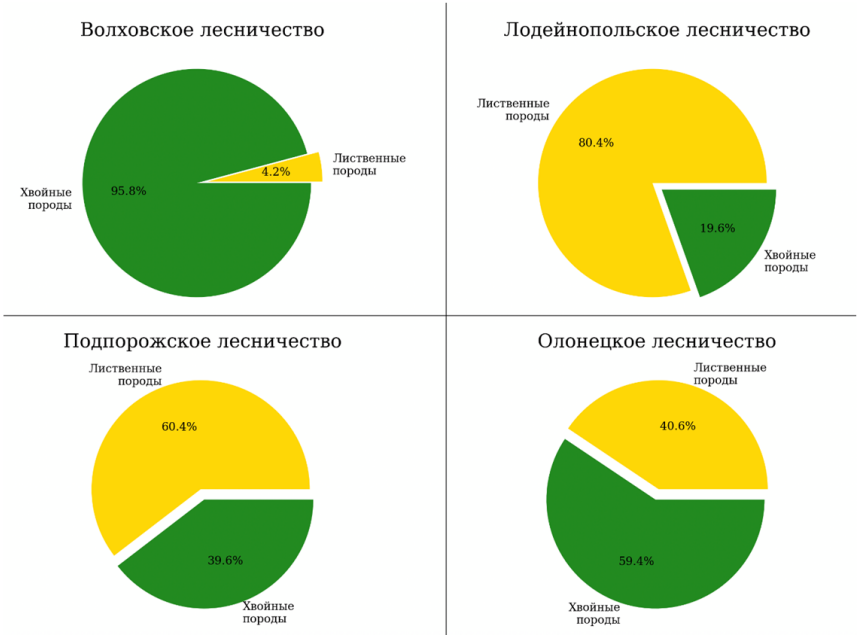


Рис. 2. Структура заготовленной древесины
Fig. 2. Structure of harvested wood

На рис. 3 представлена структура заготовленной пиловочной и балансовой древесины хвойных пород по лесничествам.

Выход наиболее дорогостоящей пиловочной древесины выше на лесосеке в Волховском лесничестве. Это может быть связано с качественными показателями леса, почвы, а также с квалификацией работающих на лесосеке операторов.

Наименьшая доля пиловочной древесины – на лесосеках Лодейнопольского лесничества, две трети от объема всей заготовленной хвойной древесины. Доля хвойного пиловочника в Лодейнопольском лесничестве составляет менее 13% от общего объема, что приводит к низкой рентабельности лесозаготовительных работ. Доля пиловочника хвойных пород в Подпорожском лесничестве – более 74%, в Олонецком – почти 71%.

После обработки массивов данных по раскряжевке каждого ствола хвойных пород была составлена столбчатая гистограмма, показывающая долю объема пиловочника, получаемого от объема всего ствола (рис. 4).

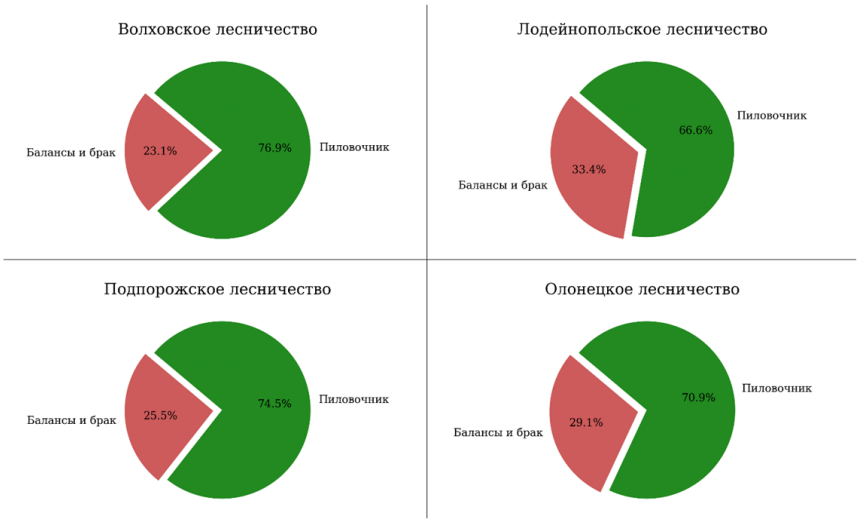


Рис. 3. Соотношение заготовленной пиловочной и балансовой древесины
Fig. 3. Ratio of harvested sawn and balance wood

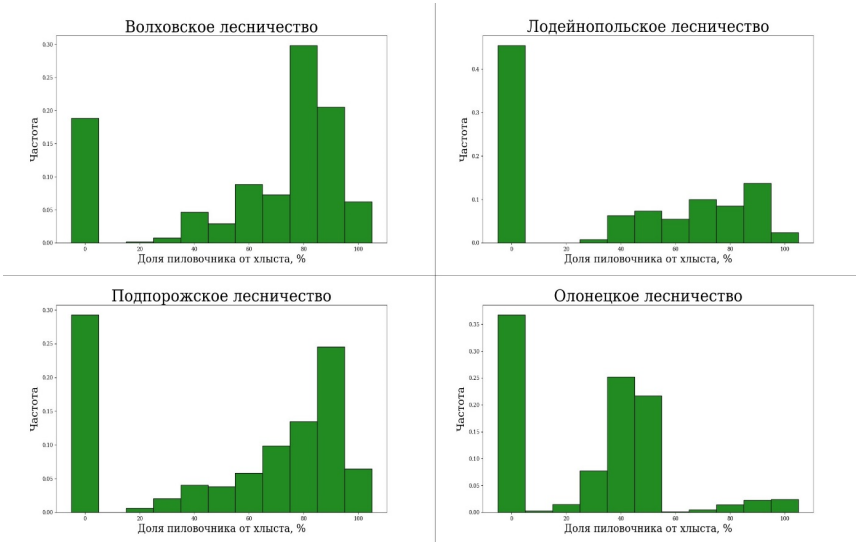


Рис. 4. Частота долей объема пиловочника от объемов стволов
Fig. 4. Frequency of sawlog volume fractions by trunk volume

Доля стволов, которые были раскряжеваны только на балансы, а также на порубочные остатки – 18% в Волховском лесничестве, 29% в Подпорожском лесничестве, 36% в Олонецком лесничестве, 43% в Лодейнопольском лесничестве.

В большинстве лесничеств преобладает доля стволов, которые были раскряжеваны на 80…90% от объема ствола на пиловочник, но в Олонецком лесничестве этот показатель сильно ниже (40…50% от объема ствола). Это может быть объяснено отсутствием плана заготовки тонкомерного пиловочника и особенностями размерно-качественных характеристик леса.

На следующем этапе были рассмотрены преобладающие схемы раскряжевки стволов хвойных пород (рис. 5).

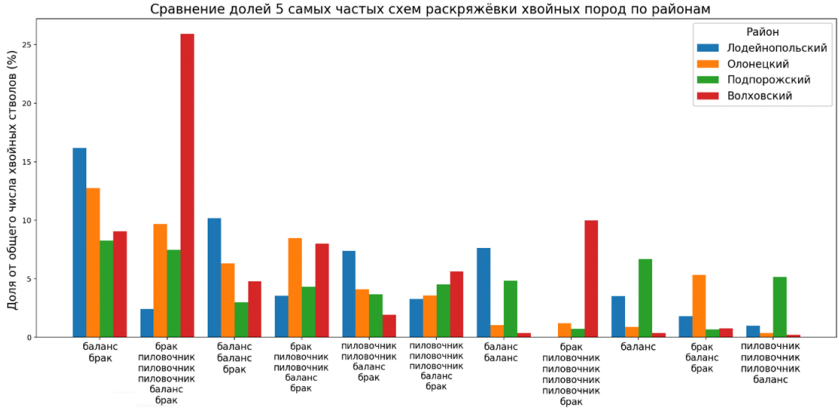


Рис. 5. Преобладающие схемы раскряжевки стволов хвойных пород
Fig. 5. Predominant patterns of cutting coniferous tree trunks

Наиболее часто встречающиеся схемы раскряжевки в Волховском районе:

1. брак, пиловочник, пиловочник, пиловочник, баланс, брак – 25,9% (более четверти всех хвойных стволов имеют такую раскряжёвку: дефектный участок → три пиловочных брёвна → баланс → порубочные остатки);

2. брак, пиловочник, пиловочник, пиловочник, пиловочник, брак – 10,0%;

3. баланс, брак – 9,1%;

4. брак, пиловочник, пиловочник, баланс, брак – 8,0%;

5. пиловочник, пиловочник, пиловочник, баланс, брак – 5,6%;

В Волховском районе самая частая схема – с тремя пиловочниками – встречается значительно чаще, чем любая другая схема раскряжевки во всех остальных районах. Здесь отмечена наибольшая частота схем раскряжевок, включающих пиловочную древесину.

Наиболее часто встречающиеся схемы раскряжевки в Подпорожском районе:

1. баланс, брак – 8,3%;

2. брак, пиловочник, пиловочник, пиловочник, баланс, брак – 7,5%;

3. баланс – 6,7% (единственный сортимент из каждого такого ствола – баланс);

4. пиловочник, пиловочник, пиловочник, баланс – 5,2%;

5. баланс, баланс – 4,8%.

Для Подпорожского района характерна наибольшая доля стволов, полностью состоящих из одного вида сортимента (только баланс).

Наиболее часто встречающиеся схемы раскряжевки в Олонецком районе:

1. баланс, брак – 12,8% от хвойных стволов;

2. брак, пиловочник, пиловочник, пиловочник, баланс, брак – 9,7%;

3. брак, пиловочник, пиловочник, баланс, брак – 8,5%;

4. баланс, баланс, брак – 6,3%;

5. брак, баланс, брак – 5,3%.

В Олонецком районе первая по частоте схема раскряжевки такая же, как и в Лодейнопольском – баланс с последующим браком (порубочные остатки). Далее преобладают схемы, начинающиеся с откомлевки, после чего идет пиловочная древесина, далее один баланс, а в конце брак – порубочные остатки.

Наиболее часто встречающиеся схемы раскряжевки в Лодейнопольском районе:

1. баланс, брак – 16,2% (в каждом шестом хвойном стволе сначала получается баланс, а оставшаяся часть идёт в порубочные остатки);

2. баланс, баланс, брак – 10,2% (две последовательные балансовые части, затем отход);

3. баланс, баланс – 7,6% (два баланса из ствола, без порубочных остатков, вероятно, остаток ствола имеет минимальные размерные характеристики);

4. пиловочник, пиловочник, баланс, брак – 7,4% (из ствола получено два пиловочника, затем баланс, оставшийся конец ствола пошел в отходы);

5. брак, пиловочник, пиловочник, баланс, брак – 3,6% (ствол начинается с откомлевки, затем два пиловочника, баланс и остаток идет в брак).

Схема раскряжевки «баланс-брак» часто присутствует во всех четырёх районах, однако доля таких стволов различается от 8…9% в Подпорожском и Волховском районах до 16% в Лодейнопольском (где такая схема является наиболее распространённой). В то же время схема раскряжевки, начинающаяся с брака в виде откомлевки и включающая три пиловочных сортимента, а затем баланс и порубочные остатки (брак, пиловочник, пиловочник, пиловочник, баланс, брак) доминирует в Волховском районе (около 26%, значительно больше, чем иные схемы в других районах).

Аналогично, схема раскряжевки брак-пиловочник-пиловочник-пиловочник-пиловочник-брак (вместо баланса, как в предыдущей схеме, идет мелкий пиловочник) занимает второе место в Волховском районе (примерно 10%) и встречается гораздо реже в остальных районах.

В Лодейнопольском районе заметна относительно высокая доля схем раскряжевки, целиком состоящих из баланса (например, баланс-баланс – около 7,6%, баланс-баланс-брак – около 10%). В Подпорожском районе выделяется присутствие схем раскряжевки из одного лишь баланса (около 6,7%), чего не наблюдается в других районах.

В Олонецком районе доминирует схема раскряжевки «баланс-брак» (12,8%), далее идут комбинации с пиловочником, начинающиеся с откомлевки, как и в Волховском районе.

Таким образом, распределение схем раскряжевки хвойных пород древесины значимо различается по районам. Волховский район отличается заготовкой значительно большей доли стволов с несколькими пиловочными сортиментами, тогда как в Лодейнопольском и Подпорожском районах чаще вырабатываются балансовые сортименты.

На рис. 6 приведена частота встречаемости откомлевок стволов, а также пиления вершины ствола на порубочные остатки.

Самый высокий процент откомлевок – в Волховском районе, 66%, то есть у каждых 2 из 3 стволов выполнена откомлевка. Встречаемость откомлевок в Олонецком районе чуть ниже (57%), в Подпорожском районе – 36%, а в Лодейнопольском – 25%.

На следующем этапе рассмотрены стволы, вершины которых были распилены на порубочные остатки и классифицированы оператором в качестве брака. Была рассчитана частота стволов, в которых вершина была распилена только на 1 брак, на 2 брака и так далее. Результаты приведены на рис. 7.

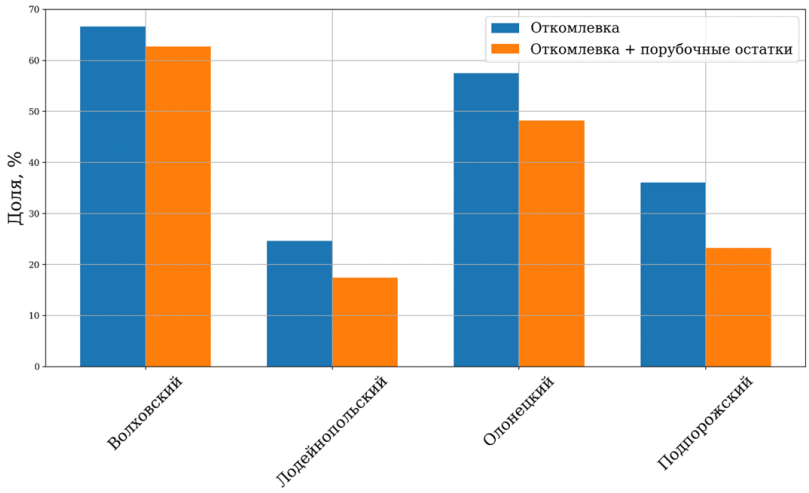


Рис. 6. Частота встречаемости откомлевок и порубочных остатков
Fig. 6. Frequency of occurrence of cuts in the trunk of a tree and felling residues

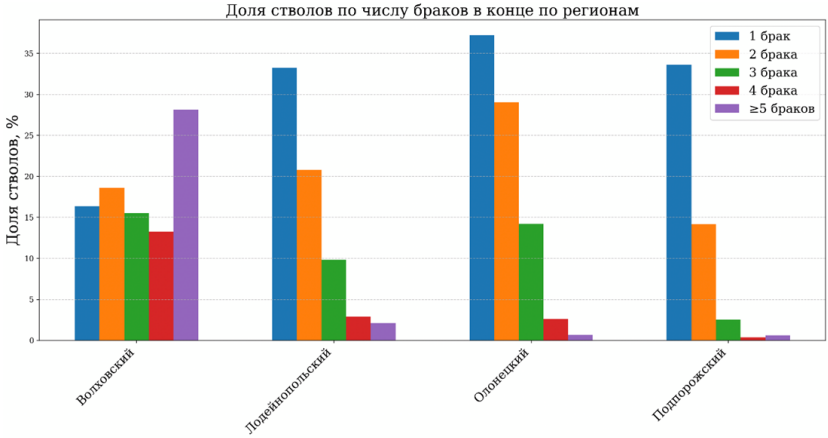


Рис. 7. Количество брака в вершинах заготовленных стволов
Fig. 7. The amount of defects in the tops of harvested trunks

Результаты показывают, что в Волховском районе зафиксирована самая большая частота стволов с большим количеством распилов на порубочные остатки (от 5 браков). Пример отчетности по такой раскряжевке приведен на рис. 8.

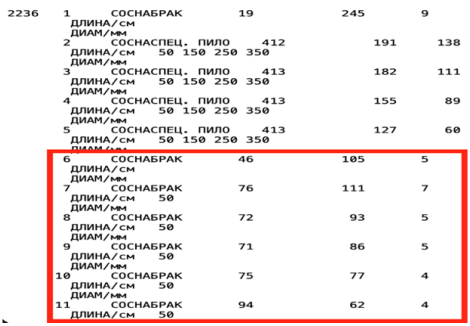


Рис. 8. Пример отчетных данных с неэффективной раскряжевкой вершинной части

Fig. 8. An example of reporting data with inefficient buckling of the top part of the tree trunk

На данном примере можно заметить, что более 4 м вершинной части ствола были распилены на порубочные остатки длиной от 46 см до 94 см. Данную схему раскряжевки можно назвать неэффективной и затратной, так как в этом случае выполнено множество ненужных резов.

В Олонецком районе более чем в 36% стволов был сделан 1 распил вершинной части на порубочные остатки. Этот показатель немного ниже в Подпорожском районе – порядка 34% – и в Лодейнопольском – 33%.

Заключение. В ходе исследования были проанализированы отчетные данные с бортовых компьютеров валочно-сучкорезно-раскряжевочных машин (харвестеров), работающих в природно-климатических условиях Северо-Западного Федерального округа. Статистически обработаны массивы данных из файлов формата stm., выгруженных из бортовых компьютеров многооперационных лесных машин.

Установлено, что в рассмотренных лесничествах Северо-Западного Федерального округа преимущественно осуществляется заготовка хвойных пород древесины. В отдельных случаях (например, в Лодейнопольском лесничестве) преобладает заготовка лиственных пород, в том числе неликвидной и низкокачественной древесины.

В большинстве лесничеств осуществляется заготовка древесины- пиловочника. Распределение схем раскряжевки хвойных пород древесины значимо различается по районам. Волховский район отличается заготовкой значительно большей доли стволов с несколькими пиловочными сортиментами, тогда как в Лодейнопольском и Подпорожском районах чаще вырабатываются балансовые сортименты.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Баканач Е.А., Угрюмов С.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025617886 RU. Программа для анализа и визуализации отчётных данных валочно-сучкорезно-раскряжевочных машин / заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова; заявл. 27.03.2025; опубл. 31.03.2025. Бюл. № 4. 1 с.

Галактионов О.Н., Васильев А.С., Суханов Ю.В. Пути развития лесопромышленного комплекса России в современных экономических условиях // Арктические исследования: от экстенсивного освоения к комплексному развитию: мат. IV межд. молодеж. науч.-практ. конф. Архангельск, 2024. С. 16-23.

Герасимов Ю.Ю., Сенькин В.А., Вяятайнен К. Производительность харвестеров на сплошных рубках // Resources and Technology. 2012. Т. 9, №2. С. 82–93.

Инновационные основы системного развития регионального лесного сектора экономики: методология, технология, механизмы: монография. СПб.: СПбГЛТУ, 2015. 312 с.

Лесопромышленный комплекс. Итоги 2024 г. и январь-февраль 2025 г. // Бюллетень Ассоциации ЛЕСТЕХ. 2025. № 2 (20). С. 16.

Мануковский А.Ю., Зорин М.В., Рудов С.Е., Куницкая О.А., Григорьев И.В. Программные комплексы современных лесных машин // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: сб. науч. ст. Казань, 2020. С. 57-59.

Уразова А.Ф., Васильев Н.Л. Управление качеством продукции в лесном комплексе. Екатеринбург: УГЛТУ, 2020. 112 с.

Цатрян Л.Р. Анализ проблем и перспектив развития лесопромышленного комплекса в условиях санкций // Промышленное развитие России: проблемы, перспективы: сб. ст. по мат. XXI Межд. науч.-практ. конф. преподавателей вузов, ученых, специалистов, аспирантов, студентов. Нижний Новгород, 2023. С. 71-75.

References

Bakanach E.A., Ugryumov S.A. Certificate of state registration of the computer program No. 2025617886 RU. A program for analyzing and visualizing accounting data of felling and knot-cutting and bucking machines / applicant and patent holder St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov; appl. 03/27/2025; publ. 03/31/2025. Bul. no. 4. 1 p. (In Russ.)

Galaktionov O.N., Vasiliev A.S., Sukhanov Yu.V. Ways of developing the Russian timber industry in modern economic conditions. *Arctic research: from extensive development to integrated development*: proceedings of the IV int. youth sci.-pract. conf. Arkhangelsk, 2024, pp. 16-23. (In Russ.)

Gerasimov Yu.Y., Senkin V.A., Vyatainen K. Harvester performance in continuous logging. *Resources and Technology*, 2012, vol. 9, no. 2, pp. 82-93. (In Russ.)

Innovative foundations of the systemic development of the regional forest sector of the economy: methodology, technology, mechanisms: monograph. St. Petersburg: SPbSFTU, 2015. 312 p. (In Russ.)

Manukovsky A.Yu., Zorin M.V., Rudov S.E., Kunitskaya O.A., Grigoriev I.V. Software complexes of modern forest machines. *Priority areas of innovation in industry*: collection of scientific articles. Kazan, 2020, pp. 57-59. (In Russ.)

Timber industry complex. Results of 2024 and January-February 2025. *Bulletin of the LESTEKH Association*, 2025, no. 2 (20), p. 16. (In Russ.)

Tsatryan L.R. Analysis of problems and prospects for the development of the timber industry in the context of sanctions. *Industrial development of Russia: problems, prospects*: collection of articles based on the mat. of the XXI int. sci.-pract. conf. of university teachers, scientists, specialists, graduate students, students. Nizhny Novgorod, 2023, pp. 71-75. (In Russ.)

Urazova A.F., Vasiliev N.L. Product quality management in the forestry complex. Yekaterinburg: UGFTU, 2020. 112 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 01.09.2025

Баканач Е.А., Угрюмов С.А. Анализ работы многооперационных лесных машин в условиях Северо-Западного Федерального округа // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 436–450. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.436-450

Анализ отчетных данных многооперационных лесных машин является важным и актуальным направлением исследований в сфере лесопромышленного комплекса, позволяет грамотно регулировать производство и повышать эффективность лесозаготовки. В данной статье исследована эффективность работы многооперационных лесных машин применительно к типичным условиям Северо-Западного Федерального округа. В ходе исследования были изучены размерные параметры сортиментов, заготовленных с применением валочно-сучкорезно-раскряжевочных машин на базе гусеничных экскаваторов Caterpillar и Komatsu с харвестерной головкой LogMax 6000, оснащенных бортовыми компьютерами Parker Motomit IT 6,5 и осуществляющих лесозаготовки в Ленинградской области и Республике Карелия. Были проанализированы отчетные данные лесозаготовок в Волховском, Лодейнопольском, Подпорожском и Олонецком лесничествах. Для анализа и визуализации отчетных данных с бортовых компьютеров многооперационных лесных машин составлена программа на языке Python, позволяющая обрабатывать массивы данных из файлов, выгруженных из бортовых компьютеров в формате stm., производить систематизацию полученных данных, выполнять расчет статистических характеристик анализируемых параметров работы машин, а также визуализировать их в виде схем и графиков. Установлено, что в рассмотренных

лесничествах Северо-Западного Федерального округа преимущественно осуществляется заготовка хвойных пород древесины. В отдельных случаях (например, в Лодейнопольском лесничестве) преобладает заготовка лиственных пород, в том числе неликвидной и низкокачественной древесины. В большинстве лесничеств осуществляется заготовка древесины-пиловочника. Распределение схем раскряжевки хвойных пород древесины значимо различается по районам. Волховский район отличается заготовкой значительно большей доли стволов с несколькими пиловочными сортиментами, тогда как в Лодейнопольском и Подпорожском районах чаще вырабатываются балансовые сортименты.

Ключевые слова: лесозаготовка, лесничества, многооперационные лесные машины, отчетные данные, раскряжевка.

Bakanach E.A., Ugryumov S.A. Analysis of the operation of multi-operational forestry machines in the conditions of the North-Western Federal district. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 436–450 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.436-450

The analysis of the reporting data of multi-operational forestry machines is an important and relevant area of research in the field of the timber industry, which makes it possible to competently regulate production and increase the efficiency of logging. This article examines the efficiency of multi-operational forestry machines in relation to the typical conditions of the North-Western Federal District. In the course of the study, the dimensional parameters of the grades harvested using felling, knot-cutting and bucking machines based on Caterpillar and Komatsu tracked excavators with a LogMax 6000 harvester head equipped with Parker Motomit IT 6.5 onboard computers and carrying out logging operations in the Leningrad Region and the Republic of Karelia were studied. The reporting data of logging operations in the Volkhov, Lodeynopolsky, Podporozhsky and Olonetsky forestry districts were analyzed. To analyze and visualize reporting data from on-board computers of multi-operational forestry machines, a Python program has been compiled that allows processing data arrays from files downloaded from on-board computers in stm format, systematizing the data obtained, calculating statistical characteristics of the analyzed machine operation parameters, and visualizing them in the form of diagrams and graphs. It has been established that coniferous wood is mainly harvested in the considered forestry areas of the North-Western Federal District. In some cases (for example, in the Lodeynopolsky forestry), the harvesting of hardwoods, including illiquid and low-quality wood, prevails. In most forestry areas, sawn timber is harvested. The distribution of softwood bucking schemes varies significantly by region. The Volkhovsky district is distinguished by the harvesting of a significantly large proportion of trunks with several sawn grades, whereas in the Lodeynopolsky and Podporozhsky districts balance grades are more often produced.

Keywords: logging, forestry, multi-operational forestry machines, accounting data, bucking.

БАКАНАЧ Егор Александрович – магистрант Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: egor-bakanach2002@mail.ru

BAKANACH Egor A. – Master's student, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: egor-bakanach2002@mail.ru

УГРЮМОВ Сергей Алексеевич – профессор кафедры технологии лесозаготовительных производств Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С.М. Кирова, доктор технических наук. ResearcherID: F-6510-2016. ORCID: 0000-0002-8077-3542.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: ugr-s@yandex.ru

UGRYUMOV Sergey A. – DSc (Technical), Professor of the Technologies of Logging Industries Department, St.Petersburg State Forest Technical University. ResearcherID: F-6510-2016. ORCID: 0000-0002-8077-3542.

194021. Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: ugr-s@yandex.ru

УДК 630.375.11

В.А. Кацадзе, Ф.В. Свойкин, В.А. Гринкевич, К.В. Россихин

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ДАВЛЕНИЯ НА ГРУНТ КОЛЕСНОГО СОРТИМЕНТОПОДБОРЩИКА ТРОМ 25

Введение. Традиционно для освоения территорий применялись классическая гусеничная техника, например, трелевочный трактор ТДТ-55А, или тяжелый колесный спецтранспорт, например, форвардеры Ponsse Buffalo 8W или Амкодор 2661 [Katsadze et al., 2022; Svoikin et al., 2025]. Также привлекались традиционные методы, вроде создания зимников. Однако, в свете климатических изменений, эти технологии и средства часто становятся неработоспособными, не соответствуя современным требованиям в развитии науки и техники [Жук и др., 2025].

В освоении труднодоступных лесосек со слабонесущими грунтами III–IV категорий, а также при проведении санитарных рубок (сплошных и выборочных) вышеуказанные решения не работают, т. к. традиционные движители способствуют разрушению земляного покрова и возникновению колеи (рис. 1), что в дальнейшем сказывается на переувлажнении территорий, повторных проездах машин, лесовосстановлении и состоянии почвы [Гайнуллин, Зайнуллин, 2017; Ильинцев и др., 2018; Cambi et al., 2015]. Как следствие, целевые породы находятся в условиях заболоченных лесных участков и рискуют попасть в категорию фаутных насаждений [Дымов, 2017].

Рис. 1. Образование колейности на погрузочном пункте
Fig. 1. Formation of rutting on loading construction

Также, помимо традиционных проблем отрасли, обоснован прогноз серьезного дефицита лесозаготовительной техники в ближайшие годы в ЛПК РФ. Стоит отметить невозможность решения данной проблемы за счет российского лесного машиностроения в настоящий момент [Кацадзе и др., 2025]. Согласно анализу состояния рынка лесозаготовительной техники и наличия парка этого оборудования по всем основным арендаторам и другим лесопользователям в 2028 г. износ составит более 90%». Безусловно, обеспечение ЛПК лесозаготовительной техникой необходимо включить в стратегию развития отрасли до 2035 г. Дефицит лесозаготовительной техники обуславливает сокращение объемов заготовки древесины в РФ в 2025 г. на 30%, до 180 млн. м^3.

Помимо вышеуказанного, на данный момент не представляется возможным закупить машины зарубежных и некоторых отечественных производителей по причинам высокой стоимости техники и наличия зарубежных комплектующих в составе машин российских производителей, а часть эксплуатационных лесов участковых лесничеств находится на заболоченных территориях [Svoikin et al., 2023, 2024a, b].

Для достижения высокой проходимости в проектировании трансмиссии облегченного шасси снегоболотохода ТРОМ используют привод Робсона (роликовый привод), что позволило сделать привод на все 8 колес, имея на борту одну раздаточную коробку и два моста. Балансирная подвеска позволила данному шасси всегда иметь равномерное сцепление с поверхностью земли всеми восьмью колесами независимо от рельефа местности. Учитывая, что вся техника ТРОМ плавающая, шасси состоит из двух сочлененных герметичных лодок. Двигатель, КПП, раздаточная коробка, два моста и все агрегаты размещены внутри герметичных лодок, что не позволяет маслам и другим техническим жидкостям проливаться в почву. Благодаря этому возможно применение машин с минимальным воздействием на экосистему в природных парках, родовых угодьях, заповедниках, заказниках, национальных парках, где, помимо минимального удельного давления на почву и отсутствие возможных утечек жидкостей, учитывается и количество выхлопных газов.

Для лесной промышленности с использованием этой технологии были созданы колесные сортиментоподборщики (далее – КС) разных видов [Свойкин, Кацадзе, 2025], например, КС ТРОМ 20 УЭС и КС ТРОМ 20 с двигателем ЯМЗ-534. На ближайшего по стоимости конкурента Амкодор установлен другой агрегат, а именно двигатель Д-260.1. По сравнению с ним Ярославский мотор имеет более современную экологическую норму –

ЕВРО-5 против ЕВРО-3. Такая существенная разница сказывается на расходе потребляемого топлива

Эксплуатация транспортных средств ТРОМ на протяжении многих лет подтверждает их благоприятное воздействие на ПГУ. Корневая система травяного покрова остается неповрежденной, а стебли поднимаются через два дня после проезда вездехода. Уплотнение почвы под колесами в два раза меньше, чем при движении человека. Удельное давление вездехода ТРОМ с полной загрузкой составляет 0,12 кг/см^2, в то время как человек оказывает давление 0,25-0,3 кг/см^2 на слабом грунте. Итогом таких значений является отсутствие разрушения почвы на погрузочном пункте (рис. 2).

Рис. 2. Состояние почвы на погрузочном пункте
при вывозке древесины с использованием техники ТРОМ

Fig. 2. Soil condition at the loading point during timber
transportation using TROM equipment

Последняя модификация форвардеров представлена моделью ТРОМ 25 (рис. 3), которая имеет более классическую компоновку и улучшенные технические характеристики по сравнению с предыдущими моделями.

Рис. 3. КС ТРОМ, модель 25
Fig. 3. Wheeled forwarder TROM, model 25

Данная машина проходила испытания в условиях незамерзших болот зимой 2024-2025 гг. в районе пос. Салым ХМАО-Югра в ООО «Лесные технологии». Большой опыт предыдущих разработок позволил создать машину, приближенную по скорости работы, удобству, надежности к импортным аналогам. В сегодняшней геополитической ситуации важным аспектом становится комплектация техники отечественными узлами и агрегатами. Техника ТРОМ на 80% состоит из отечественных комплектующих, что позволяет снизить затраты на эксплуатацию (расходники) и ремонт подобной техники.

Производство лесной техники не останавливается на производстве колесных сортиментоподборщиков: на данный момент ведутся работы по разработке валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины на базе данной платформы с собственной харвестерной головкой.

Также предполагается на базе отечественной модульной системы, по аналогии с советскими гусеничными решениями, в процессе эволюции проекта разработка всех кластеров лесной отрасли на основании решений на пневматиках сверхнизкого давления.

На данный момент имеются работоспособные экземпляры форвардера, которые проходят испытания на лесозаготовительных производствах.

На этапе разработки находится сразу несколько машин, а именно:

- грузопассажирская платформа («летучка»);
- мульчер;
- дробилка;
- посевной агрегат для минерализованных полос;
- лесовоз;
- автопоезд.

С учётом затруднённости или невозможности доступа к традиционным решениям в традиционных сырьевых отраслях промышленности РФ поиск альтернативных технических решений становится особо актуальной задачей. Доступ к лесным ресурсам затрудняется отсутствием традиционных сезонов заготовки (аномально теплым зимним периодом 2024-2025 гг.), а также увеличением площади особо чувствительных к разведке недр территорий [Marchi et al., 2018]. Так, по данным Федерального агентства лесного хозяйства (Рослесхоза) площадь защитных лесов России в 2024 г. увеличилась на 1 000 000 гектаров и достигла 288 000 000 гектаров (287 000 000 гектаров в 2023 г.). Данный показатель прироста был достигнут за счёт работ по лесоустройству. Стоит отметить, что в 2025 г. защитные леса занимают примерно 20% от общей площади земель лесного фонда РФ, причем максимальный прирост защитных лесов произошел в следующих традиционных для лесозаготовки регионах: Архангельская область – + 638 000 гектаров; Иркутская область – + 234 000 гектаров; Красноярский край – + 61 000 гектаров. Также произошло увеличение лесов в водоохранных зонах до 20 900 000 гектаров (+ 800 000 гектаров), в зеленых зонах до 10 400 000 гектаров (+6 800 гектаров), в горных лесах до 1 100 000 гектаров (+ 2 000 000 гектаров). Увеличение площади охраняемых территорий при неизменной площади и экстенсивном ведении хозяйства обуславливает тренд на снижение последствий прохода тяжелой техники по малонарушенным территориям геологоразведовательной базы в условиях районов Крайнего Севера РФ и приравненных к ним местностей [Нефедов и др., 2025]. Традиционные решения при лесозаготовке все затруднительнее применять из-за экологического фактора (воздействие такого оборудования и технологических операций на почвогрунт лесосек при переездах, технологических стоянках и проведении работ). Основные факторы, влияющие на масштаб, степень, продолжительность прямого и косвенного воздействия техники на особо чувствительные к нагрузке почвы – гранулометрический состав почвы, ее влажность, содержание органических веществ в почве, уклон местности, тип транспортного средства (ТС), размер ТС, давление в шинах ТС, формы шин ТС, количество проездов ТС и пр.

Цель работы. Определить удельное давление шины пневматической сверхнизкого давления транспортного средства «колесный сортиментоподборщик «ТРОМ 25» на грунт.

Методика исследования. При планировании и осуществлении исследования объектом исследования являлся колесный сортиментоподборщик «ТРОМ 25»; колёсная формула (8×8): передняя полурама (4×4) + задняя полурама (4×4) с колёсным оборудованием ТРОМ 25 – 1960×900R38.

Для оценки соответствующего воздействия использовалась методика, содержащаяся в п. 5.2. ГОСТ Р 58656 – 2019 «Техника сельскохозяйственная мобильная. Методы определения воздействия движителей на почву»; масса исследуемой техники составляет 19 980 кг.

Согласно методике осуществлён осмотр колесного сортиментоподборщика «ТРОМ 25» на пневматиках сверхнизкого давления с последующим сбором необходимых для расчёта параметра «удельное давление на грунт» данных, а именно:

• основных технических характеристик колесного сортиментоподборщика «ТРОМ 25» на пневматиках сверхнизкого давления (инструкция по эксплуатации);

• основных технических характеристик на шины сверхнизкого ТРОМ 2025 – 1960 ×900 R38;

• основного натурно определяемого и замеряемого в производственных условиях параметра «площадь пятна контакта движителя на опорную поверхность» в соответствии с ГОСТ Р 58656 – 2019.

Приложение «А» и «В» ГОСТа Р 58656 – 2019 формирует порядок определения контурной площади пятна контакта протектора шины ТС. В ходе работ осуществлено определение контурной площади пятна контакта протектора шин сверхнизкого давления для колесного оборудования ТРОМ 25 – 1960 ×900 R38 на рабочих давлениях (10 000 Па и 50 000 Па) по рекомендованному производителем в инструкции по эксплуатации диапазону рабочего давления воздуха.

Порядок проведения исследования по определению удельного давления на грунт колесного сортиментоподборщика «ТРОМ 25» (давление 50 000 Па):

1. Колесный сортиментоподборщик «ТРОМ 25» для необходимых измерений был установлен на ровной площадке с бетонным основанием;

2. Отклонение от плоскостности поверхности ровной площадки с бетонным основанием в пределах габаритов ТС не превышало 0,005 м, при этом отклонение от горизонтального положения плоскости, прилегающей к поверхности площадки, в тех же габаритах не превышало 2°;

3. Необходимые измерения проводились через 20-25 мин после полной накачки шин, погрешность поверенного манометра при измерениях давления в шинах по абсолютной величине не превышала 5%. При этом колесный сортиментоподборщик «ТРОМ 25» на пневматиках сверхнизкого давления оборудован в базовой комплектации автоматической центральной подкачкой давления в шинах и штатным манометром для контроля водителем соответствия давления почвенно-грунтовым условиям эксплуатации снегоболотохода. Соответствующий рисунок с таблицей давления имеется на передней панели колесного сортиментоподборщика «ТРОМ

25», продублирован также в инструкции по эксплуатации. Давление в шинах одной и той же оси не отличалось более чем на погрешность (5%);

4. Положение колёсного оборудования на пневматических шинах сверхнизкого давления соответствовало прямолинейному движению колесного сортиментоподборщика «ТРОМ 25»;

5. Согласно ГОСТ 17697–72 «Автомобили. Качения колеса. Термины и определения» отпечаток (след) контурной площади ведущего колеса должен быть получен при четырехкратном его опускании (до полного заполнения отпечатка домкратом и отсутствия смещения ТС в горизонтальной плоскости в опущенном положении). При этом после каждого опускания колесо поворачивали на угол, соответствующий ширине выступа протектора ТС. Затем отпечаток контурной площади определялся по ГОСТ 17697–72 путем нанесения красящего вещества на выступы протектора, что обеспечило наличие чёткого отпечатка без подтёков (при этом контур всех отпечатков протектора колеса определяли очерчиванием отпечатка плавной кривой, охватывающей существующие выступы);

6. Фиксация определенного значения контурной площади протектора колеса определялась путём фотофиксации отпечатка цифровой фотокамерой с наложенной на него масштабной квадратной фигурой (площадью 0,01 м^2);

7. Полученный снимок обрабатывался с помощью компьютерных программ (приложения Tape Measure™, Area Measure™, Ruler App™, Ruler ME™, Camera Ruler™) для автоматического проектирования, в которых имеется командная опция «измерения; определение площади произвольной фигуры»;

8. Так как в руководстве по эксплуатации колесного сортиментоподборщика «ТРОМ 25» указан диапазон рабочих давлений от 10 000 Па до 50 000 Па, подобным образом было проведено исследование по определению удельного давления на грунт для давления 50 000 Па.

В настоящее время сформирован научный задел для решения логистических задач на пневматических шинах сверхнизкого давления [Свойкин и др., 2011, 2024].

Измерения размерных характеристик колесного сортиментоподборщика «ТРОМ 25» проводились измерительной рулеткой RGK R-20 S20M0034, длина 20 м, толщина 13 мм, обладающей соответствующей поверкой.

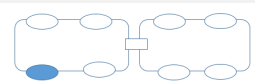
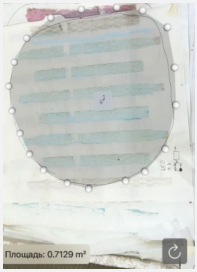
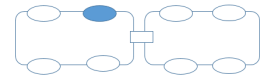
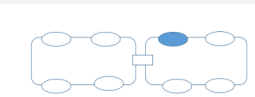
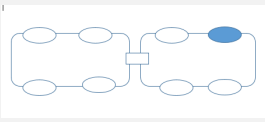
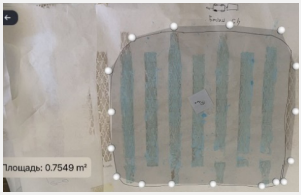
Измерение давления пневматических шин сверхнизкого давления колесного сортиментоподборщика «ТРОМ 25» осуществлялось поверенным манометром шинным ТМ (ГРСИ 25913-08) 0-1 600 000 Па (0-16 кгс/см^2) с поверкой.

Результаты исследования. Значение контурной площади пятна контакта протектора каждого измеренного колеса(приведено в табл. 1.

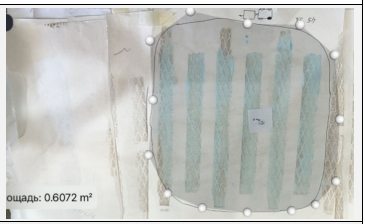
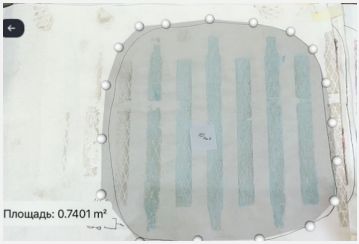
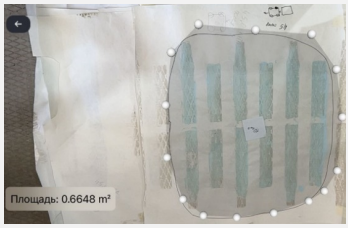
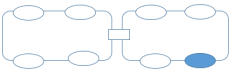
Таблица 1

Значение контурной площади пятна контакта протектора каждого измеренного колеса

Values of contour contact spot area of each measured wheel

Колесный сортиментоподборщик «ТРОМ 25», расположение шины в модели	Давление, на котором получено пятно контакта, Па.	Площадь пятна контакта, м^2	Фотофиксация результатов измерений
	50 000	0,7129	
	50 000	0,6571	
	50 000	0,5704	
	50 000	0,7549	

Окончание табл. 1

Колесный сортиментоподборщик «ТРОМ 25», расположение шины в модели	Давление, на котором получено пятно контакта, Па.	Площадь пятна контакта, м^2	Фотофиксация результатов измерений
	50 000	0,6072	
	50 000	0,7401	
	50 000	0,6648	
	50 000	0,7198	

На основании полученных в ходе натурного осмотра данных, а также совокупности характеристик исследуемого колесного сортиментоподборщика, указанных в техпаспорте, произведён расчёт воздействия движителей на почву по ГОСТ Р 58656–2019. Результаты расчётов максимального нормального давления на почву колесного сортиментоподборщика «ТРОМ 25» (колёсная формула 8×8 с колёсным оборудованием Тром – 1960×900R38, давление в шинах 50 000 Па) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Максимальное нормальное давление на почву колесного сортиментоподборщика «ТРОМ 25» (колёсная формула 8×8 с колёсным оборудованием Тром – 1960×900R38, давление в шинах 50 000 Па)

The maximum normal pressure on the soil of the TROM 25 wheeled timber picker (8x8 wheel arrangement with TROM wheel equipment is 1960x900R38, tire pressure is 50,000 Pa)

Наименование	Размерность показателя	Значение показателя
Масса промышленного снегоболотохода, M	кг	19 980
Размер колеса	–	Тром – 1960×900R38
Вертикальная нагрузка на заднюю шину, G_k	Н	14 906
Внутреннее давление воздуха на шине, P_w	Па	50 000
Посадочный диаметр обода, d	М	0,965
Наружный диаметр, D	М	1,98
Ширина профиля, B	М	0,9
Высота профиля, H	М	0,032
Норма слойности, n	-	4
Статический радиус, r_o	М	0,53
Допустимый статический прогиб, f	М	0,08
Коэффициент, зависящий от наружного диаметра шины колеса, K_1	–	1,1
Коэффициент продольной неравномерности распределения давления, K_2	–	1,5
Постоянный коэффициент, P_o	–	–22,44 (т.к. $P_o<0$, P_o=0)
Площадь контакта, F_{k1}	$м^2$	0,198
Максимальное нормальное давление на почву, q_{max1}	$кг/см^2$	1,045

Измеренная опытным путём площадь пятна контакта колесного сортиментоподборщика «ТРОМ 25» (колёсная формула 8×8 с колёсным оборудованием Тром – 1960×900R38, давление в шинах 50 000 Па) приведена в табл. 3.

Таблица 3

Измеренная опытным путём площадь пятна контакта колесного сортиментоподборщика ТРОМ 25 (колёсная формула 8×8 с колёсным оборудованием Тром – 1960×900R38, давление в шинах 50 000 Па)

The experimentally measured contact area of the TROM 25 wheeled timber picker (8x8 wheel arrangement with TROM wheel equipment is 1960x900R38, tire pressure is 50,000 Pa)

Наименование	Размерность показателя	Значение показателя
Площадь пятна контакта, передняя полурама, переднее левое колесо, $S_{ппл1}$	$м^2$	0,7129
Площадь пятна контакта, передняя полурама, переднее правое колесо, $S_{ппп1}$	$м^2$	0,6072
Площадь пятна контакта, передняя полурама, заднее левое колесо, $S_{пзл1}$	$м^2$	0,7401
Площадь пятна контакта, передняя полурама, заднее правое колесо, $S_{пзп1}$	$м^2$	0,6571
Площадь пятна контакта, задняя полурама, переднее левое колесо, $S_{зпл1}$	$м^2$	0,6648
Площадь пятна контакта, задняя полурама, переднее правое колесо, $S_{зпп1}$	$м^2$	0,5704
Площадь пятна контакта, задняя полурама, заднее левое колесо, $S_{ззл1}$	$м^2$	0,7198
Площадь пятна контакта, задняя полурама, заднее левое колесо, $S_{ззп1}$	$м^2$	0,7549
Площадь средняя, $S_{ср1}$	$м^2$	0,678
Опытное суммарное среднее давление колёс на поверхность, q_{max1}	$кг/см^2$	0,323

Выводы и рекомендации. Полученные данные способствуют комплексному транспортному развитию не только Таймырского (Долгано-Ненецкого) автономного округа (относится к районам Крайнего Севера), но и Арктической зоны РФ и приравненных к ней территорий, а также Северо-Западного Федерального округа (СЗФО РФ), которые обладают во

многом схожими природно-производственными условиями. В результате исследований реальное измеренное удельное давление колесного сортиментоподборщика «ТРОМ 25» составляет 0,323 кг/см^2. Таким образом, подобные решения являются альтернативой существующим гусеничным решениям (МТЛБ и т.д.). Учитывая аналогичные транспортно-технологические машины (ТТМ), используемые при лесозаготовительных и геологоразведывательных операциях в подобных природно-климатических условиях РФ, оценка давления на грунт разными ТТМ, а также сравнение давления на грунт разными типами и конфигурациями ТТМ с несущей способностью самого грунта позволят существенно развить технологический процесс лесозаготовки и геологоразведки в таких районах в части оптимального подбора базовой платформы и технологического оборудования.

Заключение. В некоторых случаях (с учетом динамических нагрузок), а именно на особо чувствительных почвогрунтах и в условиях заповедных (малонарушенных) территорий, особо охраняемых природных территорий (ООПТ) применение промышленных снегоболотоходов ТРОМ на пневматических шинах сверхнизкого давления для решения производственных задач является фактически безальтернативным по параметру «удельное давление шины на грунт».

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Гайнуллин И.А., Зайнуллин А.Р. Влияние конструктивных параметров движителей и нагрузочных режимов тракторов на почву // Фундаментальные исследования. 2017. № 2. С. 31–36.

Дымов А.А. Влияние сплошных рубок в бореальных лесах России на почвы (обзор) // Почвоведение. 2017. №3. С. 787-798. DOI: 10.7868/S0032180X17070024.

Жук К.Д., Свойкин Ф.В., Свойкин В.Ф., Мишура Л.Г., Кабаков В.В., Шкарубо С.Н. Методы машинного обучения в задаче распознавания и классификации древесных пород // СТИН. 2025. № 4. С. 39-44.

Ильинцев А.С., Быков Ю.С., Солдатова Д.Н., Богданов А.П., Ершов Р.А. Воздействие современной лесозаготовительной техники на физические свойства почвы в Северной тайге Архангельской области // Антропогенная трансформация природной среды. 2018. №4. С. 153–155.

Кацадзе В.А., Свойкин Ф.В., Свойкин В.Ф., Вохмянин Н.А., Тарабан М.В., Степанищева М.В. Обзор производителей отечественной лесозаготовительной техники в РФ // Системы. Методы. Технологии. 2025. № 3 (67). С. 139-147. DOI: 10.18324/2077-5415-2025-3-139-147.

Нефедов В.Н., Свойкин Ф.В., Гарибян Б.А., Ряпухин А.В., Королько Н.С. Методы аппроксимации двумерных множеств конечными множествами и их приложение к некоторым геометрическим задачам оптимизации // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. 2025. Т. 29, № 1. С. 129-157. DOI: 10.14498/vsgtu2131.

Свойкин Ф.В., Кацадзе В.А. Актуальные отечественные лесные машины // Повышение эффективности лесного комплекса: мат. Десятой Всерос. нац. науч.-практ. конф. Петрозаводск, 2025. С. 139-140.

Свойкин Ф.В., Жукова А.И., Цыгарова М.В., Лепилин Д.В. Математическая модель деформации почвы при повороте трактора // Известия СПбГЛТА. 2011. №195. С. 120–128.

Свойкин Ф.В., Свойкин В.Ф., Борозна А.А., Тарабан М.В., Кабаков В.В. Результаты экспериментальных исследований по определению давления на грунт вездеходов ХИЩНИК-3930 и ХИЩНИК-3940 в условиях районов Крайнего Севера РФ и приравненным к ним местностям // Тракторы и сельхозмашины. 2024. Т. 91, № 6. С. 779-792. DOI: 10.17816/0321-4443-630008.

Cambi M., Certini G., Neri F., Marchi E. The impact of heavy traffic on forest soils: A review // Forest Ecology and Management. 2015. Vol. 338. P. 124–138. DOI: 10.1016/j.foreco.2014.11.022.

Katsadze V.A., Svoikin F.V., Svoikin V.F., Ugryumov S.A. Review of modern domestic solutions for transport development of hard-to-reach cutting areas // Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya. 2022. № 3. С. 3-12. DOI: 10.31044/1684-2561-2022-0-3-3-12.

Marchi E., Chung W., Visser R., Abbas D., Nordfjell T., Mederski P.S., McEwan A., Brink M., Laschi A. Sustainable Forest Operations (SFO): A new paradigm in a changing world and climate // Science of the Total Environment. 2018. Vol. 634. P. 1385–1397. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.084.

Svoikin F., Zhuk K., Svoikin V., Iniesta D.V., Ryapukhin A. Classification of Tree Species in the Process of Timber-Harvesting Operations Using Machine-Learning Methods // Inventions. 2023. Vol. 8, iss. 2. Art. no. 57. DOI: 10.3390/inventions8020057.

Svoykin F.V., Zhuk K.D., Svoykin V.F., Kretinin V.I., Uglova L.A. Modern domestic solutions and software for Scandinavian logging in Russia under the new economic conditions // BIO Web of Conferences. 2024a. Vol. 84. Art. no. 01012. DOI: 10.1051/bioconf/20248401012.

Svoikin F.V., Svoikin V.F., Rossikhin K.V., Borozna A.A., Taraban M.V., Maksimov P.P., Kovtun M.A. Modernization of skidding and primary removal of wood in the Vologda Region through the use of relevant domestic solutions // E3S Web of Conferences. 2024b. Vol. 515. Art. no. 03022. DOI: 10.1051/e3sconf/202451503022.

Svoikin F., Svoikin V., Borozna A., Taraban M., Makarenko A. Results of studies to determine the pressure on the soil of wheeled logging sites harvesters (VLSH) of middle-small, middle and heavy classes in the natural and production conditions of the Kronoberg County (South of Sweden) // J. For. Res. 2025. Vol. 36. Art. no. 37. DOI: 10.1007/s11676-025-01833-y.

References

Cambi M., Certini G., Neri F., Marchi E. The impact of heavy traffic on forest soils: A review. *Forest Ecology and Management*, 2015, vol. 338, pp. 124–138. DOI: 10.1016/j.foreco.2014.11.022

Dymov A.A. The impact of clear-cutting in boreal forests of Russia on soils (review). *Soil Science*, 2017, no. 3, pp. 787-798. DOI: 10.7868/S0032180X17070024. (In Russ.)

Gainullin I.A., Zainullin A.R. The influence of design parameters of propellers and load modes of tractors on the soil. *Fundamental research*, 2017, no. 2, pp. 31–36. (In Russ.)

Ilyintsev A.S., Bykov Yu.S., Soldatova D.N., Bogdanov A.P., Ershov R.A. The impact of modern logging equipment on the physical properties of soil in the Northern taiga of the Arkhangelsk region. *Anthropogenic transformation of the natural environment*, 2018, no. 4, pp. 153–155. (In Russ.)

Katsadze V.A., Svoikin F.V., Svoikin V.F., Ugryumov S.A. Review of modern domestic solutions for transport development of hard-to-reach cutting areas. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya*, 2022, no. 3, pp. 3-12. DOI: 10.31044/1684-2561-2022-0-3-3-12. (In Russ.)

Katsadze V.A., Svoykin F.V., Svoykin V.F., Vokhmyanin N.A., Taraban M.V., Stepanishcheva M.V. Review of manufacturers of domestic logging equipment in the Russian Federation. *Systems. Methods. Technologies*, 2025, no. 3 (67), pp. 139-147. DOI: 10.18324/2077-5415-2025-3-139-147. (In Russ.)

Marchi E., Chung W., Visser R., Abbas D., Nordfjell T., Mederski P.S., McEwan A., Brink M., Laschi A. Sustainable Forest Operations (SFO): A new paradigm in a changing world and climate. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 634, pp. 1385–1397. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.084.

Nefedov V.N., Svoykin F.V., Garibyan B.A., Ryapukhin A.V., Korolko N.S. Methods of approximating two-dimensional sets by finite sets and their application to some geometric optimization problems. *Vestn. Sam. state tech. un-ta. Ser. Phys.-math. sciences*, 2025, vol. 29, no. 1, pp. 129-157. DOI: 10.14498/vsgtu2131. (In Russ.)

Svoykin F.V., Katsadze V.A. Current domestic forestry machines. *Improving the efficiency of the forestry complex*: proceedings of the Tenth All-Russ. nat. sci.-pract. conf. Petrozavodsk, 2025, pp. 139-140. (In Russ.)

Svoykin F.V., Zhukova A.I., Tsygarova M.V., Lepilin D.V. Mathematical model of soil deformation during tractor turning. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2011, iss. 195, pp. 120–128. (In Russ.)

Svoikin F., Zhuk K., Svoikin V., Iniesta D.V., Ryapukhin A. Classification of Tree Species in the Process of Timber-Harvesting Operations Using Machine-Learning Methods. *Inventions*, 2023, vol. 8, iss. 2, art. no. 57. DOI: 10.3390/inventions8020057.

Svoykin F.V., Svoykin V.F., Borozna A.A., Taraban M.V., Kabakov V.V. Results of experimental studies to determine the ground pressure of the HISCHNIK-3930 and

HISCHNIK-3940 all-terrain vehicles in the conditions of the Far North regions of the Russian Federation and equivalent localities. *Tractors and agricultural machinery*, 2024, vol. 91, no. 6, pp. 779-792. DOI: 10.17816/0321-4443-630008. (In Russ.)

Svoykin F.V., Zhuk K.D., Svoykin V.F., Kretinin V.I., Uglova L.A. Modern domestic solutions and software for Scandinavian logging in Russia under the new economic conditions. *BIO Web of Conferences*, 2024a, vol. 84, art. no. 01012. DOI:10.1051/bioconf/20248401012.

Svoikin F.V., Svoikin V.F., Rossikhin K.V., Borozna A.A., Taraban M.V., Maksimov P.P., Kovtun M.A. Modernization of skidding and primary removal of wood in the Vologda Region through the use of relevant domestic solutions. *E3S Web of Conferences*, 2024b, vol. 515, art. no. 03022. DOI: 10.1051/e3sconf/202451503022.

Svoikin F., Svoikin V., Borozna A., Taraban M., Makarenko A. Results of studies to determine the pressure on the soil of wheeled logging sites harvesters (VLSH) of middle-small, middle and heavy classes in the natural and production conditions of the Kronoberg County (South of Sweden). *J. For. Res.*, 2025, vol. 36, art. no. 37. DOI: 10.1007/s11676-025-01833-y.

Zhuk K.D., Svoykin F.V., Svoykin V.F., Mishura L.G., Kabakov V.V., Shkarubo S.N. Machine learning methods in the problem of recognition and classification of tree species. *STIN*, 2025, no. 4, pp. 39-44.

Материал поступил в редакцию 06.02.2025

Кацадзе В.А, Свойкин Ф.В., Гринкевич В.А., Россихин К.В. Экспериментальные исследования по определению давления на грунт колесного сортиментоподборщика ТРОМ 25 // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 451–467. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.451-467

Приведено обоснование разработки технического решения на основе промышленных снегоболотоходов на пневматических шинах сверхнизкого давления. Реализация для лесной промышленности заключается в проектировании и изготовлении исследуемого колесного сортиментоподборщика ТРОМ 25. Измерены значения контурной площади пятна контакта протектора каждого измеренного колеса колесного сортиментоподборщика ТРОМ 25. Определено максимальное нормальное давление на почву колесного сортиментоподборщика «ТРОМ 25» (колёсная формула 8×8 с колёсным оборудованием Тром – 1960×900R38, давление в шинах 50 000 Па). Указана измеренная опытным путём площадь пятна контакта колесного сортиментоподборщика «ТРОМ 25» (колёсная формула 8×8 с колёсным оборудованием Тром – 1960×900R38, давление в шинах 50 000 Па). Научной новизной для лесной промышленности обладает методика определения значения контурной площади пятна контакта протектора каждого измеренного

колеса, а также определение пятна контакта пневматических шин сверхнизкого давления с конечной опорной поверхностью. В результате исследований определено реальное измеренное удельное давление колесного сортиментоподборщика «ТРОМ 25», даны рекомендации о применении результатов исследований в реальных природно-производственных условиях.

Ключевые слова: колесный сортиментоподборщик, ТРОМ 25, промышленный снегоболотоход, пневматические шины сверхнизкого давления, пятно контакта, максимально нормальное давление на почву, реальное измененное удельное давление.

Katsadze V.A., Svoykin F.V., Grinkevich V.A., Rossikhin K.V. Experimental Studies to Determine the Ground Pressure of the TROM 25 Wheeled Log Picker. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 451–467 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.451-467

This paper presents a rationale for developing a technical solution based on industrial all-terrain vehicles with ultra-low-pressure pneumatic tires. The implementation for the forestry industry consists of the design and manufacture of the studied TROM 25 wheeled timber picker. The values of the contour contact area of the tread contact patch of each measured wheel of the TROM 25 wheeled timber picker were measured. The maximum normal pressure on the soil of the TROM 25 wheeled timber picker(8x8 wheel arrangement with Trom wheel equipment, 1960x900R38, and tire pressure of 50,000 Pa) were determined. The experimentally measured contact area of the TROM 25 wheeled timber picker (8x8 wheel arrangement with Trom wheel equipment, is indicated – 1960x900R38, and tire pressure is 50,000 Pa). A scientific innovation has been developed to determine the values of the contour contact area of the tread of each of the steering wheels, as well as to determine the contact patch of an ultra-low pressure pneumatic tire with the final support surface for forestry. The research resulted in the determination of the actual measured ground pressure of the TROM 25 wheeled timber picker, and recommendations for applying the results in real-world environmental and production conditions were provided.

Keywords: wheeled timber picker, TROM 25, industrial all-terrain vehicle, ultra-low-pressure pneumatic tires, contact patch, maximum normal ground pressure, actual measured ground pressure.

КАЦАДЗЕ Владимир Аркадьевич – доцент кафедры технологии лесозаготовительных производств Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук. SPIN-код: 3205-0333. ORCID: 0000-0002-2997-4947.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: tlzp@mail.ru

KATSADZE Vladimir A. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Logging Technology at the St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 3205-0333. ORCID: 0000-0002-2997-4947.

194021. Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. Email: tlzp@mail.ru

СВОЙКИН Федор Владимирович – доцент кафедры компьютерной графики и информационного права Санкт-Петербургского государственного морского технического университета, кандидат технических наук. SPIN-код: 8938-6910. ResearcherID: AAC-4074-2020. ORCID: 0000-0002-8507-9584.

190121, ул. Лоцманская, д. 3, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: svoykin_fv@mail.ru

SVOYKIN Fedor V. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Computer Graphics and Information Law at the St.Petersburg State Marine Technical University. SPIN-code: 8938-6910. ResearcherID: AAC-4074-2020. ORCID: 0000-0002-8507-9584.

190121. Lotsmanskaya str. 3. St. Petersburg. Russia. E-mail: svoykin_fv@mail.ru

ГРИНКЕВИЧ Всеволод Алексеевич – системный администратор завода вездеходной техники «ТРОМ».

628401, ул. Инженерная, д. 23, г. Сургут, Россия. E-mail: grinseva900@gmail.com

GRINKEVICH Vsevolod A. – System administrator of the all-terrain vehicle plant “TROM”.

628401. Inzhenernaya str. 23. Surgut. Russia. E-mail: grinseva900@gmail.com

РОССИХИН Кирилл Вадимович – аспирант Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: krossihin@gmail.com

ROSSIKHIN Kirill V. – PhD student, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: krossihin@gmail.com

УДК 630*383.6

А.Ф. Эйвазов, О.В. Зубова

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЕТИ ЛЕСНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Введение. Лесная дорожная сеть является основой транспортной системы лесного хозяйства, играя ключевую роль в лесозаготовке, лесоуправлении, противопожарной охране и рекреационной деятельности [Катаров и др., 2023; Heinimann, 2017]. Экономическая эффективность и устойчивость лесопользования тесно связаны с рациональностью проектирования и техническим состоянием лесных дорог [Akay, 2006]. Однако традиционные подходы к их проектированию часто сталкиваются с проблемами высокой стоимости, трудоемкости и ограниченной точности исходных данных, особенно под густым лесным пологом [Krogstad, Schiess, 2004; Hatta Antah et al., 2021]. Сложность рельефа местности, геологические особенности и необходимость соблюдения нормативных требований создают значительные трудности для инженеров-проектировщиков [Абдельвахаб, 2020; Jaafari et al., 2021,].

Задача оптимизации проектирования лесных дорог заключается в поиске наилучшего варианта трассы, минимизирующего суммарные затраты на её создание и эксплуатацию при соблюдении всех технических и нормативных ограничений [Пятин, 2020; Hrůza et al., 2018]. Проектирование лесных дорог регламентируется СП 288.1325800.2016 «Дороги лесные. Правила проектирования и строительства». С развитием вычислительной техники и методов математической оптимизации появились новые возможности для автоматизации процесса проектирования и повышения качества принимаемых решений [Matinnia et al., 2018; Kardoš et al., 2024].

Ключевым элементом для успешного применения оптимизационных моделей является наличие точных и детальных пространственных данных о рельефе. Технологии дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), в особенности воздушное лазерное сканирование (LiDAR), коренным образом изменили подходы к сбору такой информации [İnan, Öztürk, 2022; Watanabe et al., 2023]. Технология LiDAR позволяет получать цифровые

модели местности (ЦММ) и рельефа (ЦМР) с очень высокой точностью и разрешением, эффективно проникая сквозь лесной полог [Krogstad, Schiess, 2004; Watanabe et al., 2023]. Использование LiDAR, в том числе установленного на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА), обеспечивает повышенную детальность данных [Matinnia et al., 2018; Shin, 2022], что позволяет точно моделировать рельеф, выявлять оптимальные коридоры для прокладки трасс, идентифицировать препятствия и участки с неблагоприятными условиями (например, переувлажненные, оползнеопасные), а также оптимизировать объемы земляных работ.

В данной статье предлагается математическая модель оптимизации трассирования лесных автомобильных дорог, интегрирующая методы поиска оптимального пути на графе с высокодетальными данными о рельефе, полученными методом LiDAR. Целью модели является минимизация стоимости строительства дороги с учетом её длины, рельефных характеристик (влияющих на объемы земляных работ) и необходимости устройства водопропускных сооружений.

Методика и результаты исследования. Задача состоит в нахождении оптимального пути для лесной дороги между заданными начальной и конечной точками (или соединяющего несколько обязательных пунктов) на территории с известным рельефом, представленным ЦМР. Оптимальность понимается как минимизация стоимости строительства дороги.

Территория проектирования дискретизируется и представляется в виде взвешенного графа

$$G = (V, E),$$

где V – множество узлов, соответствующих точкам на ЦМР, а E – множество дуг, представляющих потенциальные элементарные сегменты дороги между соседними узлами [Пятин, 2020; Shin, 2022]. Каждой дуге e – (I, j) присваивается вес c_{ij}, представляющий стоимость строительства данного сегмента.

Минимизируется суммарная стоимость строительства дороги, представляющая собой сумму стоимостей всех сегментов (дуг), входящих в выбранный путь P:

$$Z = \sum_{(e \in P)} c_e * x_e \rightarrow \min, \qquad (1)$$

где x_e – бинарная переменная: $x_e = 1$, если дуга e включена в путь P, и $x_e = 0$ в противном случае.

Стоимость c_e для сегмента $e = (i, j)$ зависит от ряда факторов:

$$c_e = f\left(L_e, S_e, ET_e, WC_e\right), \tag{2}$$

где

- L_e – длина сегмента, учитывающая рельеф:

$$L_e = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}. \tag{3}$$

Базовая стоимость обычно пропорциональна длине и включает затраты на земляные работы. Однако существенную долю в общей стоимости строительства составляет устройство дорожной одежды (покрытия), которая может различаться по типу и толщине в зависимости от категории дороги и местных условий[1] [Jaafari et al., 2021];

- S_e – продольный уклон сегмента:

$$S_e = \frac{\left|z_j - z_i\right|}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}} * 100\%, \tag{4}$$

где $|z_j - z_i|$ – абсолютная разница высот между конечной (j) и начальной (i) точками сегмента, а $\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ – горизонтальная проекция длины сегмента. Увеличение продольного уклона S_e ведет к росту объемов перемещаемого грунта, что в свою очередь, требует работ по обеспечению устойчивости откосов. В модели это влияние учитывается через безразмерный коэффициент удорожания $k(S_e)$, который является функцией от величины уклона и определяется в соответствии с требованиями СП 288.1325800.2016 к проектированию лесных дорог в сложных рельефных условиях. Данный коэффициент $k(S_e) \geq 1$ и монотонно не убывает с ростом S_e. Коэффициент может быть представлен в виде полиномиальной зависимости (5):

$$k\left(S_e\right) = 1 + \frac{\sum_{n=1}^{N} a_n * \left(\frac{S_e}{100}\right)^n}{1 + b\left(\frac{S_e}{100}\right)^m}, \tag{5}$$

где S_e – уклон в процентах, а a_n, b, m – калибруемые коэффициенты, обеспечивающие асимптотическое приближение функции к максимальному значению при больших уклонах. В простейшем случае может использоваться кусочно-линейная аппроксимация, где для различных диапазонов

[1] СП 288.1325800.2016. Дороги лесные. Правила проектирования и строительства.

уклонов задаются определенные значения коэффициента. Для практического применения рекомендуется следующая шкала коэффициента удорожания в зависимости от величины уклона сегмента (табл. 1) (на основе СП 288.1325800.2016, [Абдельвахаб, 2020; Layton et al., 1992]):

Таблица 1

Коэффициенты удорожания

Price increase factors

Диапазон уклонов, %	$k(S_e)$	Обоснование/источник
0–4	1,00	Базовые условия, минимальные затраты
4–6	1,15	Увеличение объема земляных работ, необходимость укрепления откосов
6–8	1,30	Сложные условия, дополнительные мероприятия по устойчивости
8–10	1,50	Особо сложные условия, максимальные допустимые по СП 288
>10	1,80	Крайне сложные условия, допустимы только при обосновании, требуют специальных решений

• ET_e – оценка сложности земляных работ. Может косвенно учитываться через уклон S_e и перепад высот $|z_j – z_i|$ или более точно, если доступны данные о грунтах [Абдельвахаб, 2020]. Большая высота насыпи или глубина выемки значительно удорожают строительство;

• WC_e – стоимость водопропускного сооружения. Если сегмент e пересекает водоток, к c_e добавляется $C_{crossing}e$.

Упрощенная формула для стоимости сегмента может выглядеть так:

$$c_e = C_{base} * L_e * k(S_e) + C_{wear} * L_e + C_{crossing}e, \quad (6)$$

где C_{base} – нормативная стоимость строительства 1 км дороги на ровной местности, $k(S_e)$ – коэффициент, учитывающий удорожание из-за уклона (включая земляные работы), $C_{crossing}e$ – стоимость моста/трубы (ненулевая при пересечении водотока), C_{wear} – нормативная стоимость устройства дорожной одежды на 1 км (или 1 м) дороги, учитывающая проектные решения по конструкции покрытия и плечо транспортировки материалов. Минимизация целевой функции (1) с такой стоимостью (6) будет стремиться к выбору более коротких и пологих маршрутов с меньшим числом пересечений водотоков, что косвенно минимизирует объемы насыпей и выемок.

Ограничения:

1. Максимальный продольный уклон ($S_{\max}$): уклон каждого сегмента e в выбранном пути P не должен превышать нормативное значение и устанавливается согласно СП 288.1325800.2016, где для лесных дорог различных категорий установлены предельные значения уклонов:

$$S_e \le S_{\max} \forall e \in P.$$

Реализуется назначением очень большого (или бесконечного) веса c_e дугам, не удовлетворяющим этому условию;

2. Геометрические ограничения по плану: минимальные радиусы кривых. Эти ограничения сложнее учесть на этапе поиска пути в графе. Обычно их проверяют и обеспечивают на этапе детальной проработки трассы, корректируя путь, найденный моделью. Можно вводить штрафы за повороты с радиусами кривых меньше нормативных значений в стоимость c_e [Пятин, 2020; İnan, Öztürk, 2022]. Под резкими поворотами понимаются горизонтальные кривые с радиусами меньше минимально допустимых значений, установленных СП 288.1325800.2016 для соответствующей расчетной скорости движения. Согласно нормативным требованиям, минимальные радиусы кривых в плане составляют: при расчетной скорости 60 км/ч — не менее 300 м; при расчетной скорости 50 км/ч — не менее 200 м; при расчетной скорости 40 км/ч — не менее 150 м; при расчетной скорости 30 км/ч — не менее 100 м. В особо сложных условиях допускается снижение этих значений до 50 м при скорости 30 км/ч. Штраф за резкие повороты может быть реализован через увеличение весового коэффициента дуги c_e пропорционально отклонению от нормативного радиуса или установлением запретительно высокого веса для недопустимых радиусов поворота;

3. Для повышения экономической эффективности рекомендуется учитывать плечо транспортировки природных дорожно-строительных материалов для устройства дорожной одежды. В модель вводится дополнительное ограничение:

$$\sum_{e \in P} L_e * D_{tr,e} \le D_{\max},$$

где $d_{tr,e}$ — расстояние транспортировки материалов для сегмента e, $D_{\max}$ — максимально допустимая суммарная транспортная работа по доставке материалов.

Данное ограничение реализуется следующим образом:

1) Этап предварительной обработки данных:

a. На основе данных ЦМР и геологических изысканий определяются местоположения потенциальных карьеров дорожно-строительных материалов (песка, щебня, грунта);

b. Для каждого сегмента дороги e рассчитывается расстояние $d_{tr,e}$ до ближайшего источника материалов по автомобильным дорогам с использованием алгоритмов поиска кратчайшего пути.

2) Алгоритм реализации ограничения:

a. В процессе поиска оптимального пути алгоритм отслеживает накопленную транспортную работу: $D_{acc} = \Sigma L_e * D_{tr,e}$ для всех сегментов e, включенных в текущий путь;

b. При рассмотрении каждой новой дуги проверяется условие: $D_{acc} + L_{new} * D_{tr,new} \leq D_{\max}$;

c. Если условие не выполняется, дуга исключается из рассмотрения или ей присваивается запретительно высокий вес.

4. Избегание запретных зон: узлы и дуги, попадающие в зоны, где строительство запрещено (водоохранные зоны, особо защитные участки и т.д.), удаляются из графа или получают бесконечный вес.

Данные LiDAR, особенно полученные с БПЛА [Matinnia et al., 2018], являются основным источником для построения модели:

- Создание ЦМР: облако точек LiDAR обрабатывается для фильтрации растительности и построения высокоточной ЦМР. Точность ЦМР, достигаемая современными системами LiDAR, может составлять сантиметры по высоте [Hrůza et al., 2018; Matinnia et al., 2018, İnan, Öztürk, 2022], что критически важно для точного расчета уклонов и оценки земляных работ.
- Извлечение параметров: с помощью ГИС из ЦМР извлекаются: высотные отметки узлов графа z_i, уклоны S_e для всех дуг графа e, гидрологическая сеть (происходит идентификация водотоков и точек их пересечения с потенциальными сегментами дороги [Watanabe et al., 2023]), неблагоприятные участки (выявляются зоны с чрезмерными уклонами, потенциально оползневые участки [Watanabe et al., 2023], заболоченные территории на основе анализа производных ЦМР (кривизна, топографический индекс влажности и т.п.));
- Построение графа и стоимостей: данные ЦМР и извлеченные параметры используются для построения графа $G = (V, E)$ и расчета стоимостей c_e для каждой дуги согласно формулам (2) или (6).

Обсуждение. Описанная задача является задачей поиска кратчайшего пути во взвешенном графе. Для ее решения применяются стандартные алгоритмы:

- Алгоритм Дейкстры: гарантирует нахождение оптимального пути от источника ко всем остальным узлам [Shin, 2022];
- Алгоритм A*: часто более эффективен для поиска пути между двумя конкретными точками *s* и *t*;
- ГИС-инструменты: большинство ГИС-пакетов имеют встроенные инструменты для анализа сетей и поиска кратчайшего пути, основанные на этих алгоритмах [Watanabe et al., 2023].

Если требуется соединить множество точек (несколько лесосек), задача усложняется до задачи поиска дерева Штейнера минимальной стоимости, которая является NP-трудной [Пятин, 2020]. В таких случаях используются эвристические алгоритмы (MST, SPOH, RT) [Shin, 2022].

Предложенная математическая модель, использующая высокоточные данные LiDAR, позволяет значительно улучшить процесс проектирования лесных дорог по сравнению с традиционными методами. Основные преимущества заключаются в объективности, скорости и возможности анализа большого числа вариантов [Hatta Antah et al., 2021]. Точность ЦМР, получаемой с помощью LiDAR, позволяет детально учитывать рельеф и минимизировать объемы дорогостоящих земляных работ [Krogstad, Schiess, 2004; İnan, Öztürk, 2022]. Идентификация водотоков и неблагоприятных участков на ранней стадии помогает избежать ошибок и снизить будущие эксплуатационные расходы [, Shin, 2022; Watanabe et al., 2023].

Тем не менее важно понимать ограничения модели. Точность результата напрямую зависит от качества исходных данных LiDAR и корректности их обработки [Krogstad, Schiess, 2004; Matinnia et al., 2018]. Модель стоимости является упрощенной и требует калибровки для конкретных условий [Akay, 2006; Jaafari et al., 2021]. Явный расчет и балансировка земляных работ остаются задачами детального проектирования. Вычислительная сложность может стать проблемой для очень больших территорий, требуя эффективных реализаций алгоритмов поиска пути [Shin, 2022].

Заключение. Интеграция математического моделирования с данными воздушного лазерного сканирования (LiDAR) открывает новые возможности для оптимизации проектирования сети лесных автомобильных дорог. Представленная модель позволяет находить экономически эффективные трассы, минимизируя затраты на строительство с учетом рельефа, длины и пересечений водотоков. Использование высокоточных ЦМР, созданных по данным LiDAR, обеспечивает детальный учет местности и повышает качество проектных решений. Данный подход способствует переходу к более

объективному, быстрому и экономически обоснованному процессу проектирования лесной дорожной инфраструктуры, что является важным шагом на пути к устойчивому лесопользованию.

Вместе с тем дальнейшее развитие представленной модели предполагает интеграцию данных о типах грунтов на территории проектирования. Учет геологических условий является критически важным, поскольку тип грунта напрямую влияет на стоимость и сложность земляных работ: разработка скальных, мерзлых или переувлажненных грунтов существенно затратнее по сравнению с более податливыми грунтами. Кроме того, несущая способность основания, определяемая типом грунта, диктует требования к конструкции дорожной одежды и ее стоимости. Устойчивость откосов насыпей и выемок также зависит от характеристик грунта, что может потребовать изменения геометрии земляного полотна или применения специальных мер по укреплению. Включение информации о пространственном распределении различных типов грунтов, полученной из почвенных карт или данных инженерно-геологических изысканий, позволит дифференцировать затраты на отдельных участках трассы с большей точностью. Это усовершенствование повысит адекватность модели и надежность экономического обоснования при выборе оптимального маршрута лесной дороги, особенно в районах со сложными инженерно-геологическими условиями, способствуя принятию еще более взвешенных проектных решений.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Абдельвахаб М.А.Х. Обоснование методики проектирования производства земляных работ при строительстве лесовозных автомобильных дорог: автореф. дисс. … канд. техн. наук. СПб., 2020. 20 с.

Катаров В.К., Рожин Д.В., Сюнёв В.С. Оптимальное проектирование сети лесных дорог: от методов к решениям // Resources and Technology. 2023. Т. 20, № 3. С. 32–47.

Пятин Д.С. Совершенствование методов решения задачи автоматизированного планирования сети лесных дорог // Инженерный вестник Дона. 2020. № 4 (64). Ст. № 6428.

Akay A.E. Minimizing total costs of forest roads with computer-aided design model // Sadhana. 2006. Vol. 31, iss. 5. P. 621–633.

Hatta Antah F., Khoiry M.A., Abdul Maulud K.N., Abdullah A. Perceived Usefulness of Airborne LiDAR Technology in Road Design and Management: A Review // Sustainability. 2021. Vol. 13. Art. no. 11773.

Heinimann H.R. Forest Road Network and Transportation Engineering – State and Perspectives // Croatian journal of forest engineering. 2017. Vol. 38, iss. 2. P. 155–173.

Hrůza P., Mikita T., Tyagur N., Krejza Z., Cibulka M., Procházková A., Patočka Z. Detecting Forest Road Wearing Course Damage Using Different Methods of Remote Sensing // Remote Sensing. 2018. Vol. 10, iss. 4. Art. no. 492.

İnan M., Öztürk T. A simple approach on forest roads drainage structures planning using GIS: A case study of Şile-Turkey // Anatolian Journal of Forest Research. 2022. Vol. 8, iss. 2. P. 104–110.

Jaafari A., Pazhouhan I., Bettinger P. Machine Learning Modeling of Forest Road Construction Costs // Forests. 2021. Vol. 12, iss. 9. Art. no. 1169.

Kardoš M., Sačkov I., Tomaštík J., Basista I., Borowski Ł., Ferenčík M. Elevation Accuracy of Forest Road Maps Derived from Aerial Imaging, Airborne Laser Scanning and Mobile Laser Scanning Data // Forests. 2024. Vol. 15, iss. 5. Art. no. 840.

Krogstad F., Schiess P. The allure and pitfalls of using LiDAR topography in harvest and road design // Joint Conference of IUFRO 3.06 Forest Operations under Mountainous Conditions and the 12th International Mountain Logging Conference. 2004. 10 p.

Layton D.A., LeDoux C.B., Hassler C.C. Cost Estimators for Construction of Forest Roads in Central Appalachians. USDA Forest Service, NE-RP-665, 1992. 4 p.

Matinnia B., Parsakhoo A., Mohamadi J., Shataee Jouibary S. Study of the LiDAR accuracy in mapping forest road alignments and estimating the earthwork volume // Journal of Forest Science. 2018. Vol. 64, iss. 11. P. 469–477.

Shin J. Road-network location heuristics for the tactical harvest scheduling model: master's thesis. Lakehead University, 2022. 53 p.

Watanabe M., Saito M., Toda K., Shirasawa H. Rain-Driven Failure Risk on Forest Roads around Catchment Landforms in Mountainous Areas of Japan // Forests. 2023. Vol. 14, iss. 3. Art. no. 537.

References

Abdelwahab M.A.Kh. Substantiation of methodology for designing earthwork production during the construction of timber transport roads: author’s abstract. Diss. … Cand. Tech. Sci. St. Petersburg, 2020. 20 p. (In Russ.)

Akay A. E. Minimizing total costs of forest roads with computer-aided design model. *Sadhana*, 2006, vol. 31, iss. 5, pp. 621–633.

Hatta Antah F., Khoiry M.A., Abdul Maulud K.N., Abdullah A. Perceived Usefulness of Airborne LiDAR Technology in Road Design and Management: A Review. *Sustainability*, 2021, vol. 13, art. no. 11773.

Heinimann H.R. Forest Road Network and Transportation Engineering – State and Perspectives. *Croatian journal of forest engineering*, 2017, vol. 38, iss. 2, p. 155–173.

Hrůza P., Mikita T., Tyagur N., Krejza Z., Cibulka M., Procházková A., Patočka Z. Detecting Forest Road Wearing Course Damage Using Different Methods of Remote Sensing. *Remote Sensing*, 2018, vol. 10, iss. 4, art. no. 492.

İnan M., Öztürk T. A simple approach on forest roads drainage structures planning using GIS: A case study of Şile-Turkey. *Anatolian Journal of Forest Research*, 2022, vol. 8, iss. 2, pp. 104–110.

Jaafari A., Pazhouhan I., Bettinger P. Machine Learning Modeling of Forest Road Construction Costs. *Forests*, 2021, vol. 12, iss. 9, art. no. 1169.

Kardoš M., Sačkov I., Tomaštík J., Basista I., Borowski Ł., Ferenčík M. Elevation Accuracy of Forest Road Maps Derived from Aerial Imaging, Airborne Laser Scanning and Mobile Laser Scanning Data. *Forests*, 2024, vol. 15, iss. 5, art. no. 840.

Katarov V.K., Rozhin D.V., Syunyov V.S. Optimal Design of Forest Road Networks: From Methods to Solutions. *Resources and Technology,* 2023, vol. 20, no. 3, pp. 32–47. (In Russ.)

Krogstad F., Schiess P. The allure and pitfalls of using LiDAR topography in harvest and road design. *Joint Conference of IUFRO 3.06 Forest Operations under Mountainous Conditions and the 12th International Mountain Logging Conference*. 2004, 10 p.

Layton D.A., LeDoux C.B., Hassler C.C. Cost Estimators for Construction of Forest Roads in Central Appalachians. USDA Forest Service, NE-RP-665, 1992. 4 p.

Matinnia B., Parsakhoo A., Mohamadi J., Shataee Jouibary S. Study of the LiDAR accuracy in mapping forest road alignments and estimating the earthwork volume. *Journal of Forest Science*, 2018, vol. 64, iss. 11, pp. 469–477.

Pyatin D.S. Improving Methods for Solving the Problem of Automated Planning of Forest Road Networks. *Engineering Bulletin of the Don,* 2020, no. 4 (64), art. no. 6428. (In Russ.)

Shin J. Road-network location heuristics for the tactical harvest scheduling model: master's thesis. Lakehead University, 2022. 53 p.

Watanabe M., Saito M., Toda K., Shirasawa H. Rain-Driven Failure Risk on Forest Roads around Catchment Landforms in Mountainous Areas of Japan. *Forests*, 2023, vol. 14, iss. 3, art. no. 537.

Материал поступил в редакцию 15.05.2025

Эйвазов А.Ф., Зубова О.В. Математическая модель оптимизации проектирования сети лесных автомобильных дорог с использованием данных дистанционного зондирования // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 468–479. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.468-479

Эффективное проектирование сети лесных дорог является ключевым фактором для оптимизации затрат на лесозаготовительные операции, лесоуправление и обеспечение устойчивого доступа к лесным ресурсам. Традиционные подходы к проектированию часто сталкиваются с проблемами высокой стоимости, трудоемкости и ограниченной точности исходных данных,

особенно в сложных рельефных условиях и под густым лесным пологом. Данная статья представляет математическую модель, разработанную для автоматизированного проектирования и оптимизации трасс лесных автомобильных дорог. Территория проектирования дискретизируется и представляется в виде взвешенного графа, где узлы соответствуют точкам на цифровой модели рельефа (ЦМР), а дуги – потенциальным сегментам дороги. Модель направлена на минимизацию суммарной стоимости строительства дороги. Эта стоимость рассчитывается с учетом длины каждого сегмента трассы с поправкой на рельеф, продольный уклон, влияющий на объемы земляных работ (насыпей и выемок) через специальный коэффициент удорожания, а также необходимость устройства водопропускных сооружений при пересечении водотоков. Особое внимание уделяется интеграции в модель высокодетальных данных о рельефе местности, полученных с помощью современных методов дистанционного зондирования Земли, в частности, воздушного лазерного сканирования (LiDAR), в том числе с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Применение LiDAR позволяет получать высокоточные ЦМР, эффективно проникая сквозь лесной полог, что критически важно для точного моделирования рельефа, выявления оптимальных коридоров, идентификации препятствий (переувлажненных или оползнеопасных участков) и оптимизации объемов земляных работ. В статье описаны математическая постановка задачи оптимизации как поиск кратчайшего пути на графе, целевая функция минимизации затрат, система ограничений. Рассмотрены методы получения исходных данных из облаков точек LiDAR: создание ЦМР, извлечение высотных отметок, расчет уклонов и идентификация пересечений с гидрографической сетью с применением геоинформационных систем (ГИС). Разработанная модель, использующая алгоритмы поиска оптимального пути (Дейкстры, A*), создает основу для объективного, быстрого и экономически обоснованного выбора оптимального варианта трассы лесной дороги, способствуя повышению качества проектных решений. Авторы также указывают на перспективы дальнейшего развития модели, включая интеграцию данных о типах грунтов.

Ключевые слова: лесная дорога, оптимизация проектирования, LiDAR, БПЛА, цифровая модель рельефа, ГИС, стоимость строительства.

Eyvazov A.F., Zubova O.V. A mathematical model for optimizing the design of a forest highway network using remote sensing data. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 468–479 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.468-479

Effective design of forest road networks is crucial for optimizing logging costs, forest management, and sustainable access to resources. Traditional approaches often suffer from high costs, labor intensity, and limited accuracy of initial data, especially in complex terrain and dense forests. This article presents a mathematical model for

computer-aided design and optimization of forest road routes. The project area is discretized as a weighted graph, with nodes representing points on the digital terrain model (DEM) and arcs representing potential road segments. The model aims to minimize total construction cost, considering segment length, terrain, longitudinal slope (affecting earthwork volumes) via a special appreciation coefficient, and the need for culverts at watercourse crossings. Special attention is given to integrating highly detailed terrain data obtained through airborne laser scanning (LiDAR), including unmanned aerial vehicles (UAVs). LiDAR enables high-precision DEMs that penetrate the forest canopy, which is essential for accurate terrain modeling, identifying optimal corridors, obstacles (e.g., waterlogged or landslide-prone areas), and optimizing earthwork volumes. The article details the mathematical formulation as a shortest path problem on a graph, with a cost-minimizing objective function and constraints. Methods for extracting initial data from LiDAR point clouds are discussed: DEM creation, elevation extraction, slope calculation, and hydrographic network analysis using GIS. The developed model, utilizing optimal path algorithms (Dijkstra, A*), provides an objective, efficient, and economically justified choice of forest road routes, enhancing design quality. The authors also discuss prospects for further model development, including integrating soil type data.

Keywords: forest road, design optimization, LiDAR, UAV, digital terrain model, GIS, construction cost.

ЭЙВАЗОВ Али Фируддинович – аспирант Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 8022-1192. ORCID: 0009-0005-3229-8459.

194021, Институтский пер., д. 5, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: thefezerstyle@gmail.com

EYVAZOV Ali F. – PhD student, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 8022-1192. ORCID: 0009-0005-3229-8459.

194021. Institutsky per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: thefezerstyle@gmail.com

ЗУБОВА Оксана Викторовна – доцент кафедры промышленного транспорта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук. SPIN-код: 6997-4065. ORCID: 0000-0002-6263-4688.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: ok_z19@mail.ru

ZUBOVA Oksana V. – PhD (Technical), Associate Professor, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 6997-4065. ORCID: 0000-0002-6263-4688.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: ok_z19@mail.ru

УДК 621.793 : 630.36

В.В. Трубников, В.А. Марков, А.В. Трофимов, А.М. Хахина, И.А. Зверев

АНАЛИЗ АНТИКОРРОЗИЙНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЕСНЫХ МАШИН

Введение. В настоящее время металлы и их сплавы в качестве конструкционных материалов играют важную роль во всех отраслях промышленности и сельского хозяйства. Свойства объекта – прочность, пластичность, высокая электропроводность, теплопроводность, металлический блеск, хорошая обрабатываемость и др. – обеспечивают универсальность их применения.

Металлы химически активны и при контакте с внешней средой подвергаются разрушению, которое называют коррозией [Быкова, 2018; Олиференко и др., 2021]. Процесс является одной из главных причин разрушения материалов, что приводит к значительным экономическим потерям. Анализ технологий борьбы с коррозией позволяет понять, какие методы и подходы наиболее эффективны для машин лесной отрасли, а также выявить ошибки и недостатки, которых можно избежать правильным выбором способа защиты.

Борьба с коррозией является актуальной научной, повседневной проблемой с глубокой древности, с тех пор как появились первые изделия из металла. Основным видом защиты уже в те времена были, как и сейчас, защитные покрытия. Например, в Древнем Египте в качестве покрытий использовали природные смолы, а в 950 г. до н. э. при строительстве дворца Соломона железные сооружения покрывали асфальтом [Различные…, 2014].

Начало научного изучения коррозии связано с работами М.В. Ломоносова, которому принадлежит открытие в 1748 г. закона сохранения массы. Ломоносов изучал растворение металлов в кислотах и показал принципиальное отличие механизма их растворения от растворения солей, при котором тепло поглощается [Различные…, 2014; Олиференко и др., 2021].

При оценке воздействия коррозии на поверхность металла лесных машин необходимо учитывать внешние природные и технологические факторы. Эксплуатация систем проходит в тяжелых условиях, связанных с повышенной влажностью и знакопеременными температурами, при

движении машин по лесу происходит контакт с ветвями деревьев, который может вызывать царапины и отслоения краски, способствующие ускоренному развитию явления. Понимание процессов коррозии и методов защиты от нее является важной задачей для инженеров и ученых, так как это позволяет продлить срок службы конструкций и снизить затраты на их обслуживание и ремонт.

Успешную борьбу с коррозией в связи со сложными и разнообразными запросами современной техники уже невозможно проводить на основе чисто экспериментального подбора новых устойчивых металлических материалов и методов их защиты. Необходимо развивать комплексные научные исследования коррозионных явлений [Голубев, 2013].

Защиту от коррозии возможно предусматривать как непосредственно на стадии проектирования и изготовления машины, так и в процессе ее эксплуатации. На первых этапах важно произвести грамотный выбор материала детали, ее термической, химической или другой обработки, а также предусмотреть поверхностную защиту в виде краски или эмали. На стадии эксплуатации мы ограничены только видом и способом нанесения антикоррозионного покрытия [Шемякин и др., 2016].

Материалы и методика исследования. Представленный в работе обзор базируется на трудах отечественных и зарубежных исследователей в области методов защиты металлов и сплавов от коррозии, практики использования различных антикоррозийных покрытий (металлических, неметаллических, химических и альтернативных), а также области автоматизации нанесения антикоррозийных покрытий. Использованы методы сбора и обработки информации. Для наглядного представления рассматриваемых в работе защитных покрытий представлены изображения их микроструктур, которые были получены с использованием лабораторного оборудования – светового оптического микроскопа Leica DMI 5000, оснащенного системой анализа изображений Thixomet.

Цель работы – провести обзор различных видов антикоррозийных покрытий, которые могут быть использованы для защиты несущих конструкций лесных машин от воздействия коррозии, а также выделить технологические особенности нанесения покрытий с учетом возможности автоматизации процесса в условиях ремонтных предприятий.

Результаты исследования. Классификация антикоррозийных покрытий достаточно объёмна и продолжает совершенствоваться. Наиболее распространённая схема представлена на рис. 1.

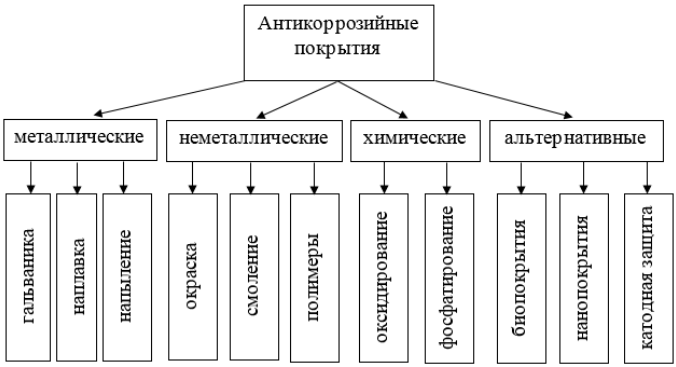


Рис. 1. Виды антикоррозийных покрытий
Fig. 1. Types of anti-corrosion coatings

Рассмотрим наиболее популярные методы нанесения различных типов покрытий для повышения коррозионной стойкости металлических несущих конструкций лесных машин (рам и кузовных элементов).

Металлические антикоррозийные покрытия. Металлическими покрытиями называют искусственно созданные на поверхности защищаемого изделия слои металла с целью защиты от коррозии. Роль покрытия как средства защиты от коррозии сводится в основном к изоляции металла от внешней среды. Помимо защиты от коррозии, покрытия могут придать деталям лесных машин дополнительные полезные свойства, такие как твердость, износостойкость, а также декоративные качества. Существует множество методов нанесения металлических покрытий на поверхности деталей. К ним относятся гальваника, наплавка, напыление и др. [Гайдар, 2011].

Сравнивая представленные методы нанесения покрытий, с нашей точки зрения, для крупногабаритных деталей машин (таких как рама) наиболее предпочтительным является напыление, так как наплавки в основном применимы для тел вращения, а гальваника сложна, к тому же требует ванн большого размера и соблюдения ряда экологических норм.

Напыление имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами нанесения металлических покрытий, такие как простота и мобильность установок, возможность автоматизации процесса, низкая технологическая себестоимость нанесения покрытия и возможность создавать покрытия относительно большой толщины с заданными физико-механическими свойствами. Перспективным способом напыления стальных деталей является

холодное газодинамическое напыление (ХГН) порошковых композиционных материалов. При этом процессе происходит минимальное негативное воздействие на восстанавливаемую поверхность за счет щадящих температур (около 400°С). В качестве порошковых материалов могут выступать алюминий, цинк, медь, хром и другие металлы, а также их композиции. На рис. 2 представлена микроструктура покрытия алюминий-цинк, полученного методом ХГН. Светлая фаза на изображении является цинком, а темная – алюминием. Варьируя химическим составом и технологическими параметрами нанесения покрытия, возможно изменять его характеристики, придавая особые свойства деталям машин [Клинков, 2013; Баринов и др., 2024].

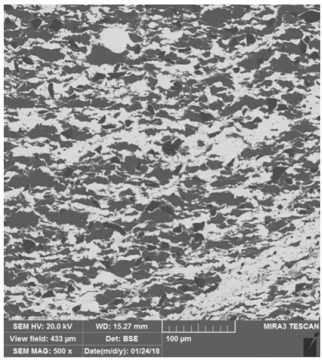


Рис. 2. Микроструктура покрытия алюминий-цинк
Fig. 2. Microstructure of aluminum-zinc coating

Неметаллические антикоррозийные покрытия. К неметаллическим покрытиям относятся краски, лаки, смолы, эмали, полимеры и многое другое (около 80% покрытий, применяемых в промышленности). Такие покрытия отличаются от металлических отсутствием электропроводности, что делает их неподверженными коррозии. Разрушение таких покрытий происходит механическим и химическим путем.

Как правило, такие покрытия наносятся слоем небольшой толщины (до 160 мкм) и защищают лишь от поверхностной коррозии. В процессе эксплуатации лесной техники покрытия повреждаются и отслаиваются при механическом воздействии и вибрациях. Агрессивная среда в этом случае начинает действовать на металлические элементы машины, вызывая очаги коррозии в местах повреждений покрытий и областей рядом с ними. Следует учитывать, что неметаллические покрытия обладают значительно

меньшей термостойкостью, чем металлические и при значительных знакопеременных перепадах температуры окружающей среды и отдельных примыкающих агрегатов машины (например, двигатель), начинают интенсивно разрушаться [Шифрин, Попова, 2023].

Помимо красок, лаков и эмалей, для защиты от коррозии применяют также неметаллические покрытия из резины, смолы и наиболее прогрессивных полимерных материалов. Полимеры отличаются высокой химической стойкостью к действию многих агрессивных сред и в некоторых случаях способны заменить лакокрасочное покрытие, так как могут быть применены в сочетании с декоративными пигментами.

Полимерные покрытия значительно более износостойки и представляют собой длинные цепочки мономеров (соединений), которые могут образовывать различные пространственные структуры.

Структура полимерного антикоррозийного покрытия, сформированная на основе нитрида кремния, представлена на рис. 3. Основным недостатком покрытий является высокая стоимость и более сложная по сравнению с красками технология нанесения [Buketov et al., 2018].

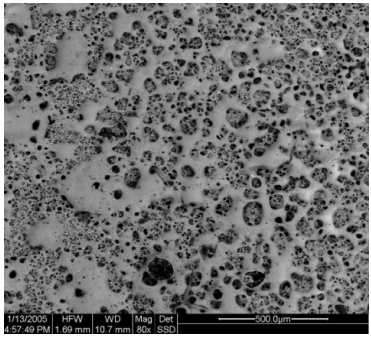


Рис. 3. Микроструктура полимерного покрытия
Fig. 3. Microstructure of the polymer coating

Химические антикоррозийные покрытия. К химической группе защитных антикоррозийных покрытий относят оксидные и фосфатные пленки, пассивирование и др. Оксидную пленку на стали можно получить электрохимическим окислением в электролитах, путем химической обработки в кислых или щелочных окислительных растворах, а также нагревом в атмосфере водяного пара. Наибольшее распространение в промышленности получили химические методы щелочного и паротермического оксидирования стали.

Паротермическое оксидирование производится в токе перегретого водяного пара при температуре 600°С. Образующаяся оксидная пленка состоит в основном из чистого магнетита Fe_3O_4. Такие методы защиты называются еще грунтами и эффективны лишь в сочетании с лакокрасочным покрытием, которое необходимо наносить поверх [Закиров и др., 2006; Исаев и др., 2020; Kapustin et al., 2023].

Фосфатное покрытие образуется путем химической реакции между фосфатными солями и поверхностью металла. Формируется тонкий слой кристаллического фосфата железа, цинка или марганца, который защищает металл от коррозии. Метод часто используется для стальных изделий перед покраской или нанесением других защитных слоев. Пример такого покрытия представлен на рис. 4.

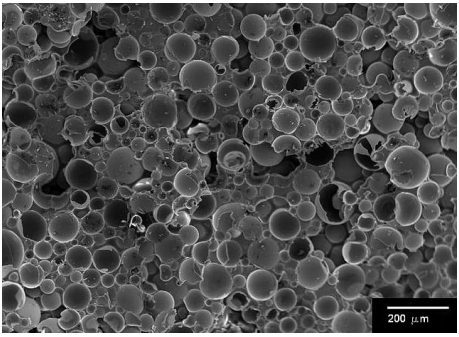


Рис. 4. Фосфатные покрытия
Fig. 4. Phosphate coatings

Пассивирование является процессом формирования тонкой пассивной пленки на поверхности металла, которая предотвращает дальнейшее окисление. Например, нержавеющая сталь защищена естественным слоем оксида хрома, образующимся при контакте с кислородом воздуха [Агабеков, 2015].

Химические антикоррозионные покрытия имеют значительно меньшую толщину, чем неметаллические и тем более металлические. В некоторых случаях толщина покрытия ограничена технологическими возможностями метода. Например, при анодировании алюминия максимальная толщина оксидного слоя составляет несколько микрон, что может оказаться недостаточным для обеспечения длительной защиты в особо агрессивных условиях. Процесс нанесения достаточно сложен технологически, часто токсичен и дорог. Вид покрытий нашел большее применение в таких сферах, как пищевая и химическая промышленность.

Альтернативные антикоррозийные покрытия. Альтернативные методы нанесения антикоррозийных покрытий на текущий момент не нашли широкого применения в серийном и массовом машиностроительном производстве. Это связано в первую очередь с низкой эффективностью методов по сравнению с классическими технологиями, а также ограниченностью применения и недостаточной научной обоснованностью. К таким покрытиям можно отнести биологическую обработку или использование бактерий, производящих антикоррозийные вещества, создание биополимерных покрытий. К этой группе относятся нанотехнологии, хорошо себя зарекомендовавшие в приборостроении и медицине, но не подходящие в силу объема производства для среднесерийного машиностроения.

Альтернативными технологиями защитных покрытий можно назвать подход, основанный на использовании материалов, способных восстанавливать свою структуру после повреждений. Например, самовосстанавливающиеся покрытия могут содержать микрокапсулы с антикоррозийным составом, который высвобождается при появлении царапины или трещины. Пример такого материала и процесс самовосстановления трещины представлен на рис. 5. Практика показывает, что количество восстановлений не бесконечно, и затягивание трещин и повреждений возможно только на микроуровне (восстановление эстетических характеристик лака и краски), что неактуально для лесных машин [Скивко и др., 2019].

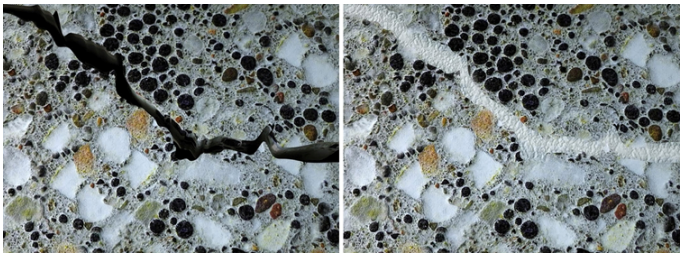


Рис. 5. Структура самовосстанавливающихся покрытий
Fig. 5. Structure of self-healing coatings

Интересным, но малоизученным методом образования покрытий является метод катодной защиты, основанный на использовании электрического тока для изменения потенциала металлической поверхности таким образом, чтобы она стала менее подверженной коррозии [Ryndin et al., 2018].

Альтернативным методом защиты от коррозии является нанесение полифторалкиловых эфиров (PFAE), представляющих собой класс химиче-

ских соединений, которые активно используются в различных отраслях промышленности благодаря своим уникальным свойствам. Они обладают высокой химической стойкостью и термостойкостью, что делает их особенно полезными в условиях агрессивных сред. К тому же эти вещества относятся к так называемой «зеленой химии», так как производятся полностью из растительного сырья.

Трициклические дитерпеновые кислоты ряда абиетана составляют значительную часть канифоли – побочного продукта ЦБП. Огромные объемы образования канифоли при переработке древесины представляют перспективную сырьевую базу. Получение таких эфиров возможно осуществить непосредственно из живицы или канифоли по реакции диенового синтеза с N-замещенными малеимидами. Эти материалы дешевы в производстве, безопасны, экологичны, однако, как и большинство других альтернативных технологий, мало изучены, что затрудняет промышленное применение в машиностроении [Попова и др., 2019].

Выбор метода нанесения защитного антикоррозийного покрытия является сложной задачей для машиностроительного производства. Необходимо учитывать специфику эксплуатации машины, технологические особенности производства, экологические нормы и экономическую целесообразность принятых решений. По мнению авторов работы, для несущих элементов и некоторых кузовных деталей лесных машин целесообразно применение сочетания металлического покрытия, нанесенного методом холодного газодинамического напыления, и классического лакокрасочного покрытия (рис. 6).

Важным технологическим параметром при нанесении покрытия является шероховатость поверхности. Необходимо обеспечить подготовку основного материала (стали) с шероховатостью Rz1 для нанесения холодного газодинамического покрытия и обеспечить шероховатость Rz2 для нанесения на покрытие лакокрасочного материала. При этом обе рассматриваемые шероховатости будут влиять в значительной мере на адгезию слоев материалов ($\tau 1$ и $\tau 2$).

Определение оптимальных параметров нанесения, толщины и материалов для металлического и лакокрасочного покрытия являются отдельными задачами для продолжения исследования. Инновации в этой области дают огромные перспективы для будущего, открывая новые границы применения и повышения эффективности защиты от коррозии. Комбинированный подход к выбору технологий, основанный на анализе каждого конкретного случая, приведет к обеспечению надежной защиты материалов и уменьшит риски, связанные с коррозией.

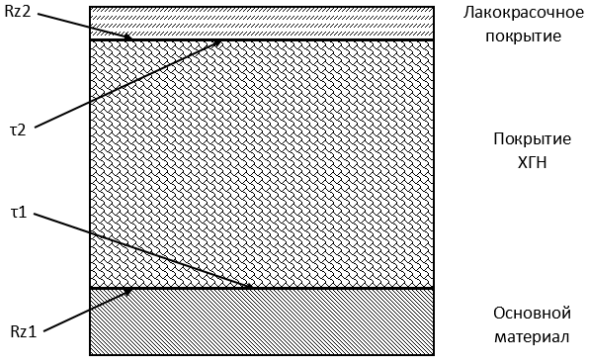


Рис. 6. Схема поверхностей, образованных сочетанием методов холодного газодинамического напыления и классического лакокрасочного покрытия

Fig. 6. Diagram of surfaces formed by a combination of cold gas-dynamic spraying and classic paint coating methods

Как показывает производственная практика нанесения защитных покрытий, степень автоматизации технологического процесса оказывает существенное влияние на качество наносимого слоя. Автоматизация позволяет минимизировать человеческий фактор, исключив вероятность ошибок оператора и повысив точность соблюдения технологических режимов. Современные средства автоматизации обеспечивают стабильное нанесение заданного слоя покрытия, равномерность его распределения по поверхности подложки, а также соблюдение специальных технологических параметров, таких как расстояние от сопла установки до восстанавливаемой поверхности, угол наклона сопла и другие [Иванов, Шифрин, 2024].

По современной классификации существует шесть степеней автоматизации машиностроительного производства. На рис. 7 представлена иерархия подходов применительно к операции нанесения покрытия.

Рассмотрим более подробно предложенную классификацию.

Ручные работы – это самый низкий уровень автоматизации, точнее ее полное отсутствие, при котором операции выполняются вручную человеком. Используется редко и лишь там, где невозможно применить механизмы либо технологически оправдано применять ручной труд. При нанесении защитных покрытий ручные работы могут применяться при использовании неметаллических, химических или альтернативных методов обработки поверхности детали (согласно классификации, приведенной на рис. 1).

Рис. 7. Степени автоматизации нанесения антикоррозионных покрытий
Fig. 7. Degrees of automation of anti-corrosion coating application

Механизированные работы являются второй ступенью в иерархии автоматизации. Отдельные этапы производственного цикла выполняются машинами, однако контроль над процессом остается за оператором. Человек осуществляет управление оборудованием, закрепление заготовок, настройку параметров процесса и другие вспомогательные операции. Стоит отметить, что в ремонтно-восстановительной практике, которая в основном относится к единичному и мелкосерийному производству, механизированные работы занимают существенную долю общей трудоемкости.

Частично автоматизированные процессы предполагают выполнение основных рабочих циклов машиной самостоятельно, тогда как человек занимается подготовкой оборудования, контролем качества, заменой инструмента и устранением неисправностей. Такой вид автоматизации характерен для серийного производства и является, с нашей точки зрения, рациональным для оборудования и машин лесной отрасли. Явными преимуществами частичной автоматизации будут являться значительно более высокое качество покрытий (по сравнению с ручным трудом и механизацией) при относительно невысоких затратах на оборудование и оснастку [Соколов, 2009].

При полной автоматизации весь технологический цикл нанесения защитных покрытий осуществляется практически без вмешательства человека. Операторы занимаются исключительно обслуживанием и мониторингом работы комплекса. Подход осуществим лишь в условиях крупносерийного или массового производства, нехарактерных для лесного машиностроения. Применение полной автоматизации нанесения защитных покрытий возможно в условиях машиностроительного завода, производя-

щего лесную технику или ее элементы. На ремонтном заводе нецелесообразно применение полной автоматизации из-за нерегулярности восстановительных работ, широкой номенклатуры восстанавливаемых изделий и высокой стоимости оборудования.

Интегрированные автоматизированные системы управления производством (АСУП) являются пятой ступенью иерархии автоматизации процессов. Интеграция всех производственных участков предприятия в единую систему позволяет централизованно управлять процессами, оптимизировать загрузку оборудования, планировать производство и оперативно реагировать на изменения спроса. Системы применимы на глобальных предприятиях в крупных корпорациях. Закупка, контроль качества сырья, процессы нанесения и последующего контроля параметров покрытий могли бы осуществляться полностью без участия человека, однако для лесного машиностроения такая степень автоматизации на современном этапе развития недоступна [Кочковская, Сердюк, 2019].

Самый высокий уровень автоматизации (цифровое производство) включает внедрение цифровых технологий. Предприятия переходят к цифровой модели проектирования, моделирования и мониторинга всего жизненного цикла продукта. Широко используются технологии виртуальной реальности, дополненной реальности, «большие данные» и др. Однако, как и говорилось выше, указанный уровень автоматизации является перспективным, но недоступным для лесного машиностроения на текущий момент времени [Муравьев, Шифрин, 2024].

Заключение. Подводя итоги, можно сделать следующие выводы относительно технологических особенностей нанесения антикоррозийных покрытий на несущие элементы конструкции лесных машин.

1. Для несущих элементов и некоторых кузовных деталей лесных машин целесообразно применение сочетания металлического покрытия, нанесенного методом холодного газодинамического напыления, и классического лакокрасочного покрытия.

2. Подготовка поверхности под нанесение покрытия является важной технологической задачей, обеспечение требуемых параметров шероховатости подложки и шероховатости нанесенного металлического слоя для дальнейшего нанесения лакокрасочного покрытия окажут существенное влияние на качество защитных свойств.

3. Частичная автоматизация является наиболее рациональным решением для процесса нанесения защитного покрытия методом холодного газодинамического напыления в условиях ремонтных предприятий лесной

отрасли. Однако, при изготовлении деталей в условиях машиностроительного предприятия может быть применен более высокий уровень автоматизации.

Вклад авторов. Трубников В.В. – постановка цели и задач исследования, сбор и обработка информации, получение микроструктур покрытий (50%); Марков В.А. – сбор и обработка информации, получение микроструктур покрытий (20%); Трофимов А.В. – сбор и обработка информации (10%); Хахина А.М. – сбор и обработка информации (10%); Зверев И.А. – общее руководство работой (10%).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Агабеков В.Е. Наноструктурированные материалы различного функционального назначения // Наноструктурные материалы: Беларусь-Россия-Украина (НАНО-2014): сб. пленар. докл. IV Межд. науч. конф. / гл. ред. П.А. Витязь. Минск, 2015. С. 145-153.

Баринов Д.В., Марков В.А., Трубников В.В., Шифрин Б.М. Коррозионные свойства газодинамических покрытий // Фундаментальные основы механики. 2024. № 14. С. 129-133. DOI: 10.26160/2542-0127-2024-14-129-133.

Быкова Е.В. Оборудование для нанесения перфторированных защитных покрытий с целью улучшения сохраняемости сельскохозяйственной техники // Международный технико-экономический журнал. 2018. № 3. С. 58–64.

Гайдар С.М. Теория и практика создания ингибиторов коррозии для консервации сельскохозяйственной техники: монография. М.: Росинформагротех, 2011. 304 с.

Голубев М.И. Новые материалы для защиты лесных машин от коррозии // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. 2013. №1(93). С.40–41.

Закиров Д.М., Зонтаг Б., Добровольскис П., Алин Ш., Гоуфек И. Пассивирование цинковых покрытий в растворах на основе Cr(III) во вращающихся установках // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2006. № 4(16). С. 108-110.

Иванов Н.А., Шифрин Б.М. Автоматизация дефектоскопии путем использования компьютерного зрения и искусственного интеллекта // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: мат. XXII Межд. науч.-тех. конф. Вологда, 2024. С. 154-157.

Исаев М.К., Гончарова Л.А., Капустин Ю.И., Колесников А.В. Физико-химические свойства оксидных покрытий на основе рутения титана и редкоземельных элементов при допировании углеродными наноматериалами // Стекло и керамика. 2020. № 3. С. 3-9.

Клинков С.В. Управление эрозионно-адгезионным переходом при ХГН: дисс. … д-ра физ.-мат. наук. Новосибирск, 2013. 299 с.

Кочковская С.С., Сердюк А.И. Архитектура и программная реализация подсистемы управления производственными ресурсами в АСУП сталеплавильного производства // Автоматизация в промышленности. 2019. № 8. С. 43-46.

Различные аспекты применения химии в повседневной жизни: тез. докл. межфак. студ. науч.-тех. конф. СПб.: СПбГТУРП, 2014. 52 с.

Муравьев А.Г., Шифрин Б.М. Цифровой двойник: история создания и современная концепция // Сб. ст. по мат. науч.-тех. конф. института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2023 г. СПб., 2024. С. 390-395.

Олиференко Г.Л., Иванкин А.Н., Устюгов А.В., Зарубина А.Н. Проблема коррозии технологического оборудования на предприятиях по химической переработке древесины (обзор) // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2021. Т. 25. № 3. С. 142–151.

Попова Л.М., Иванова В.А., Вершилов С.В. Синтез N-фенилимидов полифторалкиловых эфиров малеопимаровой кислоты // Химия растительного сырья. 2019. № 2. С. 205-211.

Скивко П.В., Макаров А.В., Силаева А.А., Квасников М.Ю., Ко Зо А. Методики получения микрокапсул для применения в лакокрасочных системах // Успехи в химии и химической технологии. 2019. Т. 33, № 6(216). С. 88-90.

Соколов Ю.А. Автоматизация процесса нанесения металлических и керамических порошковых материалов на поверхности изделий методом плазменного напыления // Промышленные АСУ и контроллеры. 2009. № 11. С. 14-16.

Шемякин А.В., Терентьев В.В., Морозова Н.М., Кожин С.А., Кирилин А.В. Применение метода катодной протекторной защиты для снижения потерь металла при хранении сельскохозяйственной техники // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2016. № 4(32). С. 93–97.

Шифрин Б.М., Попова Д.А. Разработка IDEF-модели процесса контроля качества // Сб. ст. по мат. науч.-тех. конф. института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2022 г. СПб., 2023. С. 350-354.

Buketov A.V., Brailo M.V., Stukhlyak D.P., Yakushchenko S.V., Sapronov O.O., Cherniavskyi V.V., Husiev V.M., Dmitriev D.A., YatsyukV.M., Bezbakh O.M., Negrutsa R.Yu. Optimization of components in development of polymeric coatings for restoration of transport vehicles // Bulletin of the Karaganda University. Mathematics Series. 2018. No. 4(92). P. 119-131. DOI: 10.31489/2018M4/119-131.

Kapustin S.N., Volkov A.S., Tsykareva Yu.V. Icing and chemical pollution sensor based on carbon nanoparticles-based superhydrophobic coating // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2023. Vol. 16, no. S3.2. P. 239-243. DOI: 10.18721/JPM.163.241.

Ryndin V.V., Abdullina G.G., Abdullin A.T. Analysis of passive methods of protection from corrosion of main oil and gas pipelines // Science and Technology of Kazakhstan. 2018. No. 2. P. 91-100.

References

Agabekov V.E. Nanostrukturirovannye materialy razlichnogo funktsionalnogo naznacheniya. *Nanostrukturnye materialy: Belarus-Rossiya-Ukraina (NANO-2014)*: collection of plenary reports of IV int. sci. conf. / main ed. P.A. Vityaz. Minsk, 2015, pp. 145-153. (In Russ.)

Barinov D.V., Markov V.A., Trubnikov V.V., Shifrin B.M. Korrozionnye svoystva gazodinamicheskikh pokrytiy. *Fundamentalnye osnovy mekhaniki*, 2024, no. 14, pp. 129-133. DOI: 10.26160/2542-0127-2024-14-129-133. (In Russ.)

Buketov A.V., Brailo M.V., Stukhlyak D.P., Yakushchenko S.V., Sapronov O.O., Cherniavskyi V.V., Husiev V.M., Dmitriev D.A., YatsyukV.M., Bezbakh O.M., Negrutsa R.Yu. Optimization of components in development of polymeric coatings for restoration of transport vehicles. *Bulletin of the Karaganda University. Mathematics Series*, 2018, no. 4(92), pp. 119-131. DOI: 10.31489/2018M4/119-131.

Bykova, E.V. Oborudovaniye dlya naneseniya perftorirovannykh zashchitnykh pokrytiy s tselyu uluchsheniya sokhranyaemosti selskokhozyaystvennoy tekhniki. *Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskiy zhurnal*, 2018, no. 3, pp. 58–64. (In Russ.)

Gaydar S.M. Teoriya i praktika sozdaniya ingibitorov korrozii dlya konservatsii selskokhozyaystvennoy tekhniki: monograph. Moscow: Rosinformagrotekh, 2011. 304 p. (In Russ.)

Golubev M.I. Novye materialy dlya zashchity lesnykh mashin ot korrozii. *Vestnik MGUL – Lesnoj vestnik*, 2013, no. 1(93), pp. 40–41. (In Russ.)

Isaev M.K., Goncharova L.A., Kapustin Yu.I., Kolesnikov A.V. Fiziko-khimicheskie svoystva oksidnykh pokrytiy na osnove ruteniya titana i redkozemelnykh elementov pri dopirovanii uglerodnymi nanomaterialami. *Steklo i keramika*, 2020, no. 3, pp. 3-9. (In Russ.)

Ivanov N.A., Shifrin B.M. Avtomatizatsiya defektoskopii putem ispolzovaniya kompyuternogo zreniya i iskusstvennogo intellekta. *Aktualnye problemy razvitiya lesnogo kompleksa*: mat. of XXII int. sci.-tech. conf. nauchno-texnicheskoj konferencii. Vologda, 2024, pp. 154-157. (In Russ.)

Kapustin S.N., Volkov A.S., Tsykareva Yu.V. Icing and chemical pollution sensor based on carbon nanoparticles-based superhydrophobic coating. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*, 2023, vol. 16, no. S3.2, pp. 239-243. DOI: 10.18721/JPM.163.241.

Klinkov S. V. Upravlenie erozionno-adgezionnym perekhodom pri KhGN. Diss. … Doct. Phys.-Math. Sci. Novosibirsk, 2013. 299 p. (In Russ.)

Kochkovskaya S.S., Serdyuk A.I. Arkhitektura i programmnaya realizatsiya podsistemy upravleniya proizvodstvennymi resursami v ASUP staleplavilnogo proizvodstva. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2019, no. 8, pp. 43-46. (In Russ.)

Muravyev A.G., Shifrin B.M. Tsifrovoy dvoynik: istoriya sozdaniya i sovremennaya kontseptsiya. *Collection of papers based on mat. of sci.-tech. conf. of*

Technological Vehicles and Timber Transport Institute by results of scientific research works in 2023. St. Petersburg, 2024, pp. 390-395. (In Russ.)

Oliferenko G.L., Ivankov A.N., Ustygov A.V., Zarubina A.N. Problema korrozii tekhnologicheskogo oborudovaniya na predpriyatiyakh po khimicheskoy pererabotke drevesiny (obzor). *Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 3, pp. 142–151. (In Russ.)

Popova L.M., Ivanova V.A., Vershilov S.V. Sintez N-fenilimidov poliftoralkilovykh efirov maleopimarovoy kisloty. *Khimiya rastitelnogo syrya*, 2019, no. 2, pp. 205-211. (In Russ.)

Razlichnye aspekty primeneniya khimii v povsednevnoy zhizni: thes. of reports in interfac. stud. sci.-tech. conf. St. Petersburg, 2014. 52 p. (In Russ.)

Ryndin V.V., Abdullina G.G., Abdullin A.T. Analysis of passive methods of protection from corrosion of main oil and gas pipelines. *Science and Technology of Kazakhstan*, 2018, no. 2, pp. 91-100.

Shemyakin A.V., Terentyev V.V., Morozova N.M., Kozhin S.A., Kirilin A.V. Primenenie metoda katodnoy protektornoy zashchity dlya snizheniya poter metalla pri khranenii selskokhozyaystvennoy tekhniki. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva*, 2016, no. 4(32), pp. 93–97. (In Russ.)

Shifrin B.M., Popova D.A. Razrabotka IDEF-modeli protsessa kontrolya kachestva. *Collection of papers based on mat. of sci.-tech. conf. of Technological Vehicles and Timber Transport Institute by results of scientific research works in 2022*. 2023, pp. 350-354. (In Russ.)

Skivko P.V., Makarov A.V., Silaeva A.A., Kvasnikov M.Yu., Ko Zo A. Metodiki polucheniya mikrokapsul dlya primeneniya v lakokrasochnykh sistemakh. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2019, vol. 33, no. 6(216), pp. 88-90. (In Russ.)

Sokolov Yu.A. Avtomatizatsiya protsessa naneseniya metallicheskikh i keramicheskikh poroshkovykh materialov na poverkhnosti izdeliy metodom plazmennogo napyleniya. *Promyshlennye ASU i kontrollery*, 2009, no. 11, pp. 14-16. (In Russ.)

Zakirov D.M., Zonntag B., Dobrovolskis P., Alin S., Goufek I. Passivirovanie tsinkovykh pokrytiy v rastvorakh na osnove Cr(III) vo vrashchayushchikhsya ustanovkakh. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*, 2006, no. 4(16), pp. 108-110. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 16.02.2025

Трубников В.В., Марков В.А., Трофимов А.В., Хахина А.М., Зверев И.А. Анализ антикоррозийных покрытий для несущих элементов лесных машин // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 480–497. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.480-497

В работе представлен обзор, посвященный проблематике использования антикоррозийных покрытий для защиты несущих конструкций лесных машин от

коррозии. Представленный материал базируется на исследованиях отечественных и зарубежных ученых в области методов защиты металлов и сплавов от коррозии, практики использования различных антикоррозийных покрытий, а также области автоматизации их нанесения. Цель работы – провести обзор различных видов антикоррозийных покрытий, которые могут быть использованы для защиты несущих конструкций лесных машин от воздействия коррозии, а также выделить технологические особенности нанесения покрытий с учетом возможности автоматизации процесса в условиях ремонтных предприятий. Представлена классификация видов антикоррозийных покрытий. В статье рассматриваются металлические, неметаллические, химические и альтернативные защитные покрытия, приводятся технологические особенности их использования и возможность применения в лесном машиностроении. Приводятся изображения микроструктур наиболее характерных представителей различных видов антикоррозийных покрытий. Изображения микроструктур получены с использованием светового оптического микроскопа Leica DMI 5000, оснащенного системой анализа изображений Thixomet. Отдельное внимание в статье уделено вопросу автоматизации нанесения антикоррозийных покрытий. Представлена классификационная схема степени автоматизации нанесения защитных покрытий и рассмотрены ее уровни с учетом возможности внедрения на предприятиях лесного машиностроения. Исходя из представленного в работе материала, авторы приходят к выводу, что для несущих элементов и некоторых кузовных деталей лесных машин целесообразно применение сочетания металлического покрытия, нанесенного методом холодного газодинамического напыления, и классического лакокрасочного покрытия. Частичная автоматизация является наиболее рациональным решением для процесса нанесения защитного покрытия методом холодного газодинамического напыления в условиях ремонтных предприятий лесной отрасли.

Ключевые слова: коррозия, антикоррозийные покрытия, микроструктура, автоматизация, нанесение защитных покрытий, лесные машины.

Trubnikov V.V., Markov V.A., Trofimov A.V., Hahina A.M., Zverev I.A. Analysis of anti-corrosion coatings for load-bearing elements of forestry machines. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 480–497 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.480-497

This paper presents a review of the application of anti-corrosion coatings to protect forestry machinery load-bearing structures from corrosion. The material presented is based on research by domestic and international scientists in the field of metal and alloy corrosion protection methods, the application of various anti-corrosion coatings, and the automation of their application. The purpose of this paper is to review various types of anti-corrosion coatings that can be used to protect forestry machinery load-bearing

structures from corrosion, as well as to highlight the technological features of coating application, taking into account the possibility of process automation in repair facilities. A classification of anti-corrosion coating types is presented. The article considers metallic, non-metallic, chemical, and alternative protective coatings, discusses the technological features of their use, and discusses the possibility of their application in forestry engineering. Images of the microstructures of the most typical representatives of various types of anti-corrosion coatings are presented. The images of the microstructures were obtained using a Leica DMI 5000 light optical microscope equipped with a Thixomet image analysis system. Special attention is paid to the automation of anti-corrosion coating application. A classification scheme for the degree of automation in protective coating application is presented and its levels are discussed, taking into account the feasibility of implementation at forestry machinery manufacturing facilities. Based on the presented material, it is concluded that for load-bearing elements and some body parts of forestry machinery, a combination of a metallic coating applied by cold gas-dynamic spraying and a traditional paint coating is advisable. Partial automation is the most rational solution for applying protective coatings by cold gas-dynamic spraying in forestry repair facilities.

K e y w o r d s : corrosion, anti-corrosion coatings, microstructure, automation, application of protective coatings, forestry machines.

ТРУБНИКОВ Виктор Валерьевич – соискатель Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна. SPIN-код: 3756-3397.

191186, ул. Большая Морская, д. 18, Санкт-Петербург, Россия.

TRUBNIKOV Viktor V. – PhD candidate of the Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. SPIN-code: 3756-3397.

191186. Bolshaya Morskaya str. 18. St. Petersburg. Russia.

МАРКОВ Виктор Александрович – доцент кафедры машин автоматизированных систем Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, кандидат технических наук. SPIN-код: 1503-7932.

191186, ул. Большая Морская, д. 18, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: mactor85@mail.ru

MARKOV Viktor A. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Machines and Automated Systems of the St.Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. SPIN-code: 1503-7932.

191186. Bolshaya Morskaya st. 18. St. Petersburg. Russia. E-mail: mactor85@mail.ru

ТРОФИМОВ Александр Викторович – доцент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук. SPIN-код: 8933-0230.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: agregat9@yandex.ru

TROFIMOV Aleksandr V. – PhD (Technical), Associate Professor of Forestry engineering, service and repair department, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 8933-0230.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: agregat9@yandex.ru

ХАХИНА Анна Михайловна – профессор Высшей школы программной инженерии Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, доктор технических наук, доцент. SPIN-код: 9541-7908.

195251, ул. Политехническая, д. 29, лит. Б, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: hahina_am@spbstu.ru

HAHINA Anna M. – DSc (Technical), Professor at the Higher School of Software Engineering at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Associate Professor. SPIN-code: 9541-7908.

195251. Politekhnicheskaya str. 29. Let. B. St. Petersburg. Russia. E-mail: hahina_am@spbstu.ru

ЗВЕРЕВ Игорь Андреевич – доцент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук. SPIN-код: 1126-2121. ORCID: 0000-0002-8163-7489.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: igorzv1997@gmail.com

ZVEREV Igor A. – PhD (Technical), Associate Professor of Forestry engineering, service and repair department, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 1126-2121. ORCID: 0000-0002-8163-7489.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: igorzv1997@gmail.com

УДК 630*32

В.А. Александров, А.В. Александров

ВИБРОНАГРУЖЕННОСТЬ ОПЕРАТОРА ВАЛОЧНО-ПАКЕТИРУЮЩЕЙ МАШИНЫ ОГРАНИЧЕННОЙ ГРУЗОПОДЪЁМНОСТИ ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕРЕЕЗДАХ

Введение. Наряду с валочно-пакетирующими машинами (ВПМ) большой грузоподъёмности на лесозаготовках широко используются ВПМ ограниченной грузоподъёмности. В связи с этим вопрос о воздействии на операторов этих машин также актуален. Предварительные результаты экспериментальных исследований показали значительную нагруженность этих машин не только в режимах обработки деревьев, но и при технологических переездах по поверхности лесосеки.

Для работы ВПМ характерны три основных случая их движения [Гасымов, Александров, 2014]: через обособленные неровности; по непрерывно чередующимся периодическим неровностям со случайным микропрофилем; при отсутствии неровностей.

В публикациях [Александров, 1984, 1995] рассмотрена динамика лесосечных машин, включая трелёвочный трактор, валочно-трелёвочные и валочно-пакетирующие машины, при пуско-тормозных режимах, в процессе обработки деревьев, в режимах установившегося движения, а также при переезде через обособленные неровности.

Исследованиями выявлено, что максимальные динамические нагрузки в упругих связях лесных машин [Жуков, Леонович, 1973] возникают в пуско-тормозных режимах.

Для лесосечных машин с манипуляторами и различных погрузчиков перекидного типа, а также трелёвочных тракторов дополнительно нагруженными являются режимы установившегося движения по микропрофилю или через обособленные неровности при технологических переездах или в процессе трелёвки пачки по волоку.

Работы [Александров, Лузанова, 2012; Александров и др., 2013a, b, 2015] посвящены разработке моделей динамических систем «Оператор – ВПМ – предмет труда – дерево» и биодинамических систем, где оператор представлен в виде 2- и 3-массовых расчетных схем. Изучена вибронагру-

женность операторов ВПМ в основных наиболее нагруженных в динамическом отношении режимах работы. В процессе исследований установлено, что определяющее влияние на уровень вибровоздействий на оператора оказывает форсирование пуско-тормозных режимов.

Исследования эргономики труда операторов ВПМ [Эргономика…, 1988] показывают, что конструкции сидений у серийно выпускаемых машин не обеспечивают необходимой защиты операторов от вибрации.

Цель исследования – разработать математическую модель, позволяющую определить вибронагруженность оператора ВПМ ограниченной грузоподъемности при технологических переездах на лесосеке.

Материалы и методика исследования. Для решения поставленной цели была составлена расчетная схема динамической системы «Оператор – валочно-пакетирующая машина – предмет труда – дерево». На рис. 1 представлена расчетная схема такой машины в режиме перенесения срезанного дерева в ЗСУ при его горизонтальном расположении.

Принятые обозначения:

m_o, m_1, m_2, m_3 и m_4 – приведенные массы, соответственно, машиниста (оператора), базовой машины, колонны манипулятора с подвижной платформой, захватно-срезающего устройства и дерева;

X_0, X_1, X_2, X_3 и X_4 – обобщенные координаты центров приведенных масс m_0, m_1, m_2, m_3 и m_4;

C_c, C_{12}, C_{23} и C_{34} – соответственно, приведенные жесткости спинки сидения, привода подвижной платформы, манипулятора и дерева;

P_0 – касательная сила тяги;

F – сопротивление перемещению машины.

Результаты исследования.

Кинетическая энергия динамической системы (1):

$$T = \frac{1}{2}m_0\left(\dot{X}_0\right)^2 + \frac{1}{2}m_1\left(\dot{X}_1\right)^2 + \frac{1}{2}m_2\left(\dot{X}_2\right)^2 + \frac{1}{2}m_3\left(\dot{X}_3\right)^2 + \frac{1}{2}m_4\left(\dot{X}_4\right)^2. \qquad (1)$$

Потенциальная энергия системы (2):

$$П = \frac{1}{2}C_c\left(X_1 - X_0\right)^2 + \frac{1}{2}C_{12}\left(X_1 - X_2\right)^2 + \frac{1}{2}C_{23}\left(X_2 - X_3\right)^2 + \\ + \frac{1}{2}C_{34}\left(X_3 - X_4\right)^2. \qquad (2)$$

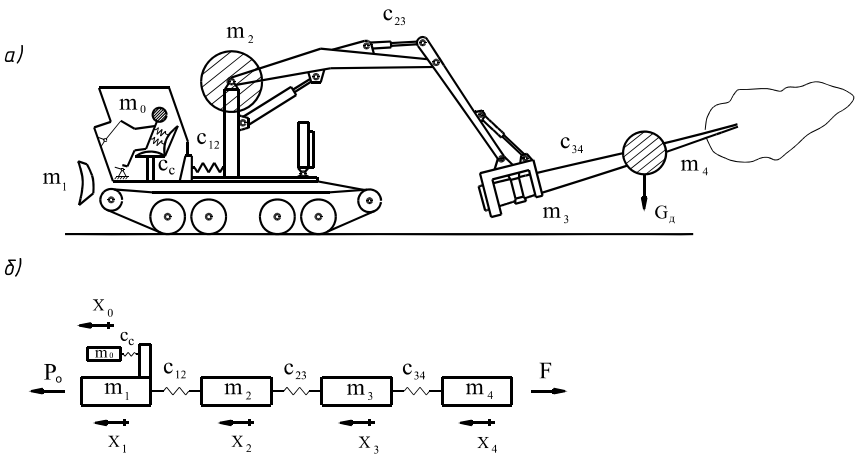


Рис. 1. Расчетные схемы динамической системы «Оператор-ВПМ-предмет труда-дерево»: *а* – исходная, *б* – эквивалентная

Fig. 1. Calculation scheme of the dynamic system «Operator-feller buncher-subject of labor-tree»: *а* – basic, *б* – equivalent

В соответствии с уравнением Лагранжа 2-го рода получим следующую систему уравнений (3):

$$\begin{array}{l|l} m_1 & m_0\ddot{X}_0 + C_c X_0 = C_c X_1, \\ \hline m_2 & m_1\ddot{X}_1 + C_c\left(X_1 - X_0\right) + C_{12}\left(X_1 - X_2\right) = P_0. \\ \hline m_1 & m_2\ddot{X}_2 + C_{23}\left(X_2 - X_3\right) = C_{12}\left(X_1 - X_2\right), \\ \hline m_4 & m_3\ddot{X}_3 + C_{34}\left(X_3 - X_4\right) = C_{23}\left(X_2 - X_3\right), \\ \hline m_3 & m_4\ddot{X}_4 + F = C_{34}\left(X_3 - X_4\right). \end{array} \qquad (3)$$

Преобразуя систему уравнений (3) относительно упругой деформации $(X_1 - X_0)$, получим дифференциальное уравнение вида (4):

$$\left(X_1^{\mathrm{VIII}} - X_0^{\mathrm{VIII}}\right) + \mathrm{A}\left(X_1^{\mathrm{VI}} - X_0^{\mathrm{VI}}\right) + \mathrm{B}\left(X_1^{\mathrm{IV}} - X_0^{\mathrm{IV}}\right) + C\left(\ddot{X}_1 - \ddot{X}_0\right) + \\ + \mathrm{D}\left(X_1 - X_0\right) = \mathrm{E}, \qquad (4)$$

где

$$\mathrm{A} = \left[\frac{m_2 m_3^{\,2} m_4\left(m_0 + m_1\right)C_c + m_3^{\,2} m_4\left(m_1 + m_2\right)m_0 C_{12} + \ldots}{\ldots + m_3 m_4\left(m_2 + m_3\right)m_1 m_0 C_{23} + \left(m_3 + m_4\right)\left(m_3 m_2 m_0 m_1 C_{34}\right)}{m_0 m_2 m_3^{\,2} m_4 m_1}\right], 1/\mathrm{c}^2; \qquad (5)$$

$$B=\Bigg[\frac{\left(m_0+m_1\right)C_{\text{c}}m_3{}^2m_4\left(m_1+m_2\right)C_{12}m_2+\left(m_0+m_1\right)C_{\text{c}}m_3m_4\times}{\times\left(m_2+m_3\right)m_1C_{23}m_2+C_{\text{c}}\left(m_0+m_1\right)\left(m_3+m_4\right)m_3m_2C_{34}m_1m_2+}\cdots$$
$$\cdots\frac{+m_3{}^2m_4m_2C_{\text{c}}m_0C_{12}m_2+m_3m_4\left(m_2+m_3\right)\left(m_1+m_2\right)C_{12}m_1m_0C_{23}+}{+\left(m_3+m_4\right)m_3\left(m_1+m_2\right)C_{12}m_1m_0C_{34}m_2+\left(m_3+m_4\right)\left(m_2+m_3\right)\times}\cdots$$
$$\cdots\frac{\times m_1m_0C_{34}m_1C_{23}m_2-m_3{}^2m_4C_{12}m_1m_0m_1C_{23}-}{-m_4m_2m_1m_0C_{34}m_1C_{23}m_2}\cdots$$
$$\cdots\frac{}{m_0m_1m_2{}^2m_3{}^2m_4m_1}\Bigg],\ 1/\text{с}^4; \tag{6}$$

$$C=\Bigg[\frac{m_3m_4\left(m_2+m_3\right)C_{\text{c}}C_{23}m_0C_{12}m_2{}^2+m_2C_{\text{c}}\left(m_3+m_4\right)m_3C_{34}\times}{\times m_0C_{12}m_2{}^2-\left(m_0+m_1\right)C_{\text{c}}m_3m_4\left(m_2+m_3\right)\left(m_1+m_2\right)C_{12}C_{34}m_2+}\cdots$$
$$\cdots\frac{+\left(m_0+m_1\right)C_{\text{c}}\left(m_3+m_4\right)m_3\left(m_1+m_2\right)C_{12}C_{34}m_2{}^2+\left(m_0+m_1\right)C_{\text{c}}\left(m_2+m_3\right)\times}{\times\left(m_3+m_4\right)m_1C_{34}m_2{}^2C_{23}-\left(m_0+m_1\right)C_{\text{c}}m_4m_2m_1C_{34}m_2{}^2C_{23}-}\cdots$$
$$\cdots\frac{-m_1\left(m_1+m_2\right)C_{12}\left(m_3+m_4\right)\left(m_2+m_3\right)m_2C_{34}C_{23}m_0+}{+m_2m_1m_3C_{12}\left(m_3+m_4\right)m_1C_{12}C_{23}m_0+m_1m_4\left(m_1+m_2\right)\times}\cdots$$
$$\cdots\frac{}{\times C_{12}m_2{}^2C_{34}m_0C_{23}}\Bigg],\ 1/\text{с}^6; \tag{7}$$

$$\text{D}=\Bigg[-\frac{C_{\text{c}}\left(m_3+m_4\right)\left(m_2+m_3\right)C_{12}m_0m_2{}^2C_{34}-m_0m_2{}^2C_{34}m_4m_2C_{\text{c}}C_{23}-}{-\left(m_0+m_1\right)C_{\text{c}}\left(m_1+m_2\right)C_{12}\left(m_3+m_4\right)\left(m_2+m_3\right)m_2C_{34}-}\cdots$$
$$\cdots\frac{-\left(m_0+m_1\right)C_{\text{c}}m_3C_{12}\left(m_3+m_4\right)m_1m_2C_{34}-}{-\left(m_0+m_1\right)C_{\text{c}}\left(m_1+m_2\right)C_{12}m_4m_2{}^2C_{34}}\cdots$$
$$\cdots\frac{}{m_0m_2{}^2m_1m_2m_3{}^2m_4m_1}\Bigg]\times C_{23},\ 1/\text{с}^8; \tag{8}$$

$$\text{E}=\Bigg[\frac{\left(m_3+m_4\right)\left(m_2+m_3\right)P_0+Fm_1m_3-m_4m_2P_0}{m_1}\Bigg]\frac{C_{34}C_{23}C_{12}}{m_2m_3{}^2m_4m_1},\ \text{м/с}^8. \tag{9}$$

Введя новую переменную (10):

$$X_{01} = \left(X_1 - X_0\right) - E/D, \tag{10}$$

получим однородное уравнение вида (11):

$$X_{01}^{\text{VIII}} + \text{A}X_{01}^{\text{VI}} + \text{B}X_{01}^{\text{IV}} + \text{C}\ddot{X}_{01} + \text{D}X_{01} = 0. \tag{11}$$

Определяем коэффициенты дифференциального уравнения (11) при исходных данных применительно к ВПМ ограниченной грузоподъёмности [Гасымов, Александров, 2014]:

$V = 2{,}0\text{м}^3$; $C_{34} = 65\text{кН/м}$; $m_4 = 1023$ кг; $m_0 = 80$ кг; $m_1 = 9700$ кг;

$C_c = 5\text{кН/м}$; $C_{12} = 620\text{кН/м}$; $m_2 = 2128$ кг; $m_3 = 1050$ кг;

$C_{23} = 420\text{кН/м}$; $V/t_p = 0{,}2;\ 0{,}4;\ 0{,}6;\ 0{,}8$ м/с^2

$\text{A} = 2279{,}15\,{}^1/_{\text{с}}{}^2$; $\text{B} = 1121{,}46\cdot 10^3\,{}^1/_{\text{с}}{}^4$; $\text{C} = 60675{,}0\cdot 10^3\ {}^1/_{\text{с}}{}^6$

$\text{D} = 15122{,}1\cdot 10^2\ {}^1/_{\text{с}}{}^8$.

Решая дифференциальное уравнение (11) методом Рунге-Кутта с помощью среды программирования MathCAD, получаем результаты исследований, приведенные в табл. 1, 2 и на рис. 2, 3.

Таблица 1

Характеристики вибрационного воздействия на оператора ВПМ в режиме разгона (C_c = 5 кН/м)

Characteristics of vibration impact on the operator of feller-buncher in the acceleration mode (C_c = 5 kN/m)

Характеристики	$\ddot{X}_{01} = v/t_p$, м/с^2			
	0,2	0,4	0,6	0,8
X_{01}, м	0,007	0,015	0,022	0,030
$\dot{X}_{01}$, м/с	0,032	0,063	0,095	0,126
$\ddot{X}_{01}$, м/с^2	0,272	0,545	0,817	1,089
$Q_{\text{дин.}}$, Н	35	75	110	150

Таблица 2

Характеристики вибрационного воздействия на оператора ВПМ в режиме стопорения (C_c = 5 кН/м)

Characteristics of vibration impact on the operator of feller-buncher in the stop mode (C_c = 5 kN/m)

Характеристики	X_{01}, м/с			
	0,01	0,02	0,03	0,04
X_{01}, м	0,063	0,127	0,190	0,253
$\dot{X}_{01}$, м/с	0,01	0,02	0,03	0,04
$\ddot{X}_{01}$, м/с^2	0,002	0,003	0,005	0,006
$Q_{\text{дин.}}$, Н	315	635	950	1265

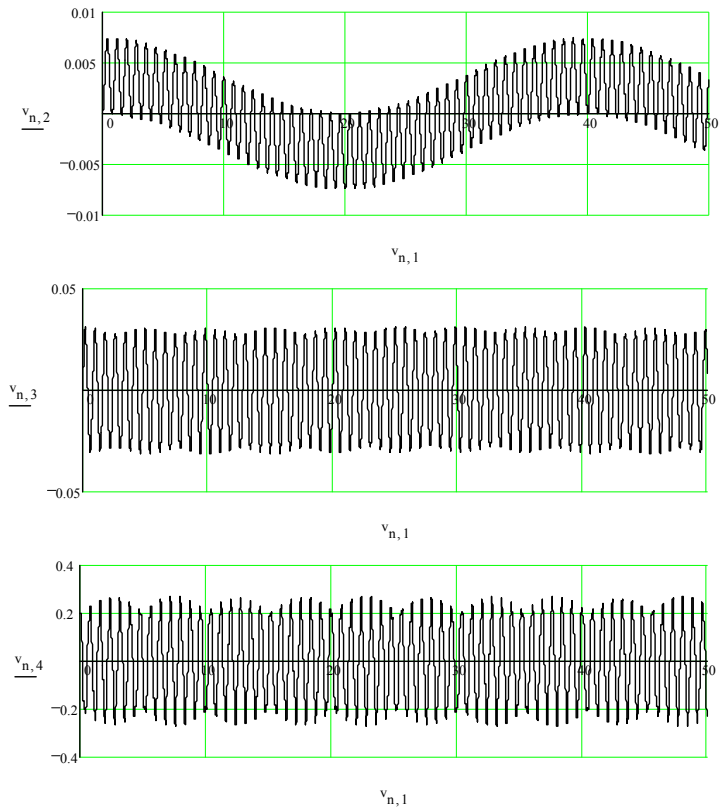


Рис. 2. Графики вибрационного воздействия на оператора ВПМ в режиме разгона при технологическом переезде (V/t_p= 0,2 м/с^2): $V_{n,2}$ – виброперемещение; $V_{n,3}$ – виброскорость; $V_{n,4}$ – виброускорение

Fig. 2. Plots of vibration impact on the operator of feller-buncher in the acceleration mode at the technological crossing (V/t_p= 0,2 m/s^2): $V_{n,2}$ – vibration displacement; $V_{n,3}$ – vibration velocity; $V_{n,4}$ – vibration acceleration

Обсуждение. Анализ результатов показывает, что если вибровоздействие в режимах разгона при технологических переездах ВПМ большой грузоподъёмности и малой примерно одинаково, то в режимах стопорения динамическая нагрузка у машин ограниченной грузоподъёмности выше в 8…9 раз.

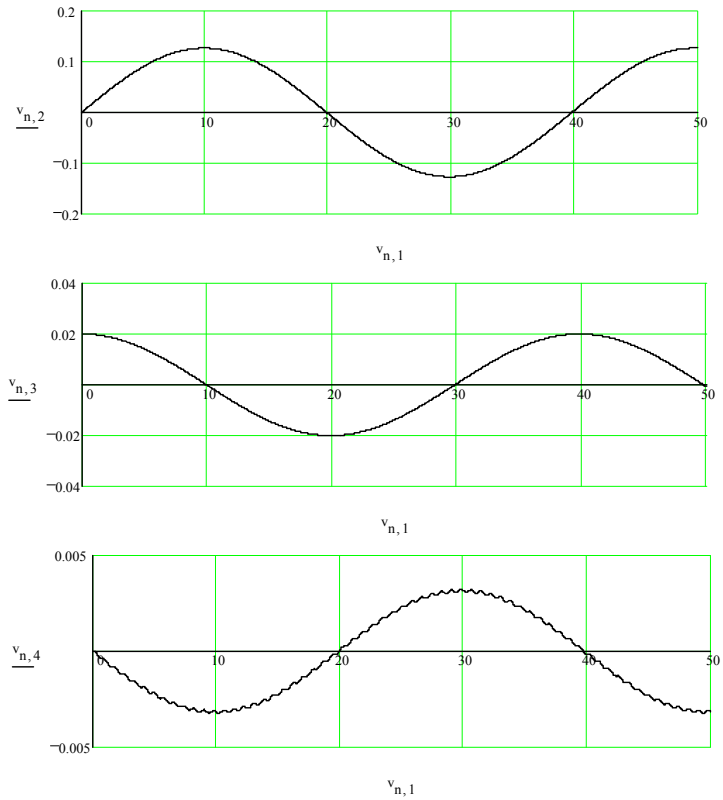


Рис. 3. Графики вибрационного воздействия на оператора ВПМ в режиме стопорения при технологическом переезде ($\dot{X}_{01} = 0{,}02$ м/с): $V_{n,2}$ – виброперемещение; $V_{n,3}$ – виброскорость; $V_{n,4}$ – виброускорение

Fig. 3. Plots of vibration impact on the operator of feller-buncher in the stop mode at the technological crossing ($\dot{X}_{01} = 0{,}02$ *m/s*): $V_{n,2}$ – vibration displacement; $V_{n,3}$ – vibration velocity; $V_{n,4}$ – vibration acceleration

Выводы

1. Процессы разгона и стопорения валочно-пакетирующих машин ограниченной грузоподъёмности при технологическом переезде с деревом в горизонтальном положении в захватно-срезающем устройстве сопровождаются значительной динамической нагрузкой на машину и оператора;

2. На уровень вибронагруженности оператора при технологических переездах, кроме скорости передвижения валочно-пакетирующей машины,

значительное влияние оказывают жёсткость сидения и объём транспортируемых в ЗСУ деревьев;

3. Для обеспечения нормальных условий работы оператору валочно-пакетирующей машины время разгона при трогании с места при технологических переездах должно быть не менее 3...4 секунд (V/t_p = = 0,2…0,4 м/с^2);

4. Разработанная модель системы «оператор – валочно-пакетирующая машина – предмет труда – дерево» позволяет определить на стадии разработки конструкции машины вибрационное воздействие на оператора при технологическом переезде с деревом в захватно-срезающем устройстве с погрешностью 6…8%.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Александров В.А. Динамические нагрузки в лесосечных машинах. Л.: ЛГУ, 1984. 152 с.

Александров В.А. Моделирование технологических процессов лесных машин. М.: Экология, 1995. 256 с.

Александров В.А., Лузанова Л.Н. К вопросу вибронагруженности операторов лесосечных машин // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2012. Вып. 197. С. 146–153.

Александров В.А., Александров А.В., Лузанова Л.Н. Вибронагруженность оператора валочно-пакетирующих машин в режиме перенесения дерева поворотом платформы в горизонтальной плоскости // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2013a. Вып. 203. С. 76–82.

Александров В.А., Александров А.В., Лузанова Л.Н. Вибронагруженность оператора валочно-пакетирующих машин в режиме натяжения ствола дерева // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2013b. Вып. 204. С. 86–96.

Александров В.А., Александров А.В., Лузанова Л.Н. Вибронагруженность оператора валочно-пакетирующей машины в режиме подъема дерева стрелой // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2015. Вып. 212. С. 78–84.

Гасымов Г.Ш., Александров В.А. Динамика валочно-пакетирующих машин. СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2014. 244 с.

Жуков А.В., Леонович И.И. Колебания лесотранспортных машин. Минск: БГУ, 1973. 240 с.

Эргономика в лесозаготовительной промышленности. М.: Лесн. пром-сть, 1988. 224 с.

References

Aleksandrov V.A. Dynamic loads in forest machines. Leningrad: LSU, 1984. 152p. (In Russ.)

Aleksandrov V.A. Modeling of technological processes of forest machines. Moscow: Ecology, 1995. 256 p. (In Russ.)

Aleksandrov V.A., Luzanova L.N. To the question of vibration loading of forest machine operators. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2012, iss. 197, pp. 146–153. (In Russ.)

Aleksandrov V.A., Aleksandrov A.V., Luzanova L.N. Vibration load of the operator of feller-buncher machines in the mode of tree transfer by rotating the platform in the horizontal plane. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2013a, iss. 203, pp. 76–82. (In Russ.)

Aleksandrov V.A., Aleksandrov A.V., Luzanova L.N. Vibration load of the operator of feller-buncher machines in the mode of tree trunk tensioning. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, iss. 204, 2013b, pp. 86– 96. (In Russ.)

Aleksandrov V.A., Aleksandrov A.V., Luzanova L.N. Vibration load of the operator of the feller-buncher machine in the mode of tree lifting by the boom. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2015, iss. 212, pp. 78- 84. (In Russ.)

Ergonomics in the logging industry Moscow: Lesnaya Promyshlennost, 1988. 224 p. (In Russ.)

Gasymov G.Sh., Aleksandrov V.A. Dinamika valochno-paketiruyushchikh machin. St. Petersburg: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2014. 244 p. (In Russ.)

Zhukov A.V., Leonovich I.I. Vibrations of forest transportation machines. Minsk: BSU, 1973. 240 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 17.04.2025

Александров В.А., Александров А.В. Вибронагруженность оператора валочно-пакетирующей машины ограниченной грузоподъёмности при технологических переездах // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 498–508. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.498-508

Дальнейшее совершенствование конструкций валочно-пакетирующих машин связано со всесторонними теоретическими и экспериментальными исследованиями режимов их работы. Учитывая большую трудоёмкость экспериментальных исследований, необходимо большее внимание уделить разработке теоретических методов. В статье рассматривается вибронагруженность оператора валочно-пакетирующей машины ограниченной грузоподъемности при технологических переездах. Разработана динамическая модель системы «Оператор – валочно-пакетирующая машина – предмет труда –

дерево», позволяющая на этапе проектирования машины определять вибронагруженность оператора. Математическое описание составлено в форме уравнения Лагранжа 2-го рода. Система уравнений решена относительно упругой деформации спинки сидения оператора методом Рунге-Кутта с помощью среды программирования MathCAD. Графически показан характер и определены максимальные величины вибрационного воздействия на оператора при работе в режимах разгона и стопорения, а также приведены результаты вибрационного воздействия. Анализ результатов исследования показывает, что режимы разгона и стопорения сопровождаются значительной динамической нагрузкой как на машину, так и на оператора. На уровень вибронагруженности оператора в целом оказывают влияние жесткость его сиденья, время разгона при трогании с места и объем транспортируемых деревьев.

Ключевые слова: валочно-пакетирующая машина, математическая модель, колебания, вибрация, оператор.

Aleksandrov V.A., Aleksandrov A.V. Vibration load of the operator of a feller-buncher with limited lifting capacity during technological moves. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 498–508 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.498-508

Further improvement of feller buncher machine designs is associated with comprehensive theoretical and experimental studies of their operating modes. Taking into account the large labor intensity of experimental studies it is necessary to pay more attention to the development of theoretical methods. The article deals with the vibration loading of the operator of a feller-buncher machine of limited load-carrying capacity during technological relocations. The dynamic model of the system "Operator – feller-buncher machine – subject of labor – tree" is developed, which allows to determine the operator's vibration load at the stage of machine design. The mathematical description is made in the form of Lagrange equation of the 2nd kind. The system of equations is solved with respect to the elastic deformation of the operator's seat backrest by Runge-Kutta method, using MathCAD programming environment. The character is shown graphically and the maximum values of vibration impact on the operator are determined when working in the modes of acceleration and stopping, as well as the results of vibration impact are given. The analysis of research results shows that the modes of acceleration and stopping are accompanied by a significant dynamic load both on the machine and on the operator. The level of vibration load of the operator is generally influenced by the rigidity of his seat, acceleration time when starting from the place, and the volume of transported trees.

Keywords: feller buncher machine, mathematical model, fluctuations, vibration, operator.

АЛЕКСАНДРОВ Валентин Александрович – профессор Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор технических наук.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: ftacademy@home.ru

ALEKSANDROV Valentin A. – DSc (Technical), Professor, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: ftacademy@home.ru

АЛЕКСАНДРОВ Алексей Валентинович – доцент Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: ftacademy@home.ru

ALEKSANDROV Aleksei V. – PhD (Technical), Associate Professor, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: ftacademy@home.ru

УДК 630.232.4

С.В. Малюков, М.В. Шавков, Л.Д. Бухтояров, М.Н. Лысыч, А.Ф. Петков, М.А. Попов, Д.С. Черенков, А.В. Болгов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЯГОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЛЕСОПОСАДОЧНОЙ МАШИНЫ И КАЧЕСТВА ПОСАДКИ СЕЯНЦЕВ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

Введение. Создание искусственных насаждений древесных и кустарниковых пород производится путем посева и посадки. Наиболее надежным и распространенным методом, вследствие лучшего роста и развития сеянцев и меньшей потребности ухода за ними, является посадка. Посадка леса в настоящее время производится на больших площадях. Ее удельный вес по отношению ко всему объему лесовосстановительных работ постоянно возрастает [Жданов, 1969; Шабанов, 2002; Титов, 2006; Шавков, 2013; Бартенев, 2015].

Лесное хозяйство нашей страны располагает большим парком различных лесопосадочных машин [Бубнов и др., 2020], но, как показывает практика их использования, они имеют ряд существенных недостатков [Драпалюк и др., 2021]. Все это указывает на неудовлетворенность в теории рабочего процесса лесопосадочных машин, компоновке рабочих органов и их конструкции [Шавков, 2013].

В настоящее время стоит задача увеличить количество машин, задействованных в лесовосстановлении, и их производительность. Также необходимо добиться высокой приживаемости высаживаемых сеянцев и саженцев [Черник, Лозовой, 2024]. Такое решение вопроса возможно лишь в том случае, если лесопосадочные машины будут производить качественную посадку сеянцев и саженцев, отвечающую агролесоводственным требованиям [Ghaffariyan, 2021].

Цель исследований – определение тягового сопротивления лесопосадочной машины и качества посадки сеянцев в полевых условиях в зависимости от конструктивных параметров прикатывающих катков.

Материалы и методы. Для проведения опытов в полевых условиях была изготовлена лесопосадочная машина. При изготовлении испытуемого образца учитывались: легкость в сборке, дешевизна конструкции, уни-

фицированность деталей с возможностью использования стандартных узлов и деталей различных машин. Лесопосадочная машина (рис. 1) содержит навесное устройство 1, опорные колеса 2, приводные колеса 3, сошник 4, раму посадочной секции 5, прикатывающие катки 6, цепной посадочный аппарат 7, ящики для посадочного материала 8, кресло сажальщика 9.

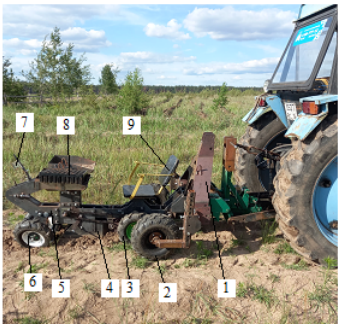


Рис. 1. Общий вид лесопосадочной машины
Fig. 1. General view of the forest planting machine

При движении агрегата сошник 4 образует посадочную борозду. Сажальщик помещает саженец (сеянец) с закрытой корневой системой (ЗКС) в захват цепного посадочного аппарата 7, при этом почвенный ком помещается на специальный лоток. После закрытия захвата при помощи смыкающих пластин саженец перемещается в посадочную борозду. Во время посадки саженец имеет нулевую скорость относительно поверхности земли. Далее захват размыкается, прикатывающие катки 6 уплотняют почву вокруг корней саженца. Шаг посадки может регулироваться за счет увеличения или уменьшения количества захватов на цепном посадочном аппарате 7 [Малюков и др., 2023].

Лесопосадочная машина испытывалась на учебном полигоне кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин (Кожевенный кордон). Для проведения полевых экспериментов были подобраны несколько делянок с длиной участка до 50 м. Тип почвы – супесчаная. Рельеф волнистый с уклонами не более 10°. Лесопосадочная машина агрегатировалась с трактором ЛТЗ-60. Для копирования рельефа местности задняя навеска трактора приводилась в «плавающее положение».

В качестве посадочного материала использовались одно-двухлетние сеянцы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Усилие выдергивания сеянца из почвы замерялось электронным динамометром (рис. 2), угол наклона сеянца – транспортиром. Шаг посадки измерялся при помощи рулетки, плотность почвы – методом режущего кольца, а влажность почвы – при помощи электронного влагомера (рис. 3). Во время испытаний влажность почвы колебалась в пределах 3,5-5,6%. Влажность и плотность почвы измерялись с шагом 1,5-2 м по всей глубине корневой зоны сеянца.

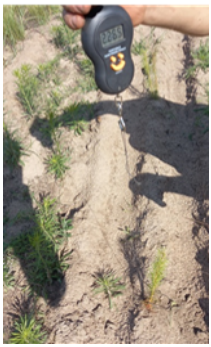


Рис. 2. Измерение усилия выдергивания сеянца из почвы

Fig. 2. Measuring the force of pulling the seedling out of the soil

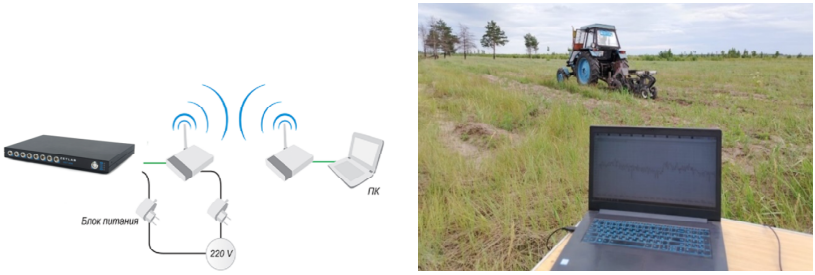
Рис. 3. Определение влажности почвы электронным влагомером

Fig. 3. Determination of soil moisture by electronic moisture meter

При проведении полевых исследований использовался метод тензометрирования. В полевых условиях вся тензометрическая аппаратура была установлена в кабине трактора, а ее питание осуществлялось от бесперебойного источника на 650 Ватт. Тензометрическое оборудование (рис. 4) состоит из многоканальной тензометрической станции со встроенным генератором для питания датчика. Тензометрическая станция ZET 058 позволяет произвести сбор данных с S-образного тензодатчика, который установлен на тензометрической навеске.

Передача данных с тензометрической станции Zet 058 на ноутбук осуществлялась по бесперебойному интерфейсу Wi-Fi. В модуль тензостанции была прошита опция *Интерфейс Ethernet.*

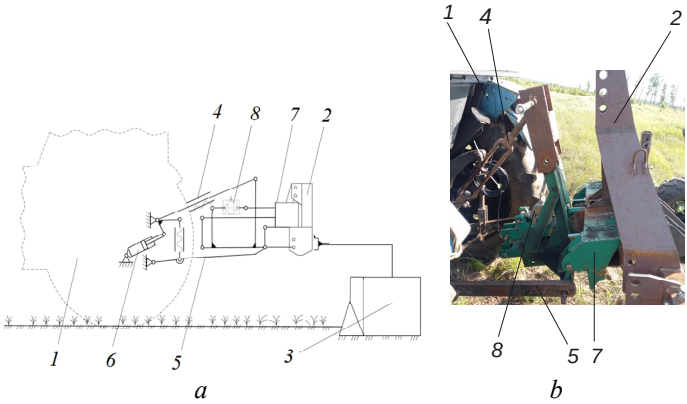
Для измерения тягового усилия при проведении полевого эксперимента была использована тензометрическая навеска. Кинематическая схема и ее общий вид представлен на рис. 5.



a b

Рис. 4. Общий вид тензометрического оборудования: a – тензометрическое оборудование; b – тензометрическое оборудование с тензонавеской в работе

Fig. 4. General view of strain gauge equipment: a – strain gauge equipment; b – strain gauge equipment with strain gauge in operation



a *b*

Рис. 5. Общий вид тензометрической навески для определения тягового сопротивления лесопосадочной машины: a – схема тензометрической навески; b – общий вид тензометрической навески

Fig. 5. General view of strain gauge linkage for determining the traction resistance of the forest machine: a – scheme of strain gauge linkage; b – general view of strain gauge linkage

Трактор 1 верхней 4 и нижними тягами 5 цеплялся к нижним пальцам тензонавески. Задняя навеска трактора поднималась и опускалась при помощи гидроцилиндра 6. Крепление тензонавески 7 к лабораторному образцу 3 осуществлялось при помощи квадратной трубы за счет шпилек и

проушины рамы 2 лабораторного образца. Это позволило нам жёстко соединить тензонавеску с лабораторным образцом. Сама же тензометрическая навеска состоит из двух рамок, которые могут совершать движения друг относительно друга только в продольном направлении. Соединяются эти две рамки за счет качающихся поводков. Степень свободы при движении вперед ограничивает тензозвено.

При движении трактора с лабораторным образцом вперед происходит смещение верхней рамки относительно нижней. Из-за смещения этих двух рамок происходит растягивание тензозвена, в состав которого входят два поводка и S-образный датчик. S-образный датчик, расположенный между двумя поводками, позволяет регистрировать усилия при растяжении или сжатии. Предварительное регулирование напряжения тензозвена осуществляется за счет гайки крепления тензозвена к тензонавеске.

При переводе орудия в транспортное положение рамка с присоединенным к ней лабораторным образцом смещается вперед, тем самым снимая нагрузку с тензометрического звена.

На рис. 6 представлен S-образный датчик силы растяжения и сжатия для определения тягового сопротивления.

Рис. 6. Общий вид S-образного датчика силы растяжения и сжатия

Fig. 6. General view of the S-shaped tensile and compressive force sensor

Принцип действия тензодатчика 8 заключается в том, что растягивание тензозвена в продольном направлении преобразует механическую силу (растяжение/сжатие), которая образуется вдоль оси симметрии датчика, в электрический сигнал. Все сигналы с тензодатчика поступают на тензостанцию и далее в режиме реального времени по средствам бесперебойного интерфейса Wi-Fi поступают на ноутбук. Так как датчик оттари-

рован, программа в режиме реального времени показывает нагрузку, которую испытывает орудие при взаимодействии с почвой. В программе ZETVIEW также содержится множество библиотек и различных виртуальных приборов, посредством которых осуществляются измерения и анализ данных.

Полученные при проведении полевых экспериментов данные сохранялись в виде документов Microsoft Excel. В программе Microsoft Excel для анализа данных использовали установившийся режим работы орудий, когда влияние случайных воздействий минимально. Для обработки экспериментальных данных и их систематизации был использован инструмент «Описательная статистика».

Результаты и их обсуждение.

Результат работы лесопосадочной машины в полевых условиях показан на рис. 7.

Рис. 7. Результат работы лесопосадочной машины
Fig. 7. Result of the forest planting machine

При исследовании варьировали один параметр – расстояние между прикатывающими катками, 130-165 мм, для двух разных катков. Первые катки – диаметр 310 мм, ширина 35 мм. Вторые катки – диаметр 400 мм, ширина 100 мм. В работе [Бартенев, 2015] приводятся результаты исследований взаимодействия с почвой металлических и пневматических катков диаметром 460 мм и шириной 100 мм. Оптимальным расстоянием между пневматическими катками при работе на песчаных почвах является 135-145 мм. П.И. Титов [2006] считал оптимальными параметрами катка с гиб-

ким ободом диаметр 400-600 мм и ширину 100-150 мм. [Шавков, 2013] приводит сведения о применении лесопосадочных машин с диаметром катков 500-550 мм и шириной 80-170 мм при их расстоянии 100 мм на вырубках и 130-150 мм на лёгких почвах.

По оси OX действует сила сопротивления подачи F_x, по оси OY – сила бокового увода F_y, по оси OZ – выглубляющая сила F_z. Сложив три силы, получим результирующий вектор сопротивления движению F_{xyz}.

Во время полевых исследований сразу фиксировалась результирующая сила F_{xyz}. Таким образом, у каждой из осциллограмм были выбраны режимы установившейся работы, их показания были переведены из кг в Н (умножены на 9,81), приведены к нормированным показателям времени и представлены на рис. 8. Из рис. 8 видно, что пневматические катки (диаметром 400 мм) обладают в два раза меньшей амплитудой разброса силы F_{xyz}, а значит, способствуют более устойчивой работе.

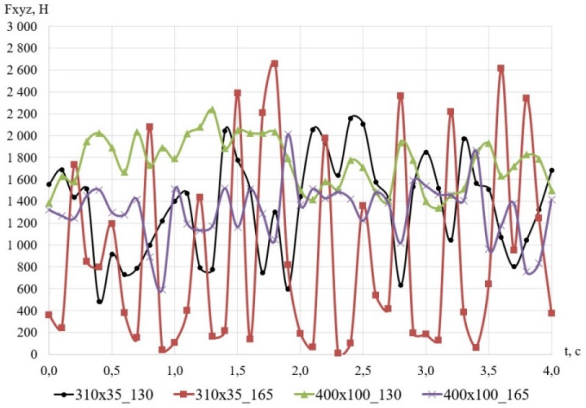


Рис. 8. Результирующая сила сопротивления F_{xyz} на полевых испытаниях

Fig. 8. Resultant drag force F_{xyz} on field tests

Определим описательные статистические характеристики проведенных опытов для F_{xyz} и сведем их в табл. 1.

На основании средних значений сил сопротивлений, полученных по результатам проведенной статистической обработки, построим их зависимость для двух типов катков и двух расстояний между ними (рис. 9).

Таблица 1

Описательные статистические характеристики F_{xyz}

Descriptive statistical characteristics of F_{xyz}

Параметр	Опыты			
	F_{xyz1}	F_{xyz2}	F_{xyz3}	F_{xyz4}
Асимметричность	–0,15	0,82	–0,03	–0,35
Уровень надежности (95,0%)	144,77	275,74	74,23	85,57
Дисперсия выборки	210380,72	763151,66	55306,45	73491,09
Эксцесс	–0,91	–0,85	–1,04	1,23
Стандартное отклонение	458,67	873,59	235,17	271,09
Медиана	1441,02	414,79	1773,49	1381,62
Среднее	1356,33	895,69	1748,69	1316,08
Стандартная ошибка	71,63	136,43	36,73	42,34

F_1 – катки диаметром 310 мм, шириной 35 мм установлены на расстоянии 130 мм друг от друга; F_2 – катки диаметром 310 мм, шириной 35 мм установлены на расстоянии 160 мм друг от друга; F_3 – катки диаметром 400 мм, шириной 100 мм установлены на расстоянии 130 мм друг от друга; F_4 – катки диаметром 400 мм, шириной 100 мм установлены на расстоянии 165 мм друг от друга.

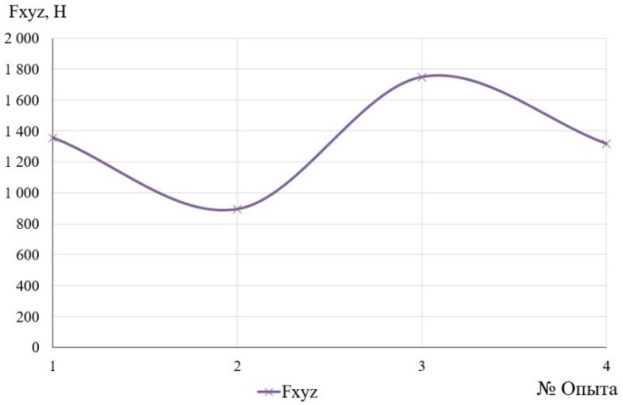


Рис. 9. Зависимость F_{xyz} для двух типов катков и двух расстояний между ними в полевых условиях

Fig. 9. Dependence of F_{xyz} for two types of rollers and two distances between them in field conditions

Из рис. 9 видно, что сопротивление лесопосадочной машины при установке на нее прикатывающих катков 400×100 мм больше в 1,3 раза, чем при использовании катков 310×35 мм, причем при увеличении расстояния между прикатывающими катками от 130 до 165 мм сопротивление лесопосадочной машины с катками 400×100 мм уменьшается на 24,7%, а с катками 310×35 мм – на 34%.

Агротехнические показатели работы лесопосадочной машины представлены в табл. 2.

Таблица 2

Агротехнические показатели работы лесопосадочной машины при посадке сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.)

Agrotechnical indicators of forest planting machine performance during planting of common pine trees (*Pinus sylvestris* L.)

№	Показатели	Прикатывающие катки	
		400×100 мм	310×35 мм
1	Скорость движения, км/ч	3-3,5	3-3,5
2	Шаг посадки сеянцев, средний, см	95,6	97,4
	минимальный, см	92	90
	максимальный, см	100	106
3	Глубина хода рабочего органа, см	10-15	10-15
4	Глубина заделки корневой шейки, см	2-3	7-13
5	Угол наклона сеянцев, средний, °	7,5	26,2
	вертикально и с наклоном до 30°	100 %	70%
	наклон свыше 30°	–	30 %
6	Усилие на выдергивание, кг	1,8-2,3	0,8-1,4

Из табл. 2 видно, что среднее значение угла наклона сеянцев при применении прикатывающих катков 400×100 мм равно 7,5°, т.е. сеянец занимает почти вертикальное положение. При работе прикатывающих катков 310×35 мм среднее значение угла наклона сеянцев равно 26,2°, что не соответствует нормативам. Глубина заделки корневой шейки (катки 400×100 мм) находится в пределах нормы, а у катков 310×35 мм принимает недопустимые значения, что приведет к гибели растения. Усилие выдергивания при проходе катков 400×100 мм в 1,8 раз больше, чем при работе катков 310×35 мм.

Выводы

Были получены зависимости тягового сопротивления лесопосадочной машины от расстояния между прикатывающими катками 130-165 мм для двух разных катков, 400×100 мм и 310×35 мм.

Расстояние между катками и смена типа катков оказывают следующее влияние на силу F_{xyz}. При изменении расстояния между катками диаметром 310×35 мм с 130 до 165 мм сила снижалась с 1356 Н до 895 Н (на 34%). У прикатывающих катков 400×100 мм сила снижалась с 1748 Н до 1316 Н (24,7%). При одинаковом расстоянии в 130 мм разница между силами для катков составила 28%. При расстоянии 165 мм разница между силами для катков составила 47%.

Катки 400×100 мм показали лучшие результаты при работе на легких почвах. Средний угол наклона сеянцев при посадке равен 7,5°, глубина заделки корневой шейки – 2-3 см, усилие выдергивания – 1,8-2,3 кг. Все показатели лежат в пределах оптимальных значений.

У катков 310×35 мм средний угол наклона сеянцев при посадке равен 26,2°, глубина заделки корневой шейки – 7-13 см, усилие выдергивания – 0,8-1,4 кг, что не соответствует агротехническим требованиям.

Полученные экспериментальные данные будут способствовать созданию новых видов конструкций лесопосадочных машин, которые позволят в дальнейшем повысить качество посадки сеянцев и увеличить приживаемость посадочного материала.

Сведения о финансировании исследования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10010.

Благодарности. Авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Бартенев И.М. Лесопосадочные машины. Теория. Исследование. Конструкции: монография. Воронеж: ВГЛТУ, 2015. 219 с.

Бубнов С.С., Малюков С.В., Аксенов А.А. Обзор конструкций лесопосадочных машин для открытых площадей и расчищенных вырубок // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2020. Т. 8, № 1(48). С. 29-34. DOI: 10.34220/2308-8877-2020-8-1-29-34.

Драпалюк М.В., Стасюк В.В., Зеликов В.А. Новые конструкции универсальных лесопосадочных машин для посадки сеянцев с открытой и закрытой корневой системой // Лесотехнический журнал. 2021. Т. 11, №4(44). С. 112-123. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/10.

Жданов Ю.М. Исследование и обоснование технологии заделки корневой системы сеянцев и параметров заделывающих элементов лесопосадочных машин: дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 1969. 196 с.

Малюков С.В., Лысыч М.Н., Поздняков Е.В., Бухтояров Л.Д., Шавков М.В., Петков А.Ф., Болгов А.В. Патент № 2810526 РФ, МПК A01C 11/02. Лесопосадочная машина / заявитель и патентообладатель Воронежский государственный

лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова. Заявл. 06.05.2023; опубл. 27.12.2023. Бюл. №36.

Титов П.И. Совершенствование технологического процесса и конструкции лесопосадочной машины для питомников: дисс. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2006. 151 с.

Черник К.Н., Лозовой В.А. Анализ производительности машин дискретного действия, применяемых для механизированной посадки сеянцев с закрытой корневой системой // Аграрный научный журнал. 2024. № 1. С. 136-144. DOI: 10.28983/asj.y2024i1pp136-144.

Шабанов М.Л. Обоснование параметров сошника и рациональной компоновки рабочих органов лесопосадочной машины: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2002. 152 с.

Шавков М.В. Обоснование параметров комбинированного сошника лесопосадочной машины: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2013. 212 с.

Ghaffariyan M.R. A short review on studies on work productivity of mechanical tree planting // Silva Balcanica. 2021. №22(2). P. 25-32. DOI: 10.3897/silvabalcanica.22.e64233.

References

Bartenev I.M. Forestry machines. Theory. Study. Designs: monograph. Voronezh: VGLTU, 2015. 219 p. (In Russ.)

Bubnov S.S., Malyukov S.V., Aksenov A.A. Overview of designs of tree-planting machine for open areas and cleared felling. *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2020, vol. 8, no. 1(48), pp. 29-34. DOI: 10.34220/2308-8877-2020-8-1-29-34. (In Russ.)

Chernik K.N., Lozovoy V.A. Analysis of the productivity of discrete action machines used for mechanized planting of seedlings. *Agrarian scientific journal*, 2024, no. 1, pp. 136-144. DOI: 10.28983/asj.y2024i1pp136-144. (In Russ.)

Drapalyuk M.V., Stasyuk V.V., Zelikov V.A. New designs of universal planting machines for planting seedlings with open and closed root systems. *Forestry engineering journal*, 2021, vol. 11, no. 4(44), pp. 112-123. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/10. (In Russ.)

Ghaffariyan M.R. A short review on studies on work productivity of mechanical tree planting. *Silva Balcanica*, 2021, no. 22(2), pp. 25-32. DOI: 10.3897/silvabalcanica.22.e64233.

Malyukov S.V., Lysych M.N., Pozdnyakov E.V., Bukhtoyarov L.D., Shavkov M.V., Petkov A.F., Bolgov A.V. Patent No. 2810526 Russian Federation, IPC A01C 11/02 2023. Forest planting machine / applicant and patent holder Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov. Appl. 06/05/2023; publ. 27/12/2023. Bull. no. 36. (In Russ.)

Shabanov M.L. Substantiation of the coulter parameters and the rational layout of the working bodies of the forest planter. Diss. ... Cand. Tech. Sci. Voronezh, 2002. 152 p. (In Russ.)

Shavkov M.V. Substantiation of the parameters of the combined coulter of a forest planter. Diss. ... Cand. Tech. Sci. Voronezh, 2013. 212 p. (In Russ.)

Titov P.I. Improving the technological process and design of a tree planting machine for nurseries. Diss. ... Cand. Tech. Sci. Voronezh, 2006. 151 p. (In Russ.)

Zhdanov Yu.M. Research and substantiation of the technology of embedding the root system of seedlings and the parameters of the embedding elements of forest planting machines. Diss. ... Cand. Tech. Sci. Volgograd, 1969. 196 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 20.03.2025

Малюков С.В., Шавков М.В., Бухтояров Л.Д., Лысыч М.Н., Петков А.Ф., Попов М.А., Черенков Д.С., Болгов А.В. Определение тягового сопротивления лесопосадочной машины и качества посадки сеянцев в полевых условиях // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 509–523. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.509-523

Создание искусственных насаждений древесных и кустарниковых пород производится путем посева и посадки. Наиболее надежным и распространенным методом, вследствие лучшего роста и развития сеянцев и меньшей потребности ухода за ними, является посадка. Посадка леса в настоящее время производится на больших площадях. В данной работе представлены результаты полевых исследований по определению тягового сопротивления лесопосадочной машины и качества посадки сеянцев в зависимости от расстояния между прикатывающими катками 130-165 мм для двух разных катков, 400×100 мм и 310×35 мм. При проведении эксперимента использовался метод тензометрирования. Тензометрическое оборудование состояло из многоканальной тензометрической станции со встроенным генератором для питания датчика. Тензометрическая станция ZET 058 позволила произвести сбор данных с S-образного тензодатчика, который был установлен на тензометрической навеске. Тензометрическое оборудование позволило определить, что сопротивление лесопосадочной машины при установке на нее прикатывающих катков 400×100 мм больше в 1,3 раза, чем при использовании катков 310×35 мм, причем при увеличении расстояния между прикатывающими катками от 130 до 165 мм сопротивление лесопосадочной машины с катками 400×100 мм уменьшается на 24,7%, а с катками 310×35 мм – на 34%. Катки 400×100 мм показали лучшие результаты при работе на легких почвах. Средний угол наклона сеянцев при посадке равен 7,5°, глубина заделки корневой шейки – 2-3 см, усилие выдергивания – 1,8-2,3 кг. Все показатели лежат в пределах оптимального значения. Полученные экспериментальные данные будут способствовать созданию новых видов конструкций лесопосадочных машин, которые позволят в дальнейшем повысить качество посадки сеянцев и увеличить приживаемость посадочного материала.

Ключевые слова: лесопосадочная машина, тензометрическое оборудование, сеянцы хвойных пород, прикатывающие катки.

Malyukov S.V., Shavkov M.V., Bukhtoyarov L.D., Lysych M.N., Petkov A.F., Popov M.A., Cherenkov D.S., Bolgov A.V. Determination of traction resistance of forest planting machine and quality of seedling planting under field conditions. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 509–523 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.509-523

The establishment of artificial plantations of tree and shrub species is done by sowing and planting. The most reliable and widespread method, due to better growth and development of seedlings and less need for maintenance, is planting. Forest planting is currently being done on large areas. This paper presents the results of a field study to determine the traction resistance of a forest planting machine and the quality of planting of seedlings depending on the distance between the rollers 130-165 mm for two different rollers, 400×100 mm and 310×35 mm. The strain gauge method was used in the experiment. The strain gauge equipment consisted of a multi-channel strain gauge station with a built-in generator to power the sensor. The ZET 058 strain gauge station allowed data collection from an S-shaped strain gauge that was mounted on the strain gauge linkage. Tensometric equipment allowed to determine that the resistance of the forest planting machine when installing 400×100 mm packer rollers is 1.3 times greater than when using 310×35 mm rollers. Moreover, when increasing the distance between the rollers from 130 to 165 mm, the resistance of the forest planting machine with 400×100 mm rollers decreases by 24.7%, and with 310×35 mm rollers decreases by 34%. The 400×100 mm rollers showed the best results on light soils. The average angle of inclination of seedlings during planting is 7.5°, the depth of root neck embedding is 2-3 cm, and the pulling force is 1.8-2.3 kg. All indicators lie within the optimal value. The obtained experimental data will contribute to the creation of new types of forest planting machine designs, which will further improve the quality of planting seedlings and increase the survival rate of planting material.

K e y w o r d s : forest planting machine, strain gauge equipment, conifer seed

---

МАЛЮКОВ Сергей Владимирович – доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, кандидат технических наук. ORCID: 0000-0003-2098-154X. SPIN-код: 9520-4147. WoS ResearcherID: N-2656-2016. Scopus AuthorID: 57202542928

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: malyukovsergey@yandex.ru

MALYUKOV Sergey V. – PhD (Technical), Associate Professor, Department of Forestry Mechanization and Machine Design of Voronezh State University of Forestry and Technologies. ORCID: 0000-0003-2098-154X. SPIN-code: 9520-4147. WoS ResearcherID: N-2656-2016. Scopus AuthorID: 57202542928

394087. Timiryazeva str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: malyukovsergey@yandex.ru

ШАВКОВ Михаил Викторович – специалист отдела снабжения ООО «Русгидроком (РГК)», кандидат технических наук. ORCID: 0000-0003-3700-7508. SPIN-код: 1307-0358.

394040, ул. Мазлумова, д. 25, г. Воронеж, Россия. E-mail: shavkovmv@mail.ru

SHAVKOV Mikhail V. – PhD (Technical), procurement specialist, Rushydrocom (RGK) LLC. ORCID: 0000-0003-3700-7508, SPIN-code: 1307-0358.

394040. Mazlumova str. 25. Voronezh. Russia. E-mail: shavkovmv@mail.ru

БУХТОЯРОВ Леонид Дмитриевич – доцент кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, кандидат технических наук. ORCID: 0000-0002-7428-0821. SPIN-код: 9081-6485. WoS ResearcherID: AAO-5129-2020. Scopus AuthorID: 57207453672.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: vglta-mlx@yandex.ru

BUKHTOYAROV Leonid D. – PhD (Technical), Associate Professor, Department of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification of Voronezh State University of Forestry and Technologies. ORCID: 0000-0002-7428-0821. SPIN-code: 9081-6485. WoS ResearcherID: AAO-5129-2020. Scopus AuthorID: 57207453672.

394087. Timiryazeva str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: vglta-mlx@yandex.ru

ЛЫСЫЧ Михаил Николаевич – доцент кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, кандидат технических наук. ORCID: 0000-0002-3764-3873. SPIN-код: 3555-2111. WoS ResearcherID: N-3089-2016. Scopus AuthorID: 57207472657.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: miklynea@yandex.ru

LYSYCH Mikhail N. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification of Voronezh State University of Forestry and Technologies. ORCID: 0000-0002-3764-3873. SPIN-code: 3555-2111. WoS ResearcherID: N-3089-2016. Scopus AuthorID: 57207472657.

394087. Timiryazeva str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: miklynea@yandex.ru

ПЕТКОВ Александр Федорович – инженер кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, кандидат технических наук. ORCID: 0000-0002-1765-6781. SPIN-код: 9778-7114. Scopus AuthorID: 57219482677.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: alexanderpetkoff@mail.ru

PETKOV Aleksandr F. – PhD (Technical), Engineer of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design of Voronezh State University of Forestry and Technologies. ORCID: 0000-0002-1765-6781. SPIN-code: 9778-7114. Scopus AuthorID: 57219482677.

394087. Timiryazeva str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: alexanderpetkoff@mail.ru.

ПОПОВ Максим Александрович – преподаватель кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова. ORCID: 0009-0002-6356-5028. SPIN-код: 9081-4128

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: popovmaxim98@mail.ru

POPOV Maksim A. – Lecturer of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design of Voronezh State University of Forestry and Technologies. ORCID: 0009-0002-6356-5028. SPIN-code: 9081-4128

394087. Timiryazeva str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: popovmaxim98@mail.ru

ЧЕРЕНКОВ Дмитрий Сергеевич – аспирант кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова. ORCID: 0009-0000-1257-6902. SPIN-код: 3087-3700.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: chierienkov1999@mail.ru

CHERENKOV Dmitry S. – PhD student of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design of Voronezh State University of Forestry and Technologies. ORCID: 0009-0000-1257-6902. SPIN-code: 3087-3700.

394087. Timiryazeva str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: chierienkov1999@mail.ru

БОЛГОВ Андрей Вячеславович – магистрант группы ТМ4-241-ОМ Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова». SPIN-код: 7131-6576.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: bolgovtacher@gmail.com.

BOLGOV Andrey V. – Master's student of group TM4-241-OM of Voronezh State University of Forestry and Technologies. SPIN-code: 7131-6576.

394087. Timiryazeva str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: bolgovtacher@gmail.com

4. ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ, ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЕРЕВОПЕРЕРАБОТКИ

УДК 621.792.053:678

И.А. Латышевич, Е.И. Гапанькова, Н.Г. Козлов

ВЛИЯНИЕ ТИПА ПРЕПРЕГА НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЛЫЖ

Введение. Производство пластиковых лыж включает в себя большое количество трудоемких операций, требующих наличие высококвалифицированных специалистов. Качественное изделие изготавливается с соблюдением всех правил и технологии.

Современные пластиковые лыжи по своей структуре представляют собой неоднородный композитный материал, состоящий из среднего деревянного клина, запрессованного в пластиковый кожух из акрилонитрилбутадиенстирола, который в свою очередь соединен со скользящей поверхностью из полиэтилена высокой плотности.

В качестве древесной основы для спортивного инвентаря выбирают зачастую самые прочные материалы: бук, березу, клен. Для удешевления изделий как наполнители часто используются тополь, осина или ель. При производстве пластиковых лыж на единственном производственном участке в Республике Беларусь, в филиале «Телеханы» государственного предприятия «Беларусьторг», при получении сердечника лыжи также используется древесина. Изготовление среднего клина заключается в правильном сращивании и склеивании деревянных ламелей для последующего напрессовывания носочной и пяточной частей из полимерного материала.

Пластиковая лыжа собирается по типу «сэндвича»: снизу и сверху деревянный клин защищается полимерными материалами. Снизу в качестве скользящей поверхности используется полиэтилен, сверху располагается декоративная пленка из термопласта. Между пластиковыми составляющими и средним клином обязательно располагаются клеевой и армирующие слои. В качестве этих слоев выступают препреги. Препреги имеют конструкционное назначение, изготавливаются на основе волокнистых арми-

рующих наполнителей и полимерных связующих [Латышевич и др., 2020]. Они охватывают и боковые части изделия. Количество слоев регулируется на производстве в зависимости от требуемых эксплуатационных характеристик и вида производимой продукции.

После сборки всех слоев полуфабрикат подается в горячий пресс, где происходит выдержка при заданных режимах до полного соединения всех конструкционных слоев. Далее идут последовательные этапы механической обработки для формирования конечного изделия.

Целью работы являлось сравнение эксплуатационных характеристик спортивно-беговых пластиковых лыж, изготовленных с применением различных типов препрегов, разработанных в ИФОХ НАН БЕЛАРУСИ, и серийных импортных материалов, а также установление влияния на них армирующей основы исследуемых препрегов.

Материалы и методика исследования. Для сравнения эксплуатационных характеристик спортивно-беговых пластиковых лыж наработаны партии экспериментальных препрегов с применением имеющихся составляющих и оборудования. Для сравнения взяты серийные материалы зарубежных производителей: ООО «Соболь», г. Балабаново (армирующая основа – однонаправленный стеклянный директ-ровинг), Российская Федерация и корпорация Hexcel, Австрия (армирующая основа – мультиаксиальная ткань на основе стеклянных директ-ровингов).

Для изготовления препрегов использовали однонаправленную ленту на основе стеклянного директ-ровинга и строительную стекловуаль. Всего наработано три типа препрегов, имеющих различное конструкционное исполнение армирующей основы:

- препрег-лента представляет собой стеклянные директ-ровинги, уложенные в ленту и переплетенные между собой полиэфирной нитью;
- препрег-флис – нетканое волокно, изготовленное путем прессования стекловолоконных нитей;
- двухслойный однонаправленный препрег – стеклянные директ-ровинги, уложенные на подложку из строительной стекловуали.

Экспериментальные препреги применяли при изготовлении пластиковых лыж типоразмера 1800 мм.

При наработке препрегов армирующую основу пропитывали разработанным эпоксидным связующим, для получения которого применяли следующее сырьё: смола эпокси-диановая (η = 13 Па·с), терпеноидный отвердитель ($T_р$ = 62,5ºС, КЧ = 278,1 мг KOH/г), поливинилбутиральная смола

(η = 9–13 мПа·с), смола с карбоксильными группами – сополимер винилхлорида, винилацетата и дикарбоновой кислоты (η = 35–55 мПа·с), смесь органических растворителей (кетоны и сложные эфиры), ускоритель отверждения эпоксидных смол (n_d^{20} = 1,5160) [Бильдюкевич и др., 2024].

Контроль эксплуатационных показателей пластиковых лыж включал в себя определение основных показателей: стрелы прогиба; индекса жесткости; жесткости средней части и прочности при изгибе; остаточного прогиба; жесткости передней и задней частей – согласно ГОСТ 17043-90 «Лыжи. Технические условия», ГОСТ 30199-94 «Лыжи. Определение массы и положения центра тяжести», ГОСТ 30045-93 «Лыжи спортивно-беговые. Методы испытаний» и «Методы контроля качества технологических параметров лабораторных образцов препрегов М-281-2022».

Статистическая обработка экспериментальных данных проводилась для эксплуатационных характеристик экспериментальных лыж с целью подтверждения достоверности и сходимости полученных результатов по следующим показателям: стрела прогиба, разрушающая нагрузка, жесткость носочной и пяточной частей. Дана оценка указанных параметров распределения и проверены гипотезы о средних значениях.

Обработка результатов проводилась с помощью табличного процессора Microsoft Office Excel. Ниже представлены формулы, используемые в надстройке Microsoft Office Excel «Анализ данных» для ведения расчетов [Гребенникова, 2015].

Доверительный интервал – это интервал, в котором с заданной вероятностью оказывается оцениваемый параметр, т. е. интервал, являющийся параметром точности измерений. Авторы выбрали доверительный интервал по критерию Стьюдента, равный 95 % (уровень значимости 5%).

Результаты, полученные при статистической обработке выборок, будут достоверными лишь в том случае, если выборка однородна, т. е. если составляющие данной выборки не отягощены грубыми погрешностями, допущенными при измерениях или расчетах. Для принятия решения об исключении таких выпадающих значений вариант перед окончательным вычислением статистических характеристик необходимо провести проверку однородности выборки. К решению данного вопроса применим критерий Граббса. Исключаем аномальные параметры относительно крайних (наибольшего X_{max} и наименьшего X_{min}) значений определяемых показателей. Полученные данные сравниваем с табличными значениями одностороннего критерия Граббса $G_{\text{табл}}$ [Grubbs, Glenn, 1972].

Сравнение экспериментальных значений проводили с нормативными по каждому из показателей, а также с показателями для образцов лыж, изготовленных с применением препрегов импортного производства, применяемых в технологическом процессе. Также провели сравнение средних значений двух выборок по критерию Стьюдента [Большев, Смирнов, 1965].

Гипотеза об отсутствии различий между средними значениями в двух выборках принимается, если расчетное значение критерия Стьюдента меньше табличного для рассчитанного числа степеней свобод k.

Результаты исследования. Экспериментальные материалы с использованием разработанного эпоксидного связующего наработаны на лабораторной установке по изготовлению препрегов, принципиальная схема которой изображена на рис. 1.

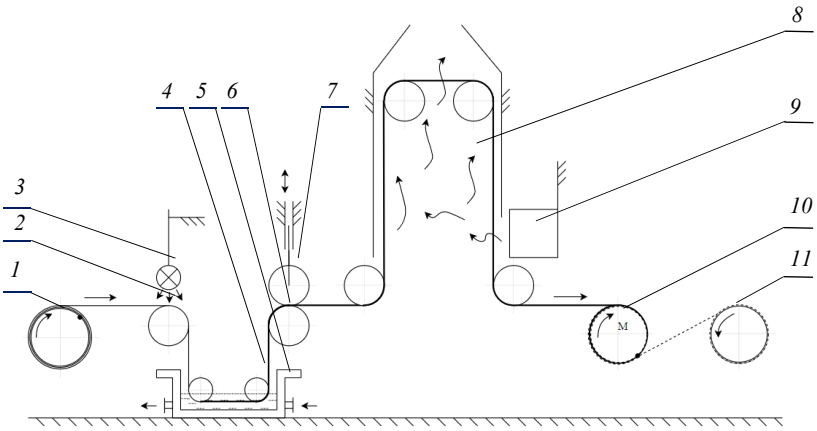


Рис. 1. Схема принципиальная пропиточной установки для изготовления препрегов: 1 – паковка с сухим армирующим материалом; 2 – вал направляющий (5 шт.); 3 – лампа инфракрасная подогревающая; 4 – вал пропиточный (2 шт.); 5 – ванна пропиточная термостатируемая; 6 – вал опорный; 7 – вал прижимной; 8 – камера сушильная; 9 – тепловоздушный обогрев; 10 – паковка с готовым препрегом; 11 – паковка с разделительным материалом

Fig. 1. Schematic diagram of the impregnation unit for the production of prepregs: 1 – package with dry reinforcing material; 2 – guide shaft (5 pcs.); 3 – infrared heating lamp; 4 – impregnation shaft (2 pcs.); 5 – thermostatically controlled impregnation bath; 6 – support shaft; 7 – pressure shaft; 8 – drying chamber; 9 – hot air heating; 10 – package with finished prepreg; 11 – package with separating material

Пропиточная лабораторная установка состоит из узла подачи и подготовки армирующего материала, включающего паковку с сухим армирующим материалом 1, подогрев которого для увеличения скорости пропитывания осуществляли с помощью инфракрасной лампы 3. Проникновение эпоксидного связующего в пространство между волокнами стеклянного директ-ровинга и исключение образования тонкой пленки на их поверхности, препятствующее указанному процессу, являются важным этапом подготовки материала. Пропитка осуществлялась в термостатируемой ванне 5. В качестве теплоносителя использовали воду. Излишки с поверхности пропитанного армирующего материала удаляли путем протягивания между валом опорным 6 и валом прижимным 7, с помощью которого регулировали зазор между валами, необходимый для обеспечения заданного содержания связующего. При прохождении через камеру сушильную 8 удаляли легколетучую часть из состава эпоксидного связующего путем высушивания препрега горячим воздухом 9 до остаточного значения по летучим соединениям не более 5%. Готовый препрег с послойным разделением пленкой, подаваемой с паковки 11, поступал на вал 10, где формировался готовый к использованию на производстве рулон. Вал 10 – приводной, все валы пропиточной установки жестко закреплены, кроме вала 7.

Препреговая технология имеет несколько вариантов исполнения, наиболее распространенным из которых является метод изготовления композитных материалов путем пропитки, заключающейся в совмещении компонентов насыщением порового пространства волокнистого наполнителя эпоксидным связующим. При пропитке происходит течение (фильтрация) вязкой жидкости (связующего) через поровое пространство наполнителя [Ставров, 2006]. Также распространены способы нанесения полимерного связующего с помощью контактного ролика, с использованием пульверизации или по расплавной технологии.

В случае наработки двухслойного однонаправленного препрега к паковке с сухим армирующим материалом, в качестве которого выступал строительный стеклохолст, дополнительно устанавливались шпулярники для подачи стеклянного директ-ровинга и направляющие гребенки.

Подсушенный и прогретый перед пропиткой при температуре 140±5°С сухой армирующий материал протягивали в контакте с поверхностью цилиндрических пропиточных валов, находящихся в ванне, которую после заполняли эпоксидным связующим. Натяжение слоя и скорость протягивания задавали из условия качественной пропитки и исключения непропитанных участков. Требуемую степень наполнения (отжим избытка смолы)

обеспечивал зазор, регулируемый отжимным роликом Достигалось содержание связующего в препрег-ленте – 40±2 мас.%, препрег-флисе – 80±2 мас.%, двухслойном однонаправленном препреге – 38±2 мас.%. Полотно препрега пропускали через сушильную камеру для удаления избытка растворителя. Температура воздуха в камере – 75±5°С. Препрег наматывали в рулоны диаметром до 250 мм, разделяя слои полиэтиленовой пленкой для предотвращения их слипания.

Экспериментальные образцы пластиковых лыж (по 16 шт.) изготовлены по следующим технологиям, существующим на предприятиях:

1 – экспериментальные препрег-лента и препрег-флис (ИФОХ НАН БЕЛАРУСИ);

2 – экспериментальный двухслойный однонаправленный препрег (ИФОХ НАН БЕЛАРУСИ);

3 – препрег производства ООО «Соболь», Российская Федерация;

4 – препрег производства Hexcel, Австрия.

Они прошли полную механическую обработку: торцовку, фрезерование, циклевку, нарезание желоба, шлифование с нанесением структуры. Фотоотверждаемое покрытие не наносилось. Все лыжи имели правильную геометрическую форму.

Обсуждение. Опытные образцы препрегов наработаны на экспериментальной установке в условиях лаборатории. Пластиковые лыжи изготовлены на производственных площадях филиала «Телеханы» государственного предприятия «Беларусьторг».

Физико-механические свойства экспериментальных лыж определяли в лаборатории по действующим ГОСТ и методикам.

Показатели качества для лыж, изготовленных с использованием различных препрегов, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений

Measurement results

Образец	Масса клина, г	Масса лыжи, г	Длина лыжи, мм	Положение центра тяжести, мм	Стрела прогиба, мм
1	412,00	676,00	1792,00	856,00	24,50
2	416,00	681,00	1785,00	853,00	27,52
3	423,00	687,00	1781,00	852,00	26,63
4	431,00	693,00	1785,00	849,00	30,50
НОРМА	–	–	–	–	≤30,00

Основным контролируемым параметром в данном испытании является стрела прогиба, которая характеризует расстояние между плоской опорной горизонтальной поверхностью, на которой располагается лыжа, и наиболее удаленной точкой скользящей поверхности ненагруженной лыжи, измеряемое штангенциркулем. Согласно полученным значениям независимо от используемого препрега, как экспериментального, так и серийного, все образцы пластиковых лыж соответствуют нормативному значению.

Далее производили измерения и расчеты для средней части пластиковых лыж (индекс жесткости, жесткость средней части, прочность при изгибе, остаточный прогиб). Результаты приведены в табл. 2.

Под жесткостью средней части лыжи понимают отношение приращения нагрузки к соответствующему перемещению точки приложения нагрузки на начальном линейном участке диаграммы деформирования центральной части лыжи при испытании по трехточечной схеме нагружения. Данный показатель не нормируется, однако он для всех экспериментальных пластиковых лыж варьируется в одинаковых пределах 150±5 Н/мм.

Таблица 2

Результаты измерений и расчетов для средней части лыж

Results of measurements and calculations for the middle part of the skis

Образец	Индекс жесткости FA, Н	Остаточная длина при FA, мм	При нормативной нагрузке 245 Н		Жесткость средней части, Н/мм	Разрушающая нагрузка, Н
			Остаточный прогиб, мм	Остаточная длина, мм		
1	358	463	0,83	487	150	2325
2	404	465	0,98	494	156	2227
3	434	466	0,87	488	149	1966
4	359	485	0,64	485	147	2234
НОРМА	≥ 300	–	0,60–1,70	–	–	2060

Разрушающая нагрузка средней части лыжи – наибольшее усилие, которое выдерживает лыжа в средней части при испытании по трехточечной схеме нагружения. Пластиковые лыжи, изготовленные с использованием экспериментальных материалов, а также импортных материалов по данному параметру соответствуют нормативным значениям для данного типоразмера. Исключением являются лыжи, изготовленные с использованием препрега производства ООО «Соболь», Российская Федерация.

Под высотой остаточного прогиба понимают расстояние, измеренное в точке приложения нагрузки, между скользящей поверхностью лыжи и плос-

кой горизонтальной поверхностью при приложении к лыже нагрузки (здесь, к примеру, сила в 245 Н для лыж типоразмера 1800 мм), прикладываемой к точке, расположенной на верхней (противоположной скользящей) поверхности лыжи и отстоящей на расстоянии 80 мм от центра тяжести лыжи в сторону задней части лыжи. Длина остаточного прогиба – длина участка скользящей поверхности лыжи, не соприкасающегося с плоской горизонтальной поверхностью, при приложении к лыже нагрузки. Для всех экспериментальных лыж данные показатели находятся в пределах нормативных значений 0,6–1,7 мм.

В табл. 3 представлены результаты испытаний по определению жесткости передней и задней частей лыжи.

Постоянной жесткостью передней (задней) части лыжи называют отношение нагрузки, приложенной к передней (задней) части лыжи и зафиксированной в момент достижения стрелы прогиба в месте нагружения, к значению стрелы прогиба в указанном месте. Данные параметры находится в пределах нормативных значений 1,66–2,66 Н/мм, а жесткость передней части у всех лыж завышена.

Таблица 3

Результаты измерений и расчетов для передней и задней частей лыж

Results of measurements and calculations for the front and rear parts of the skis

Образец	Расстояние от центра тяжести до края зажимающего устройства, мм	Задняя часть лыжи		Передняя часть лыжи	
		Нагрузка, Н (прогиб 30 мм)	Жесткость, Н/мм	Нагрузка, Н (прогиб 30 мм)	Жесткость, Н/мм
1	448	63,2	2,11	67,5	2,25
2	446	66,6	2,22	70,2	2,34
3	447	69,5	2,32	69,5	2,32
4	445	78,1	2,60	72,5	2,42
НОРМА	–	40,0–60,0	1,66–2,66	50,0–80,0	1,33–2,0

Однако следует отметить, что это не является отрицательным свойством и не оказывает влияния на качество конечного изделия при эксплуатации.

С целью сделать вывод о достоверности (сходимости) полученных результатов нами выполнен анализ статистических характеристик массива данных. Также получены математические модели изменения комплекса исследуемых свойств.

К задаче статистической обработки результатов многократных измерений относится оценка измеряемой величины и доверительного интервала, в котором находится истинное значение. Статистические методы обработки результатов измерений используют для описания полученных данных,

выявления наиболее близких к истинному значению, а также для оценки систематических и случайных погрешностей измерений – результатов испытаний. Статистический анализ полученных результатов проводился для четырех параметров: стрелы прогиба, разрушающей нагрузки, жесткости носочной и пяточной частей.

В качестве примера рассмотрим полный проведенный статистический анализ для параметра «стрела прогиба», что позволило научно обосновать и корректно интерпретировать фактически полученные данные, связанные с определением статистической достоверности полученных результатов.

В табл. 4 представлены объемы выборок для каждого комплекта экспериментальных лыж. На основании имеющихся значений, используя приемы математической статистики, рассчитали основные характеристики, отбросив результаты, содержащие промахи.

Результаты статистической обработки представлены в табл. 5 в виде компактных табличных данных, позволяющих оценить воспроизводимость и правильность полученных результатов.

Таблица 4

Объем выборок по показателю «Стрела прогиба, мм»

Sample size for the indicator "Deflection, mm"

Значение для образца лыжи	Экспериментальные образцы лыж			
	1	2	3	4
	28,4	26,7	25,2	30,3
	31,2	30,0	27,6	33,0
	26,5	23,7	29,0	31,3
	24,3	27,0	22,2	28,5
	27,5	24,7	24,5	28,5
	32,8	32,0	29,6	34,9
	24,8	28,9	28,9	32,6
	26,8	27,4	23,9	25,3
	25,0	26,4	25,3	30,5
	30,8	32,6	28,3	34,7
	26,9	25,6	25,9	32,4
	25,0	25,3	26,0	25,8
	28,3	25,4	28,8	29,8
	27,6	32,0	29,0	36,5
	27,1	27,9	27,1	30,4
	26,9	24,7	24,9	23,5
n	16	16	16	16
НОРМА	не более 30			

Примечание: n – объем выборки

Таблица 5

Математико-статистическая обработка экспериментальных данных по параметру «Стрела прогиба, мм»

Mathematical and statistical processing of experimental data on the parameter "Deflection, mm"

Параметр	Экспериментальные образцы лыж			
	1	2	3	4
$\bar{X}$	24,50	27,52	26,63	30,50
S_x	2,40	2,83	2,21	3,60
V	8,74	10,28	8,31	11,81
n_{min}	24,30	23,70	24,86	23,50
n_{max}	32,80	32,60	29,61	36,50
n (после исключения аномальных значений)	16	16	18	16
K	15	15	17	15
G_n	2,44	2,44	2,50	2,44
$X_н$	1,23	1,35	0,80	1,92
$X_в$	2,21	1,80	1,35	1,67
$t_{табл}$	2,1315	2,1315	2,1098	2,1315
ΔX	1,28	1,51	1,10	1,94
$t_{крит}$	2,01	2,11	2,10	0,56
$t_{крит} \leq t_{табл}$	различий нет	различий нет	различий нет	различий нет

Примечание: $\bar{X}$ – среднее арифметическое значение определяемого показателя; S_x – среднее квадратичное отклонение определяемого показателя; V – коэффициент вариации; n – объем выборки; G_n – критерий Граббса; X_i – исследуемый показатель; $t_{табл}$ – табличное значение критерия распределения Стьюдента для числа степеней свободы n–1; $t_{крит}$ – критическое (расчетное) значение критерия распределения Стьюдента для числа степеней свободы n–1; ΔX – границы доверительного интервала

В табл. 6 представлено сравнение статистических параметров между двумя выборками.

Статистический анализ проведен и для оставшихся контролируемых параметров. Проведена проверка статистических гипотез, что позволило сформировать вывод о возможности принятия информации, полученной из анализа выборок.

Таблица 6

Математико-статистическая обработка экспериментальных данных по параметру «Стрела прогиба, мм» между двумя выборками

Mathematical and statistical processing of experimental data on the parameter "Deflection, mm" between two samples

Параметр	Экспериментальные образцы лыж					
	1/2	1/3	1/4	2/3	2/4	3/4
$t_{табл}$	2,0423	2,0369	2,0423	2,0369	0,4223	2,0369
k	30	32	30	32	30	32
$t_{i/j}$	1,2317	2,0334	1,6856	1,5770	1,7229	2,0156
$t_{i/j} \leq t_{табл}$	различий нет	различий нет	различий нет	различий нет	различий нет	различий нет

Примечание: $t_{i/j}$ – критерий Стьюдента; $k = n_i + n_j - 2$ – число степеней свободы

Оценены параметры распределения данных внутри изучаемых выборок, выявлены аномальные значения по каждому из параметров по критерию Граббса, подтверждена гипотеза об отсутствии различий между полученными в экспериментах средним значением и известными, а также подтверждена гипотеза об отсутствии различия между средними значениями между выборками.

Таким образом, достоверно установлено, что применение различных типов препрегов в технологическом процессе производства пластиковых лыж позволяет получать последние со стабильными эксплуатационными характеристиками, сходимость которых между собой доказана путем обработки данных различными методами статистического анализа.

Заключение. Таким образом, как показали проведенные исследования, применение в конструкции лыжи двухслойного однонаправленного препрега либо связки «препрег-лента – препрег-флис» одинаково влияет на эксплуатационные характеристики получаемых изделий. При этом применение двухслойного однонаправленного препрега позволит увеличить производительность в два раза за счет упрощения принципа сборки лыжного пакета (полное оборачивание) и возможности обслуживать два пресса одним рабочим. С учетом того, что доля препрега в стоимости пластиковой лыжи составляет ориентировочно до 40%, замена связки «препрег-лента – препрег-флис» на двухслойный однонаправленный препрег приве-

дет к снижению стоимости конечного изделия за счет удешевления препрега ориентировочно в 4 раза.

Выполнен анализ статистических характеристик массива данных, получены математические модели изменения комплекса исследуемых свойств. Доказана повторяемость проведенных измерений и расчетов, что позволяет сделать вывод о достоверности (сходимости) полученных результатов.

Вклад авторов. Личный вклад каждого из авторов в написании статьи одинаков.

Патенты. Патент № 24242 Республика Беларусь, МПК A63C 5/12 (2006.1), C08L 63/02 (2006.01), C08J 5/24 (2006.01) Эпоксидное связующее и препрег на его основе для производства спортивно-беговых пластиковых лыж: № a20220242: заявл. 10.10.2022: опубл. 20.03.2024 / Бильдюкевич А. В., Козлов Н. Г., Гапанькова Е. И., Латышевич И. А.; заявитель Государственное научное учреждение «Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси». 4 с.: ил. Текст: непосредственный.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Бильдюкевич А.В., Козлов Н.Г., Гапанькова Е.И., Латышевич И.А. Патент № 24242 Республика Беларусь, МПК A63C 5/12 (2006.1), C08L 63/02 (2006.01), C08J 5/24 (2006.01) Эпоксидное связующее и препрег на его основе для производства спортивно-беговых пластиковых лыж: № a20220242: заявл. 10.10.2022: опубл. 20.03.2024 / заявитель Государственное научное учреждение «Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси». 4 с.

Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1965. 463 с.

Гребенникова И.В. Методы математической обработки экспериментальных данных: учеб.-метод. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та, 2015. 125 с.

Латышевич И.А., Гапанькова Е.И., Полховский А.В., Бильдюкевич А.В., Шетько С.В., Прохорчик С.А., Клюев А.Ю., Козлов Н.Г. Полимерный композиционный материал на основе терпеноидного сырья для производства пластиковых лыж // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020. Вып. 233. С. 208–220.

Ставров В.П. Формообразование изделий из композиционных материалов: учеб. пособие. Минск: БГТУ, 2006. 482 с.

Grubbs F.E., Beck G. Extension of sample sizes and percentage points for significance tests of outlying observations // Technometrics. 1972. Vol. 14, iss. 4. P. 847–854.

References

Bildyukevich A.V., Kozlov N.G., Gapankova Ye.I., Latyshevich I.A. Patent № 24242 Respublika Belarus, MPK A63S 5/12 (2006.1), S08L 63/02 (2006.01), C08J 5/24 (2006.01) Epoksidnoye svyazuyushcheye i prepreg na yego osnove dlya proizvodstva sportivno-begovykh plastikovykh lyzh: № a20220242: appl. 10.10.2022: publ. 20.03.2024 / zayavitel Gosudarstvennoye nauchnoye uchrezhdeniye «Institut fiziko-organicheskoy khimii Natsionalnoy akademii nauk Belarusi». 4 p. (In Russ.)

Bolshev L.N., Smirnov N.V. Tablitsy matematicheskoy statistiki. Moscow: Nauka, 1965. 463 p. (In Russ.)

Grebennikova I.V. Metody matematicheskoy obrabotki eksperimentalnykh dannykh: ucheb.-metod. posobiye. Yekaterinburg: Izd-vo Ural. Un-ta, 2015. 125 p. (In Russ.)

Grubbs F.E., Beck G. Extension of sample sizes and percentage points for significance tests of outlying observations. *Technometrics*, 1972, vol. 14, iss. 4, pp. 847–854.

Latyshevich I.A., Gapankova Ye.I., Polkhovskiy A.V., Bildyukevich A.V., Shetko S.V., Prokhorchik S.A., Klyuyev A.Yu., Kozlov N.G. Polimernyy kompozitsionnyy material na osnove terpenoidnogo syrya dlya proizvodstva plastikovykh lyzh. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2020, iss. 233, pp. 208–220. (In Russ.)

Stavrov V.P. Formoobrazovaniye izdeliy iz kompozitsionnykh materialov: uchebnik. Minsk: BGTU, 2006. 482 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 13.02.2025

Латышевич И.А., Гапанькова Е.И., Козлов Н.Г. Влияние типа препрега на эксплуатационные показатели лыж // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 524–538. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.524-538

Пластиковая лыжа является высокотехнологичным многослойным композитом и собирается по типу «сэндвича»: снизу и сверху деревянный клин защищается полимерными материалами, которые фиксируются с помощью клеевых материалов – препрегов. Они имеют конструкционное назначение, изготавливаются на основе волокнистых армирующих наполнителей и полимерных связующих различной природы. Целью работы являлось сравнение эксплуатационных характеристик спортивно-беговых пластиковых лыж, изготовленных с применением различных типов препрегов, разработанных в ИФОХ НАН БЕЛАРУСИ. Для полученных лыж на основе препрег-ленты и препрег-флиса, а также однонаправленного двухслойного препрега определены эксплуатационные показатели качества (стрела прогиба, положение центра тяжести, жесткость средней части и прочность при изгибе, остаточный прогиб, жесткость передней и задней частей). Полученные значения экспериментальных

характеристик варьируются в узком диапазоне и не выходят за пределы нормативных значений. Испытания позволили установить равнозначное влияние на эксплуатационные показатели пластиковых лыж как образцов на основе двухслойного однонаправленного препрега, так и на основе связки «препрег-лента – препрег-флис». Применение двухслойного однонаправленного препрега дало возможность повысить производительность в два раза за счет упрощения принципа сборки лыжного пакета (полное оборачивание) и возможности обслуживать два пресса одним рабочим. При этом следует отметить, что доля препрега в стоимости пластиковой лыжи составляет ориентировочно до 40%, и замена связки «препрег-лента – препрег-флис» на двухслойный однонаправленный препрег приведет к снижению стоимости конечного изделия за счет удешевления препрега ориентировочно в 4 раза.

Ключевые слова: препрег, эпоксидное связующее, пластиковые лыжи, испытания.

Latyshevich I.A., Hapankova E.I., Kozlov N.G. Influence of prepreg type on skis performance. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 524–538 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.524-538

The plastic ski is a high-tech multilayer composite and is assembled using the "sandwich" method: the wooden wedge is protected from below and from above by polymeric materials, which are fixed using adhesive materials – prepregs. They have a structural purpose, are made on the basis of fibrous reinforcing fillers and polymeric binders of various nature. The aim of the work was to compare the performance characteristics of sports and running plastic skis manufactured using various types of prepregs developed at the Institute of Physical Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus. For the obtained skis based on prepreg tape and prepreg fleece, as well as unidirectional two-layer prepreg, the performance quality indicators (deflection, center of gravity position, rigidity of the middle part and bending strength, residual deflection, rigidity of the front and back parts) were determined. The obtained values of the experimental characteristics vary in a narrow range and do not exceed the standard values. The tests allowed to establish an equivalent effect on the performance of plastic skis for both samples based on a two-layer unidirectional prepreg and on a prepreg-tape – prepreg-fleece bond. The use of a two-layer unidirectional prepreg made it possible to double the productivity by simplifying the principle of assembling a ski package (complete wrapping) and the ability of one worker to service two presses. At the same time, it should be noted that the share of prepreg in the cost of a plastic ski is approximately up to 40%, replacing the prepreg-tape and prepreg-fleece bond with a two-layer unidirectional prepreg will lead to a decrease in the cost of the final product due to a 4-fold reduction in the price of the prepreg.

Keywords: prepreg, epoxy resin, plastic skis, testing.

ЛАТЫШЕВИЧ Ирина Александровна – доцент, старший научный сотрудник лаборатории мембранных процессов Института физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси, кандидат технических наук. ORCID: 0000-0002-2791-3577. SPIN-код: 3056-4309.

220072, ул. Сурганова, д. 13, г. Минск, Республика Беларусь. E-mail: irinalatyshevitch@gmail.com

LATYSHEVICH Iryna A. – PhD (Technical), Associate Professor, Senior Researcher at the Laboratory of Membrane Processes, Institute of physical organic chemistry of The National academy of sciences of Belarus. ORCID: 0000-0002-2791-3577. SPIN-code: 3056-4309.

220072. Surganova stk. 13. Minsk. Republic of Belarus. E-mail: irinalatyshevitch@gmail.com

ГАПАНЬКОВА Елена Игоревна – научный сотрудник лаборатории мембранных процессов Института физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси. ORCID: 0000-0002-7629-8304.

220072, ул. Сурганова, д. 13, г. Минск, Республика Беларусь. E-mail: elenagapankova@gmail.com

HAPANKOVA Alena I. – researcher of the Laboratory of Membrane Processes, Institute of physical organic chemistry of The National academy of sciences of Belarus. ORCID: 0000-0002-7629-8304.

220072. Surganova stk. 13. Minsk. Republic of Belarus. E-mail: elenagapankova @gmail.com

КОЗЛОВ Николай Гельевич – профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории мембранных процессов Института физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси, доктор химических наук. SPIN-код: 7032-6636.

220072, ул. Сурганова, д. 13, г. Минск, Республика Беларусь. Тел.: E-mail: loc@ifoch.bas-net.by

KOZLOV Nikolay G. – DSc (Chemical), Professor, Leading Researcher of the Laboratory of Membrane Processes, Institute of physical organic chemistry of The National academy of sciences of Belarus. SPIN-code: 7032-6636.

220072. Surganov stk. 13. Minsk. Republic of Belarus. E-mail: loc@ifoch.bas-net.by

5. ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ. БИОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 676.022.62

О.П. Ковалева, С.Р. Алексеев, О.В. Петруничев

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ В ВАРОЧНЫЙ РАСТВОР НА КАЧЕСТВО СУЛЬФАТНОЙ ЛИСТВЕННОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

Введение. Производство целлюлозы основано на химической переработке растительного сырья с целью освобождения её от сопутствующих веществ – лигнина, гемицеллюлоз, смол, жиров, танинов и др. Выделение целлюлозы из растительного сырья называется процессом делигнификации, или варкой [Технология…, 2003; Производство…, 2016]. Сульфатный способ получения целлюлозы наиболее распространен, в качестве варочного реагента используют раствор гидроксида и сульфида натрия – белый щелок. С целью улучшения качества получаемой целлюлозы в варочный раствор могут быть добавлены вспомогательные химические вещества [Информационно-технический…, 2023].

Повышение производительности производства является ключом к снижению себестоимости продукции. Изменение параметров варки целлюлозы, таких как продолжительность и температура варки, может привести к незначительному повышению производительности, поскольку большинство из них поддерживается на оптимальном уровне в процессе работы варочной установки. Большинство усилий по повышению производительности направлены на повышение выхода крафт-целлюлозы за счет защиты полисахаридов от постепенной деструкции в процессе варки. Также проводятся интенсивные исследования по разработке добавок вспомогательных химических веществ для улучшения процесса варки крафт-целлюлозы и повышения её качества на основе поверхностно-активных реагентов.

Содержание экстрактивных веществ в лиственной целлюлозе является важным показателем её качества. Многолетней проблемой на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности являются смоляные затруднения, негативно влияющие как на качество готовой продукции, так и на техноло-

гический процесс её получения. В лиственных породах древесины, таких как берёза и осина, смолистые вещества содержатся в сердцевинных и радиальных лучах, в паренхимных клетках древесины, а также в коре и лубе. Традиционными способами решения проблемы являются выдерживание древесины на воздухе, повышение качества технологической щепы, промывка волокнистого полуфабриката горячей водой, регулирование величины pH и выравнивание температуры по производственному потоку, использование различных диспергаторов [Аллен, Лапойнт, 2003; Печурина, 2006], отделение мелкого волокна, добавка наполнителей в бумажную массу.

Вопросами снижения смоляных затруднений и контроля за количеством и состоянием «вредной» смолы начали заниматься еще в 50-е гг. XX века применительно к сульфитному способу производства целлюлозы [Хироси, Вассабуро, 1965]. В последние годы большое внимание уделяется контролю смолистых отложений (pitch control) в целлюлозно-бумажном производстве, идет поиск эффективных добавок для снижения степени смолистости волокнистых полуфабрикатов; используемые на стадии варки поверхностно-активные вещества не в полной мере позволяют достичь требуемого результата.

В лиственных породах древесины жирные кислоты преимущественно содержатся в вертикальной лучевой паренхиме, при этом мелкие частицы смолы находятся в порах паренхимных клеток, что приводит к невозможности их удаления из волокна. Поверхностно-активные вещества при варке способствуют снижению «смоляных затруднений» при переработке целлюлозы лиственных пород [Печурина и др., 2003]. В работе [Прокшин и др., 2008] показано, что в присутствии поверхностно-активных веществ происходит повышение скорости диффузии лигнина и смолистых веществ в волокнах целлюлозы.

Присутствие поверхностно-активных веществ снижает поверхностное натяжение между жидкостью и древесной щепой, что способствует быстрому проникновению щелока во внутреннюю матрицу щепы и обеспечивает более равномерную варку при селективной делигнификации, снижение количества непровара и содержания экстрактивных веществ в полученной целлюлозе [Duggirala, 2000].

Поверхностно-активные вещества используются в различных продуктах химической промышленности, таких как фармацевтические препараты, моющие средства, отбеливатели и пр. Данные вещества способны при низкой концентрации адсорбироваться на поверхностях и границах раздела фаз, тем самым изменяя свою свободную энергию. [Akadiri, 2010]. Как объясняется в исследовании [Rosen, 2004], для обеспечения поверхностной

активности в конкретной системе поверхностно-активное вещество должно иметь амфипатическую структуру. Амфипатическая структура состоит из лиофильной группы, которая обладает сильным притяжением к растворителю, и лиофобной группы, которая обладает притягательной способностью к твердой фазе. В случае поверхностно-активного вещества, растворенного в водной среде, лиофобную группу также называют гидрофобной. Благодаря своей амфипатической структуре поверхностно-активные вещества концентрируются на поверхности, а не в объёме.

Экстрактивные вещества, присутствующие в структуре древесины, могут препятствовать процессу проникновения варочного раствора. Они представляют собой сложные смеси смоляных кислот, жирных кислот, спиртов и других химических веществ; их состав отличается для разных пород деревьев и частей дерева. Экстрактивные вещества находятся в порах древесной щепы и препятствуют проникновению варочного раствора. Для улучшения процесса пропитки древесной щепы необходимо снизить поверхностное натяжение между варочным раствором и материалом, в состав которого входят экстрактивные вещества. Поверхностно-активные вещества способствуют эмульгированию и растворению экстрактивных веществ, тем самым освобождая поры древесной щепы для проникновения варочного раствора [Chen, 1994; Wei et al., 2006]. [Chen et al., 2010] высказано предположение, что поверхностно-активные вещества «могут улучшить смачивание поверхности древесной щепы, позволяя варочному реагенту быстро проникать во внутренние слои, распределяясь по капиллярам, эмульгируя и солюбилизируя смолы и/или лигнин».

Как отмечалось в [Duggirala, 2000; Mishra et al., 2007], применение добавок неионогенных поверхностно-активных веществ способствовало повышению выхода небеленой и беленой целлюлозы и улучшению её прочностных свойств.

Известно, что продукты термического разложения экстрактивных веществ придают небеленой целлюлозе темный цвет. В работе [Mishra et al., 2007] оценили воздействие поверхностно-активных веществ на предотвращение отложения продуктов разложения экстрактивных веществ на поверхности волокон. Целью лабораторных исследований по использованию поверхностно-активных веществ в качестве добавок в варочный раствор было установить их эффективность в повышении выхода целлюлозы и снижении количества непровара, снижение расхода отбеливателя, улучшение качества целлюлозы и характеристик сточных вод. При традиционной варке присутствие различных поверхностно-активных веществ сводит к минимуму отложение термически разрушенных веществ на поверхности

волокон, предотвращая тем самым их потемнение. Удаление экстрактивных веществ также способствует снижению содержания остаточного лигнина в целлюлозе, поскольку именно эти соединения окисляются раствором перманганата при определении степени делигнификации целлюлозы.

В работе [Ahluwalia et al., 1992] также показано, что применение добавок поверхностно-активных веществ в варочный раствор в количестве 0,05–0,10% к массе абсолютно сухой древесины приводит к некоторому повышению выхода небеленой целлюлозы и снижению количества непровара. Это связано с тем, что добавки на основе поверхностно-активных веществ снижают поверхностное натяжение между щелоком и древесной щепой, обеспечивая значительное увлажнение поверхности щепы и способствуя быстрому проникновению щелока во внутреннюю матрицу щепы**.** Лучшее проникновение варочного раствора в древесную щепу способствует более быстрому обессмоливанию древесной щепы. Также было отмечено увеличение остаточной активности щелочи в черном щелоке по сравнению с холостым экспериментом.

Как показано в работе [Pitch…, 2000], использование добавок поверхностно-активных веществ во время варки целлюлозы является одним из способов контроля и устранения проблемы со смолой в получаемой целлюлозе. В исследовании [Kathomdani et al., 2022] приведены данные по получению крафт-целлюлозы из гибрида акации с добавлением различных неионогенных поверхностно-активных веществ. Результаты показали, что тип и дозировка поверхностно-активных веществ не оказали существенного влияния на степень делигнификации и выход целлюлозы, а также на количество непровара в ней. С другой стороны, добавки поверхностно-активных веществ в значительной степени повлияли на экстрактивность крафт-целлюлозы. В данном исследовании был сделан вывод, что при удалении экстрактивных веществ щелок способен проникать в щепу глубже и быстрее, варка целлюлозы происходит более равномерно, что приводит к снижению числа Каппа, количества непровара в целлюлозе, содержания смолы и увеличению остаточной активной щелочи в черном щелоке.

По мнению [Mishra et al., 2007; Kathomdani et al., 2022], поверхностно-активные вещества в качестве добавок для варки целлюлозы снижают поверхностное натяжение между варочным раствором и лигноцеллюлозным материалом, что приводит к смачиванию гидрофобной поверхности материала и помогает диспергировать экстракты из древесной щепы. В результате быстрого проникновения варочного раствора в щепу улучшаются показатели варки: снижается число Каппа и количество непровара в целлюлозе. Показано, что использование поверхностно-активных веществ

при расходе 0,1% к массе абсолютно сухой древесины снижает содержание экстрактивных веществ в целлюлозе на 58% по сравнению с контролем (без добавления поверхностно-активных веществ).

В работе [Вураско и др., 2025] представлены результаты исследований влияния варочно-диспергирующих добавок отечественного производства на выход и степень делигнификации целлюлозы, а также количественное содержание в ней смолы, при сульфатных варках смеси щепы из древесины осины и березы (1:1). Применение всех добавок привело к снижению содержания массовой доли экстрактивных веществ в технической целлюлозе в 1,25–2,0 раза по сравнению с контрольной варкой (1,0 % от а.с.ц.); исследуемые образцы целлюлозы не содержали капсулированной (внутриволоконной) смолы.

Экономичным и технологически простым решением дополнительного снижения общей смолистости целлюлозы после варки является введение поверхностно-активных веществ на стадии промывки волокна [Смит, 2021]. Интенсифицировать процесс обессмоливания и снизить расход химических реагентов позволяет применение синергетических смесей поверхностно-активных веществ в присутствии биокатализаторов, использование которых является одним из направлений наилучших доступных технологий в ЦБП [Копнина и др., 2015; Смит и др., 2019].

В статье [Якубова и др., 2021] рассмотрено влияние добавок поверхностно-активных веществ на основные физические и коллоидно-химические характеристики черного щелока до и после отделения сульфатного мыла. В результате введения добавок поверхностно-активных веществ наблюдается снижение вязкости и уменьшение пенообразования раствора черного щелока.

Целью лабораторных исследований по использованию поверхностно-активных веществ в варочном растворе для сульфатной варки было установить их влияние на выход целлюлозы и количество непровара в ней, а также на содержание экстрактивных веществ в полученном волокнистом полуфабрикате.

Задачи работы:

- определить содержание экстрактивных веществ в щепе, полученной из лиственных пород древесины;
- провести серию сульфатных варок лиственной древесины по одному технологическому режиму без добавок и с добавками поверхностно-активных веществ;
- определить общий выход лиственной целлюлозы и количество непровара в полученной целлюлозе;
- провести анализ целлюлозы на содержание остаточного лигнина и экстрактивных веществ.

Материалы и методика исследования. Для выполнения исследования была использована технологическая щепа лиственной древесины, состоящая из смеси берёзы (85%) и осины (15%). Анализ результатов фракционирования щепы из лиственной древесины показал, что основная фракция технологической щепы (87,4%) соответствует марке Ц-2 согласно требованиям ГОСТ 15815; также отмечено присутствие коры (1,2%) и гнили (0,8%).

До проведения исследований щепа высушивалась при комнатной температуре в течение недели с целью выравнивания влажности по всему объёму щепы. Для анализа древесины на содержание экстрактивных веществ методом квартования была взята навеска щепы массой 20,1 г и измельчена до фракции 0,25/0,5 мм (опилки).

Как известно, среднее содержание экстрактивных веществ в древесине березы – 2,25%, а в древесине осины – 2,7% [Никитин и др., 1978]. Определение содержания экстрактивных веществ в древесине проводилось в аппарате Э-8: 1 г опилок помещался в гильзу из фильтровальной бумаги, предварительно проэкстрагированной этим же растворителем. Определение содержания экстрактивных веществ в целлюлозе производилось с использованием дихлорметана. Дихлорметан – слабо полярный растворитель, по сравнению с этанолом извлекает определенные вещества, такие как смолы и жиры [Дейнеко, Фаустова, 2015]. Экстрагирование древесных опилок проводилось согласно ГОСТ 6841 «Метод определения смол и жиров»; среднее содержание экстрактивных веществ в щепе составило 1,038%.

Для приготовления варочного раствора (белого щелока) для сульфатной варки были использованы растворы гидроксида и сульфида натрия. Характеристика белого щелока: сульфидность – 25%, концентрация активной щелочи – 100 г/л в ед. Na_2O. Для определения общей титруемой щелочи применялось титрование 0,5N раствором HCl в присутствии индикатора метиленовый оранжевый. Для анализа белого щелока применялось два метода определения концентраций для устранения погрешности опыта [Правилова, 1984]. Результаты определения характеристики варочного раствора представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика белого щелока

Characteristics of white liquor

Параметр	Среднее содержание		
	1 метод	2 метод	среднее
Общая титруемая щелочь, г/л ед. Na_2O	107,3	107,3	107,3
Концентрация активной щелочи, г/л ед. Na_2O	107,0	106,6	106,8
Сульфидность, %	25,5	25,8	25,6

Условия лабораторной сульфатной варки: конечная температура варки – 165°С, расход активной щелочи – 18,5%, Н-фактор – 1400. В автоклав объёмом 350 мл загружалось 60 г влажной щепы, после заливался белый щелок, исходя из гидромодуля 4,5. Пропитка древесной щепы варочным раствором производилась в течение 24 ч для создания условий, приближенных к производственным условиям пропитки щепы под давлением. Подъём температуры в автоклаве производили в течение 90 мин, включая остановку (15 мин) по достижении температуры 105°С для выравнивания температуры по всему объёму автоклава. Температурный график сульфатной варки соответствовал расчету Н-фактора.

Для исследования были использованы зарубежные коммерческие марки поверхностно-активных веществ Dispersol YZ5318, Dispersol PCS 306, Dispersol YZ5850 предположительно неионогенного характера. Расход поверхностно-активных веществ на варку составлял 0,1% от массы абсолютно сухой древесины.

Результаты и обсуждение. В результате сульфатных варок была получена техническая целлюлоза, определен общий выход лиственной целлюлозы, количество непровара в полученной целлюлозе, проведен анализ целлюлозы на содержание остаточного лигнина (число Каппа) и экстрактивных веществ (табл. 2).

Таблица 2

Результаты сульфатных варок

The results of sulfate cooking

Варочный раствор	Общий выход целлюлозы, %	В том числе непровар, %	Число Каппа	Содержание экстрактивных веществ, %		Относительная инструментальная погрешность, %
Без добавок	47,91	1,13	27	0,067	0,06	±1,0
	47,56	0,93	26	0,068		
С добавкой YZ5318	47,77	1,06	27	0,032	0,03	±0,35
	46,56	1,10	27	0,031		
С добавкой PCS 306	47,66	0,81	26	0,017	0,02	±1,7
	47,48	0,97	26	0,018		
С добавкой YZ5850	47,30	1,06	27	0,010	0,01	±2,8
	46,83	1,40	27	0,010		

На основании данных табл. 2 можно заключить, что при прочих равных условиях сульфатной варки с добавками поверхностно-активных ве-

ществ и без добавок, выход лиственной целлюлозы в среднем составил 47,3% без заметного влияния наличия поверхностно-активных веществ в варочном растворе на данный показатель. Количество непровара в полученной целлюлозе также варьировалось в пределах 1% при числе Каппа 27. При этом среднее содержание непровара в целлюлозе, полученной от варки лиственной древесины без добавок, составило 1,03%, в то время как в случае варки с добавкой в варочный раствор PCS 306 количество непровара в целлюлозе снизилось на 14% (0,89%).

Присутствие поверхностно-активных веществ в значительной степени повлияло на содержание экстрактивных веществ в полученных образцах целлюлозы. Добавка в варочный раствор Dispersol YZ5318 привела к снижению смолистости целлюлозы в 2 раза, а добавки Dispersol PCS 306 и Dispersol YZ5850 позволили снизить содержание экстрактивных веществ в 3 и 6 раз соответственно.

Использование добавок поверхностно-активных веществ в белый щелок может повлиять на характеристики отработанного черного щелока, поступающего в систему регенерации химикатов сульфат-целлюлозного завода. Влияние добавок поверхностно-активных веществ на физико-химические характеристики черного щелока можно оценить по показателю поверхностного натяжения – важной термодинамической характеристике раствора. Результаты анализа черного щелока от сульфатных варок представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты анализа черного щелока от сульфатных варок

The results of the analysis of black liquor from sulfate cooking

Черный щелок	Поверхностное натяжение, мН/м	% от контрольного образца	Снижение показателя, %
Без добавок	53,1	100,0	–
С добавкой YZ5318	49,8	93,7	–6,3
С добавкой PCS 306	50,2	94,5	–5,5
С добавкой YZ5850	50,6	95,2	–4,8

Как видно из данных табл. 3, присутствие поверхностно-активных веществ несколько понижает поверхностное натяжение черного щелока, в среднем на 5-6%.

Поскольку скорость испарения жидкости ограничена теплопередачей и вязкостью, а не поверхностными силами [Тепло-…, 1982], то пузырько-

вое кипение в щёлоке определяется температурой насыщения и содержанием неорганических веществ, а не межфазным натяжением на границе «жидкость-пар». Понижение поверхностного натяжения может даже улучшить дегазацию и уменьшить пенообразование, если концентрация поверхностно-активных веществ низкая. При высокой концентрации возможна пена и нестабильность уровня кипения. Исследования [Старжинская, 2024], показали, что при отстаивании черного щелока применение поверхностно-активных веществ способствует агрегации частиц сульфатного мыла, и, как следствие, увеличивается его выход. Соли жирных и смоляных кислот в составе щелока снижают поверхностное натяжение. При удалении части поверхностно-активных веществ поверхностное натяжение повышается. При этом установлено, что поверхностно-активные вещества, как неионогенные, так и ионогенные, снижают поверхностное натяжение щелока в равной степени; после отстаивания черного щелока поверхностное натяжение увеличивается.

Снижение поверхностного натяжения увеличивает способность черного щелока к пенообразованию, однако при низком содержании поверхностно-активных веществ в черном щелоке это не должно вызвать проблемы для работы выпарных аппаратов.

Заключение. Исследования показали, что добавка поверхностно-активных веществ марки Dispersol в варочный раствор для сульфатной варки незначительно влияет на выход целлюлозы, а также на содержание остаточного лигнина в ней. Содержание непровара в полученной целлюлозе при добавлении на варку поверхностно-активных веществ марки Dispersol PCS 306 снижается на 14% по сравнению с варкой без добавок. При этом использование добавок поверхностно-активных веществ в варочный раствор для сульфатной варки лиственной древесины позволяет снизить содержание экстрактивных веществ в полученной целлюлозе в 2-6 раз. Небольшой расход поверхностно-активных веществ на варку не должен в значительной степени повлиять на характеристики отработанного черного щелока, поступающего в выпарные аппараты.

Вклад авторов. Вклад каждого автора равнозначен.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Аллен Л., Лапойнт С. Повышение степени обессмоливания небеленой сульфатной целлюлозы в процессе ее промывки на канадском предприятии. // Pulp Paper Can. 2003. №12. С. 59-62.

Вураско А.В., Пепелин М.А., Пермяков А.Н., Атаева Ю.Г., Самородов С.А., Агеев М.А., Шерстобитов А.Л., Сиваков В.П., Губанов И.А. Применение варочно-диспергирующих добавок при сульфатной делигнификации композиции лиственных пород древесины // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 253. С. 304-320.

Дейнеко И.П., Фаустова Н.М. Элементный и групповой химический состав коры и древесины осины // Химия растительного сырья. 2015. №1. С. 51-62.

Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС-1 2023. Целлюлозно-бумажное производство. М.: Бюро НДТ, 2023. 459 с.

Копнина Р.А., Демьянцева Е.Ю., Карпов И.А., Андранович О.С. Влияние смесей амфифильных соединений и ферментных препаратов на смолистость волокнистых полуфабрикатов // Бутлеровские сообщения. 2015. Т. 42, № 4. С. 158-161.

Никитин В.М., Оболенская А.В., Щеголев В.П. Химия древесины и целлюлозы. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 368 с.

Печурина Т.Б. Использование диспергаторов с целью снижения смоляных затруднений при производстве беленой лиственной сульфатной целлюлозы: дисс. … канд. техн. наук. Архангельск, 2006. 141 с.

Печурина Т.Б., Миловидова Л.А., Комарова Г.В., Комаров В.И. Влияние добавок диспергантов на изменение состояния смолы и содержание экстрактивных веществ в лиственной сульфатной целлюлозе // ИВУЗ. Лесной журнал. 2003. № 2-3. С. 68–75.

Правилова Т.А. Химический контроль производства сульфатной целлюлозы. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 256 с.

Производство сульфатной целлюлозы: учеб. пособие / сост. Ю.С. Иванов, А.Г. Кузнецов, Л.Ю. Бабкина. СПб., 2016. Ч. II. 72 с.

Прокшин Г.Ф., Гусакова М.А., Афанасьев Н.И., Личутина Т.Ф., Вишнякова А.П., Фесенко А.В. Особенности образования и механизм извлечения остаточного лигнина и смолы при сульфатной варке березовой и осиновой целлюлозы // Химия растительного сырья. 2008. № 2. С. 5–10.

Смит Р.А. Влияние синергетических композиций поверхностно-активных веществ и липазы на остаточную смолистость волокнистых полуфабрикатов: автореф. дис. … канд. хим. наук. СПб., 2021. 16 с.

Смит Р.А., Демьянцева Е.Ю., Андранович О.С. Анализ состояния смолы при обессмоливании сульфатной лиственной целлюлозы // ИВУЗ. Лесной журнал. 2019. № 4. С. 168-178.

Старжинская Е.В. Совершенствование технологии промывки сульфатного мыла из смеси щелоков от варки древесины различных пород: дисс. … канд. техн. наук. Архангельск, 2024. 156 с.

Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент. М.: Энергоиздат, 1982. 512 с.

Технология целлюлозно-бумажного производства: в 3 т. Т. I: Сырьё и производство полуфабрикатов. Ч. 2: Производство полуфабрикатов. СПб.: Политехника, 2003. 633 с.

Хироси Я., Вассабуро К. Исследование смоляных затруднений сульфитной целлюлозы с применением ПАВ // Сэнъи Гиккайси. 1965. № 11. С. 68.

Якубова О.С., Демьянцева Е.Ю., Смит Р.А. Физико-химические характеристики черного щелока до и после извлечения сульфатного мыла в присутствии добавок поверхностно-активных веществ // Химия растительного сырья. 2021. №4. С. 337-343.

Ahluwalia M.R, Coffy J.M, Norris A.D. Emering technology in kraft pulping with digester additives // CPPA Conference Proceedings. 1992. P. 1.

Akadiri M.M.A. The role of surfactants in the processes of pulp craft cooking / Department of Chemical Engineering. Montreal: McGill University, 2010. 67 p.

Pitch Control, Wood Resin and Deresination. Atlanta, GA: TAPPI Press, 2000. 392 p.

Chen G.C. Application of a surfactant as a kraft pulping additive // Tappi Journal. 1994. Vol. 77, no. 2. P. 125-128.

Chen D., Zhao J., Berry R., Berk D., Kubes G. A method for measuring pulping liquor penetration into the wood structure // Cellulose Chemistry and Technology. 2010. Vol. 44, no. 9. P. 319-325.

Duggirala P.Y. Surfactant based digester additive technology for kraft soft wood and hard wood pulping // Appita Journal. 2000. Vol. 53, iss. 1. P. 41-48.

Kathomdani P.D.S., Marsoem S.N., Sunarti S., Nirsatmanto A. Effect of surfactant application on acacia hybrid kraft pulp properties // Cellulose Chemistry and Technology. 2022. Vol. 56, no. 5-6. P. 619-624.

Mishra R.P., Maheshwari G.D., Bhargava G.G., Dasgupta T.K., Thusu N.K. Effect of Surfactant Application on Pulping Characteristics of Mill Chips and Reduction in Pollution Load // IPPTA: Quarterly Journal of Indian Pulp and Paper Technical Association. 2007. Vol. 19, no. 1. P. 61-65.

Rosen M.J. Surfactants and Interfacial Phenomena. 3rd ed. New Jersey, USA: Wiley-Interscience, 2004. 500 p.

Wei H., Ukem N., Berk D., Kubes G.J. The role of surfactants in wood deresination // Cellulose Chemistry and Technology. 2006. Vol. 40, no. 1. P. 71-75.

References

Ahluwalia M.R, Coffy J.M, Norris A.D. Emering technology in kraft pulping with digester additives. *CPPA Conference Proceedings*, 1992, p. 1.

Akadiri M.M.A. The role of surfactants in the processes of pulp craft cooking / Department of Chemical Engineering. Montreal: McGill University, 2010. 67 p.

Allen L., Lapoint S. Increasing the degree of desalination of unbleached sulfate pulp during its washing at a Canadian enterprise. *Pulp Paper Can*., 2003, no. 12, pp. 59-62. (In Russ.)

Chen G.C. Application of a surfactant as a kraft pulping additive. *Tappi Journal*, 1994, vol. 77, no. 2, pp. 125-128.

Chen D., Zhao J., Berry R., Berk D., Kubes G. A method for measuring pulping liquor penetration into the wood structure. *Cellulose Chemistry and Technology*, 2010, vol. 44, no. 9, pp. 319-325.

Deyneko I.P., Faustova N.M. The elemental and group chemical composition of aspen bark and wood. *Chemistry of plant raw materials*, 2015, no. 1, pp. 51-62. (In Russ.)

Duggirala P.Y. Surfactant based digester additive technology for kraft soft wood and hard wood pulping. *Appita Journal*, 2000, vol. 53, iss. 1, pp. 41-48.

Heat and mass transfer. Thermal engineering experiment. Moscow: Energoizdat, 1982. 512 p. (In Russ.)

Hirosi Ya., Wassaburo K. Investigation of resin difficulties of sulfite cellulose using surfactants. *Senyi Gikkaishi*, 1965, no. 11, pp. 68. (In Russ.)

Information and technical handbook on the best available technologies ITS-1 2023. Pulp and paper production. Moscow: Bureau NDT, 2023. 459 p. (In Russ.)

Kathomdani P.D.S., Marsoem S.N., Sunarti S., Nirsatmanto A. Effect of surfactant application on acacia hybrid kraft pulp properties. *Cellulose Chemistry and Technology*, 2022, vol. 56, no. 5-6, pp. 619-624.

Kopnina R.A., Demyantseva E.Yu., Karpov I.A., Andranovich O.S. The effect of mixtures of amphiphilic compounds and enzyme preparations on the tariness of fibrous semi-finished products. *Butlerov communications*, 2015, vol. 42, no. 4, pp. 158-161. (In Russ.)

Mishra R.P., Maheshwari G.D., Bhargava G.G., Dasgupta T.K., Thusu N.K. Effect of Surfactant Application on Pulping Characteristics of Mill Chips and Reduction in Pollution Load. *IPPTA: Quarterly Journal of Indian Pulp and Paper Technical Association*, 2007, vol. 19, no. 1, pp. 61-65.

Nikitin V.M., Obolenskaya A.V., Shchegolev V.P. Chemistry of wood and cellulose. Moscow: Lesnaya promyshlennost, 1978. 368 p. (In Russ.)

Pechurina T.B. The use of dispersants to reduce resin difficulties in the production of bleached deciduous sulfate cellulose. Diss. … Cand. Tech. Sci. Arkhangelsk, 2006. 141 p. (In Russ.)

Pechurina T.B., Milovidova L.A., Komarova G.V., Komarov V.I. The effect of dispersant additives on the change in resin state and the content of extractives in deciduous sulfate cellulose. *Forestry journal*, 2003, no. 2-3, pp. 68-75. (In Russ.)

Pitch Control, Wood Resin and Deresination. Atlanta, GA: TAPPI Press, 2000. 392 p.

Pravilova T.A. Chemical control of sulfate cellulose production. Moscow: Lesnaya promyshlennost, 1984. 256 p. (In Russ.)

Prokshin G.F., Gusakova M.A., Afanasyev N.I., Lichutina T.F., Vishnyakova A.P., Fesenko A.V. Features of formation and mechanism of extraction of residual lignin and resin during sulfate cooking of birch and aspen cellulose. *Chemistry of vegetable raw materials*, 2008, no. 2, pp. 5-10. (In Russ.)

Rosen M.J. Surfactants and Interfacial Phenomena, 3rd ed. New Jersey, USA: Wiley-Interscience, 2004. 500 p.

Smith R.A. The effect of synergistic compositions of surfactants and lipase on the residual tariness of fibrous semi-finished products: author's abstract. Diss. … Cand. Chem. Sci. St. Petersburg, 2021. 16 p. (In Russ.)

Smith R.A., Demyantseva E.Yu., Andranovich O.S. Analysis of the resin state during desalination of sulfate deciduous cellulose. *Forestry journal*, 2019, no. 4, pp. 168-178. (In Russ.)

Starzhinskaya E.V. Improving the technology of washing sulfate soap from a mixture of lye from cooking wood of various species. Diss. … Cand. Tech. Sci. Arkhangelsk, 2024. 156 p. (In Russ.)

Sulfate pulp production: a textbook / comp. Yu.S. Ivanov, A.G. Kuznetsov, L.Y. Babkina. St. Petersburg, 2016. P. II. 72 p. (In Russ.)

The technology of pulp and paper production: in 3 vol. Vol. I: Raw materials and production of semi-finished products. P. 2: Production of semi-finished products. St. Petersburg: Polytechnic, 2003. 633 p. (In Russ.)

Vurasko A.V., Pepelin M.A., Permiakov A.N., Ataeva J.G., Samorodov S.A., Ageev M.A., Sherstobitov A.L., Sivakov V.P., Gubanov I.A. The use of cooking and dispersing additives in the sulfate delignification of the composition of hardwood. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehniceskoj akademii*, 2025, iss. 253, pp. 304-320. (In Russ.)

Wei H., Ukem N., Berk D., Kubes G. J. The role of surfactants in wood deresination. *Cellulose Chemistry and Technology*, 2006, vol. 40, no. 1-2, pp. 71-75.

Yakubova O.S., Demyantseva E.Yu., Smith R.A. Physics-chemical characteristics of black liquor before and after extraction of sulfate soap in the presence of additives of surfactants. *Chemistry of vegetable raw materials*, 2021, no. 4, pp. 337-343. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 12.05.2025

Ковалева О.П., Алексеев С.Р., Петруничев О.В. Исследование влияния добавок поверхностно-активных веществ в варочный раствор на качество сульфатной лиственной целлюлозы // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 539–553. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.539-554

В статье рассматриваются перспективы применения поверхностно-активных веществ при сульфатной варке целлюлозы. Присутствие поверхностно-активных веществ снижает поверхностное натяжение между жидкостью и древесной щепой, что способствует быстрому проникновению щелока во внутреннюю матрицу щепы и обеспечивает селективную делигнификацию, снижение количества непровара и содержания экстрактивных веществ в полученной целлюлозе. Исследования компонентного состава лиственной древесины, представляющей смесь березы и осины, показали, что содержание экстрактивных веществ в ней составило 1,037%. Сульфатные варки были проведены по классической схеме и с добавками поверхностно-активных

веществ марки Dispersol. Расход поверхностно-активных веществ на варку составлял 0,1% от массы абсолютно сухой древесины. В результате варок получена техническая сульфатная целлюлоза, определен общий выход лиственной целлюлозы, количество непровара в полученной целлюлозе, произведен анализ целлюлозы на содержание остаточного лигнина и экстрактивных веществ. Исследования показали, что добавка поверхностно-активных веществ марки Dispersol в варочный раствор для сульфатной варки незначительно влияет на выход целлюлозы и содержание остаточного лигнина. Содержание непровара в полученной целлюлозе при добавлении в варочный раствор поверхностно-активных веществ марки Dispersol PCS 306 снижается на 14% по сравнению с варкой без добавок. При этом использование добавок поверхностно-активных веществ в варочный раствор для сульфатной варки лиственной древесины позволяет снизить содержание экстрактивных веществ в полученной целлюлозе в 2-6 раз. Присутствие данных поверхностно-активных веществ в варочном растворе понижает поверхностное натяжение отработанного черного щелока на 5-6%, но их небольшой расход на варку не должен в значительной степени повлиять на работу выпарных аппаратов.

Ключевые слова: лиственная древесина, сульфатная варка, поверхностно-активные вещества, поверхностное натяжение целлюлоза, экстрактивные вещества.

Kovaleva O.P. Alekseev S.R. Petrunichev O.V. Investigation of the effect of additives of surfactants in the cooking solution on the quality of sulfate hardwood cellulose. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 539–554 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.539-553

The article discusses the prospects for the use of surfactants in sulfate cooking. The presence of surfactants reduces the surface tension between the liquid and the wood chips, which promotes the rapid penetration of the liquor into the inner matrix of the chips and ensures selective delignification, reducing the amount of undercooked pulp and the content of extractives in the resulting pulp. Studies of the component composition of hardwood, which is a mixture of birch and aspen, showed that the content of extractive substances in it was 1.037%. Sulfate cooking was carried out according to the classical scheme and with additives of surfactants of the Dispersol brand. The consumption of surfactants for cooking was 0.1% of the weight of absolutely dry wood. As a result of the brews, technical sulfate pulp was obtained, the total yield of deciduous pulp was determined, the amount of the amount of undercooked pulp in the obtained pulp, and the pulp was analyzed for the content of residual lignin and extractives. Studies have shown that the addition of Dispersol brand surfactants to sulfate cooking solution has little effect on the yield of pulp and the content of residual lignin. The amount of undercooked pulp content of the obtained pulp, when surface-active substances of the Dispersol PCS 306 brand are added to the

cooking solution, is reduced by 14% compared to cooking without additives. At the same time, the use of additives of surfactants in the cooking solution for sulfate cooking of hardwood makes it possible to reduce the content of extractives in the resulting pulp by 2-6 times. The presence of these surfactants in the cooking solution reduces the surface tension of the spent black liquor by 5-6%, but their low cooking consumption should not significantly affect the operation of the evaporators.

K e y w o r d s : hardwood, sulfate cooking, surfactants, surface tension, cellulose, extractive substances.

КОВАЛЕВА Ольга Петровна – доцент Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: lta_cbp@mail.ru

KOVALEVA Olga P. – PhD (Technical), Associate Professor of the St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: lta_cbp@mail.ru

АЛЕКСЕЕВ Сергей Романович – ведущий специалист по технической поддержке ООО «Н.С.Р. Биокемикал»,

187420, ул. Мира, д. 1, г. Сясьстрой, Ленинградская область, Россия. E-mail: biochemical@inbox.ru

ALEKSEEV Sergey R. – Leading Specialist in technical support LLC «N.S.R. Biokemical»,

187420. Mira str. 1. Syasstroy. Leningrad Region. Russia. E-mail: biochemical@inbox.ru

ПЕТРУНИЧЕВ Олег Викторович – студент Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: lta_cbp@mail.ru

PETRUNICHEV Oleg V. – student of the St.Petersburg State Forest Technical University,

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: lta_cbp@mail.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 5

1. ХРОНИКА НАУЧНОЙ ЖИЗНИ

Лукьянова Л.В. Термин «насаждение» в истории формирования языка русской лесной науки 6

2. ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

Нацкий А.М. Усовершенствование системы подготовки кадров для борьбы с лесными пожарами на примере Ханты-Мансийского автономного округа – Югра 21

Усольцев В.А., ***Часовских В.П.*** Мультиколлинеарность переменных в евразийской базе данных о фитомассе деревьев и всеобщая аллометрия 38

Гибадуллин Н.Ф., ***Зайцев Д.А.***, ***Бачериков И.В.***, ***Мусин Х.Г.***, ***Мирсияпов Н.И.***, ***Галимуллин А.Ф.*** Макроструктурные изменения ксилемы по высоте ствола в естественных и искусственных сосняках Республики Татарстан 61

Байрамова В.Ф., ***Мельничук И.А.***, ***Приходько Е.О.***, ***Демчук А.С.***, ***Селиховкин А.В.*** Влияние инвазий вредителей и патогенов на композиционную целостность объектов ландшафтной архитектуры Санкт-Петербурга 76

Богданов Г.А., ***Османова Г.О.***, ***Бедова П.В.*** Фитоиндикационная оценка лесных сообществ государственного природного комплексного заказника республиканского значения «Горное Заделье» Республики Марий Эл 97

Лежнев Д.В., ***Глазунов Ю.Б.***, ***Коротков С.А.***, ***Титовец А.В.*** Вторичные сукцессии после сплошной санитарной рубки сосняков в ближнем Подмосковье 115

Осипенко А.Е., ***Башегуров К.А.***, ***Осипенко Р.А.***, ***Залесов С.В.*** Естественное возобновление в сосняках Новичихинского лесничества Алтайского края после рубок обновления 141

Тюкавина О.Н., ***Сурина Е.А.***, ***Гоголева Л.Г.***, ***Феклистов П.А.*** Световой режим лесов арктической зоны Европейского Севера 159

Лебедев А.В., ***Демидов В.Э.***, ***Осипов С.А.*** Оценка изменения древесно-кустарниковой растительности в зубровом питомнике Приокско-Террасного заповедника 174

Пожарская О.Д., ***Хомяков Ю.В.*** Свойства гидрогелей и факторы внешней среды, влияющие на скорость их деградации 198

Капиталинин Д.Ю., ***Тищенко П.А.***, ***Сидоренков В.М.***, ***Ачиколова Ю.С.***, ***Астапов Д.О.***, ***Рябцев О.В.***, ***Щекалев Р.В.*** Использование нейросетей глубокого обучения для автоматической валидации материалов лесоустройства по данным спутниковой съёмки 213

Шибанов С.А.*, *Орлова Л.В.*, *Нешатаев В.Ю.*, *Голованкова А.С. Лиственница на Елагином острове (ЦПКИО им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург) 234

Сергеева А.С. Взаимосвязь почвенных условий и численности елового подроста в спелых сосново-еловых древостоях Гатчинского района Ленинградской области 250

Гаврилова О.И.*, *Грязькин А.В.*, *Гурылёва Е.А.*, *Смирнов А.П. Дигрессия придорожных ельников южной Карелии под воздействием антропогенных факторов 262

Логунов Д.В. Перспективы интродукции различных представителей рода лиственница (*Larix* Mill.) в Нижегородской области 278

Пристова Т.А.*, *Федорков А.Л.*, *Новаковский А.Б. Запасы надземной фитомассы сосны скрученной сосны обыкновенной в экспериментальных культурах Республики Коми 290

Феклистов П.А.*, *Бруева Ж.А.*, *Болотов И.Н.*, *Макаров С.С.*, *Чудецкий А.И. Изменение сосновых фитоценозов в процессе первичной сукцессии 305

Данилов Д.А.*, *Андреев А.В. Плотность древесины ели на лесных и постагрогенных землях Ленинградской области 322

Ермакова М.В. Влияние дополнений на формирование структуры лесных культур сосны в Курганской области 335

Корчагов С.А.*, *Конюшатов О.А.*, *Беляков Д.В.*, *Андронова М.М. Верификация результатов флористических исследований в ключевых биотопах 350

Гибадуллин Н.Ф.*, *Дурова А.С.*, *Семенова Е.И.*, *Гайфуллин И.И. Изучение структуры и состава микробных сообществ, формирующихся в процессе зарастания лесом бывших пахотных почв Республики Татарстан 363

Александрова Ю.В.*, *Лебедева О.П.*, *Бабич Н.А. Опыт клонального микроразмножения отборной формы голубики узколистной *Vaccinium angustifolium* Aiton 383

Ветчинникова Л.В.*, *Титов А.Ф.*, *Сафронычева Е.Д.*, *Жигунов А.В. Особенности роста сеянцев карельской березы, полученных в результате свободного опыления, и выявление среди них носителей признака «узорчатая древесина» с помощью молекулярного маркера BpCW1 397

Ковязин В.Ф.*, *Балтыжакова Т.И.*, *Романчиков А.Ю.*, *Суранов Н.А. Оценка распространения борщевика сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) средствами автоматизированной классификации по данным аэрофотосъемки 414

3. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ЛЕСОЗАГОТОВОК

Баканач Е.А.*, *Угрюмов С.А. Анализ работы многооперационных лесных машин в условиях Северо-Западного Федерального округа 436

Кацадзе В.А.*, *Свойкин Ф.В.*, *Гринкевич В.А.*, *Россихин К.В. Экспериментальные исследования по определению давления на грунт колесного сортиментоподборщика ТРОМ 25 451

Эйвазов А.Ф.*, *Зубова О.В. Математическая модель оптимизации проектирования сети лесных автомобильных дорог с использованием данных дистанционного зондирования 468

Трубников В.В.*, *Марков В.А.*, *Трофимов А.В.*, *Хахина А.М.*, *Зверев И.А. Анализ антикоррозийных покрытий для несущих элементов лесных машин 480

Александров В.А.*, *Александров А.В. Вибронагруженность оператора валочно-пакетирующей машины ограниченной грузоподъёмности при технологических переездах 498

Малюков С.В.*, *Шавков М.В.*, *Бухтояров Л.Д.*, *Лысыч М.Н.*, *Петков А.Ф.*, *Попов М.А.*, *Черенков Д.С.*, *Болгов А.В. Определение тягового сопротивления лесопосадочной машины и качества посадки сеянцев в полевых условиях 509

4. ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ, ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЕРЕВОПЕРЕРАБОТКИ

Латышевич И.А.*, *Гапанькова Е.И.*, *Козлов Н.Г. Влияние типа препрега на эксплуатационные показатели лыж 524

5. ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ. БИОТЕХНОЛОГИЯ

Ковалева О.П.*, *Алексеев С.Р.*, *Петруничев О.В. Исследование влияния добавок поверхностно-активных веществ в варочный раствор на качество сульфатной лиственной целлюлозы 539

CONTENTS

Preface 5

1. CHRONICLE OF SCIENTIFIC LIFE

Lukianova L.V. The term «forest stand» in the historical development of Russian forest science terminology 6

2. FORESTRY

Natskiy A.M. Improvement of the personnel training system for fighting forest fires: a case study of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Ugra 21

Usoltsev V.A., Chasovskikh V.P. Multicollinearity of variables in the Eurasian tree biomass database and generic allometry 38

Gibadullin N.F., Zaytsev D.A., Bacherikov I.V., Musin H.G., Mirsiyapov N.I., Galimullin A.F. Macrostructural changes in xylem by trunk height in natural and artificial pine forests of the Republic of Tatarstan 61

Bayramova V., Melnichuk I., Prikhodko E., Demchuk A., Selikhovkin A. The impact of pest and pathogen invasions on the compositional integrity of landscape architecture objects in St. Petersburg 76

Bogdanov G.A., Osmanova G.O., Bedova P.V. Phytoindication assessment of forest communities of the State nature complex reserve of republican significance «Gornoye Zadelye» of the Republic of Mari El 97

Lezhnev D.V., Glazunov Yu.B., Korotkov S.A., Titovets A.V. Secondary successions after catastrophic disturbances in the pine stands of the near Moscow region 115

Osipenko A.E., Basheguro v K.A., Osipenko R.A., Zalesov S.V. Natural regeneration in the pine forests of the Novichikhinsky forest district in the Altai krai following regeneration felling 141

Tyukavina O.N., Surina E.A., Gogoleva L.G., Feklistov P.A. The light regime of the forests of the Arctic zone of the European North 159

Lebedev A.V., Demidov V.E., Osipov S.A. Assessment of changes in tree and shrub vegetation in the bison nursery of the Prioksko-Terrasny Nature Reserve 174

Pozharskaya O.D., Khomyakov Yu.V. Properties of Hydrogels and Environmental Factors Affecting Their Degradation Rate 198

Kapitalinin D.Yu., Tishchenko P.A., Sidorenkov V.M., Achikolova I.S., Astapov D.O., Ryabtsev O.V. Shchekalev R.V. Applying deep learning neural networks for automatic validation of forest management materials based on satellite imagery 213

Shibanov S.A.*, *Orlova L.V.*, *Neshataev V.Yu.*, *Golovankova A.S. Larch on Elagin Island (S.M. Kirov Central Park of Culture and Leisure, St. Petersburg) 234

Sergeeva A.S. The relationship between soil conditions and the number of spruce undergrowth in mature pine-spruce stands of the Gatchina district of the Leningrad region 250

Gavrilova O.I.*, *Gryazkin A.V.*, *Guryleva E.A.*, *Smirnov A.P. Digression of the roadside spruce forests of south Karelia under the influence of anthropogenic factors 262

Logunov D.V. Prospects for the introduction of various representatives of the genus larch (*Larix* Mill.) in the Nizhny Novgorod region 278

Pristova T.A.*, *Fedorkov A.L.*, *Novakovsky A.B. Aboveground Phytomass of Lodgepole Pine and Scots pine in Experimental Plantations of the Komi Republic 290

Feklistov P.A.*, *Brueva Zh.A.*, *Bolotov I.N.*, *Makarov S.S.*, *Chudetsky A.I. Changes in pine phytocenoses during primary succession 305

Danilov D.A.*, *Andreev A.V. Spruce wood density on forest and postagrogenic lands of the Leningrad region 322

Ermakova M.V. Influence of additional landings on the formation of the structure of pine forest cultures in the Kurgan region 335

Korchagov S.A.*, *Konyushatov O.A.*, *Belyakov D.V.*, *Andronova M.M. Verification of the results of floristic studies in key biotopes 350

Gibadullin N.F.*, *Durova A.S.*, *Semenova E.I.*, *Gaifullin I.I. Study of the structure and composition of microbial communities formed during the process of forest overgrowth of former arable soils in the Republic of Tatarstan 363

Aleksandrova I.V.*, *Lebedeva O.P.*, *Babich N.A. Experience in clonal micropropagation of the selected form of *Vaccinium angustifolium* Aiton 383

Vetchinnikova L.V.*, *Titov A.F.*, *Safronicheva E.D.*, *Zhigunov A.V. Growth patterns of curly birch seedlings produced through open pollination and identification of the individuals carrying the ‘figured grain’ trait using BpCW1 molecular marker 397

Kovyazin V.F.*, *Baltyzhakova T.I.*, *Romanchikov A.Yu.*, *Suranov N.A. Assessment of the distribution of Sosnowsky’s hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) habitats using automated classification based on aerial photography data 414

3. TECHNOLOGY AND EQUIPMENT OF LOGGING INDUSTRIES

Bakanach E.A.*, *Ugryumov S.A. Analysis of the operation of multi-operational forestry machines in the conditions of the North-Western Federal district 436

Katsadze V.A.*, *Svoykin F.V.*, *Grinkevich V.A.*, *Rossikhin K.V. Experimental Studies to Determine the Ground Pressure of the TROM 25 Wheeled Log Picker 451

Eyvazov A.F.*, *Zubova O.V. A mathematical model for optimizing the design of a forest highway network using remote sensing data 468

Trubnikov V.V.*, *Markov V.A.*, *Trofimov A.V.*, *Hahina A.M.*, *Zverev I.A. Analysis of anti-corrosion coatings for load-bearing elements of forestry machines 480

Aleksandrov V.A.*, *Aleksandrov A.V. Vibration load of the operator of a feller-buncher with limited lifting capacity during technological moves 498

Malyukov S.V.*, *Shavkov M.V.*, *Bukhtoyarov L.D.*, *Lysych M.N.*, *Petkov A.F.*, *Popov M.A.*, *Cherenkov D.S.*, *Bolgov A.V. Determination of traction resistance of forest planting machine and quality of seedling planting under field conditions 509

4. WOOD SCIENCE. MECHANICAL WOODWORKING INDUSTRY

Latyshevich I.A.*, *Hapankova E.I.*, *Kozlov N.G. Influence of prepreg type on skis performance 524

5. CHEMICAL TECHNOLOGY OF WOOD. BIO TECHNOLOGY

Kovaleva O.P. Alekseev S.R. Petrunichev O.V. Investigation of the effect of additives of surfactants in the cooking solution on the quality of sulfate hardwood cellulose 539

Научное издание

ИЗВЕСТИЯ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКОЙ АКАДЕМИИ

Выпуск 256

Издаются с 1886 года

Редактор В.Н. Добронравина

Компьютерная верстка Е.А. Корнуковой

Подписано в печать с оригинал-макета 21.11.2025. Выход в свет 26.12.2025. Формат 150*210. Печать цифровая. Уч.-изд. л. 35.0. Печ. л. 35,0. Тираж 500 экз. Заказ № 116 С 228 Свободная цена

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет
имени С.М. Кирова
Издательско-полиграфический отдел СПбГЛТУ
194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., 5, литер У