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 259

Издаются с 1886 года

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2026

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
А.В. Андронов, д-р техн. наук, доц., СПбГЛТУ,
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,
С.А. Корчагов, д-р с-х. наук, проф., СевНИИЛХ,
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. 258. Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2026. – 476 с. – ISBN 978-5-9239-1563-1, 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 2026 г. Изд. № 239
ISBN 978-5-9239-1563-1
ISSN-p: 2079-4304, ISSN-e: 2658-5871

© Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова (СПбГЛТУ), 2026

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 259

Published since 1886

SAINT PETERSBURG
2026

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
A.V. Andronov, 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,
S.A. Korchagov, DSc (Agriculture), Northern Research Institute of Forestry,
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. *Organization's website*: www.spbftu.ru
Fax: +7(812)670-93-90. *Serial's website*: izvestia.spbftu.ru
Tel.: +7(812)670-92-59. *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. 258. Saint-Petersburg.: SPbFTU, 2026. – 476 p. – ISBN 978-5-9239-1563-1, 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 2026 г. Izd. N 239
ISBN 978-5-9239-1563-1
ISSN-p: 2079-4304, ISSN-e: 2658-5871

© Saint Petersburg State Forest Technical University (SPbFTU), 2026

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. ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

УДК 630*182.21: 630*245:614.841.3

В.П. Захаров, С.А. Коротков

ПОТЕНЦИАЛ ЕСТЕСТВЕННОГО ВОЗОБНОВЛЕНИЯ ЛЕСА И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УСЛОВИЯХ ВОСТОЧНОГО ПОДМОСКОВЬЯ

Введение. Активно развивающийся Московский регион, где реализуется активное жилищное и промышленное строительство и ведётся развитие транспортной инфраструктуры, продолжает характеризоваться достаточно высоким уровнем лесистости. Данный показатель (около 43%) остаётся стабильным на протяжении десятилетий.

В результате воздействия экстремальной засухи и обусловленного ей роста очагов короеда-типографа и лесных пожаров, а также влияния штормовых ветров в последние годы леса столичной области подверглись серьёзной трансформации, что обуславливает повышенное внимание к процессам лесного возобновления и необходимость выработки оптимальных подходов к воспроизводству лесов.

Целью исследования стало изучение особенностей естественного возобновления леса на примере Восточного Подмосковья и оценка возможностей его использования для воспроизводства лесов.

Согласно современным представлениям, для эффективного восстановления лесов необходимо применение набора лесоводственных приёмов с целью формирования разнообразия насаждений, от одновозрастных чистых культур на разных стадиях развития до смешанных разновозрастных древостоев [Chavez, Macdonald, 2012]. Получающееся в результате видовое и возрастное разнообразие позволяет экосистемам адаптироваться к внешним воздействиям и снижает их зависимость от методов управления, которые в настоящее время используются для противодействия внешним воздействиям [Barbier et al., 2008; Greene et al., 2008; Kuehne, Puettmann, 2008; Puettmann, 2011].

Смена в насаждениях хвойных пород мягколиственными характерна для многих регионов России [Колданов, 1966; Грязькин, Смирнов, 2007;

Денисов и др., 2012; Кутявин и др., 2023; Isaev et al., 2004], в том числе и для Московской области. Согласно материалам действующего Лесного плана[1], берёзовые насаждения произрастают на 40,6% площади лесов, обеспечивая 36,8% от общего запаса древесины насаждений области.

Смена пород как экологический процесс была достаточно подробно описана российскими учёными-лесоводами [Ткаченко и др., 1939; Мелехов, 1939; Морозов, 1949; Побединский, 1973; Седых, 2009]. Это явление – основа процессов поддержания устойчивости лесных экосистем, способности их восстановления после нарушений различного масштаба и причин. По мнению А.В. Побединского [1973], разработка мероприятий, направленных на сокращение лесовосстановительного этапа развития лесных биогеоценозов, предотвращение нежелательной смены древесных пород, а также устранение возможностей возникновения на вырубках густого живого напочвенного покрова и подлеска являются важнейшими задачами лесоводственной науки и практики.

Отмечается, что смена хвойных пород мелколиственными приводит к снижению комплексной продуктивности лесов и является нежелательным процессом. Следовательно, с точки зрения приоритетного воспроизводства насаждений хвойных пород современная система управления лесами далеко не эффективна [Теринов и др., 2020; Shvarts et al., 2023]. В то же время опыт исследовательских и производственных работ в различных регионах России и мира говорит о том, что в определённых условиях, несмотря на свои недостатки, естественное возобновление леса имеет преимущества перед искусственным [Залесов и др., 2013b; Никонов, 2014; Корчагов и др., 2025; Hemery, 2008; Morimoto et al., 2017; Savchenkova et al., 2024].

Использование возможностей естественного лесовозобновления ряд авторов рассматривает в качестве одного из наиболее эффективных способов сохранения устойчивости лесов при рубках спелых и перестойных древостоев и сокращения смены пород в большинстве ландшафтов южной тайги и в значительном количестве ландшафтов зоны хвойно-широколиственных лесов [Никонов, 2014]. При этом создание лесных культур необходимо лишь там, где естественное возобновление не обеспечивает либо требуемых сроков, либо качественного состава проектируемых насаждений [Калиниченко и др., 1991; Бабич и др., 2013].

А.А. Вайс [2015] в аналитическом обзоре научных исследований в области рубок ухода за последнее пятилетие отмечал, что в практической

[1] Лесной план Московской области на 2019-2028 гг. (утвержден постановлением губернатора Московской области от 21 марта 2019 г. №116-ПГ). Кн. 1, 2.

сфере ведения лесного хозяйства не хватает современного опыта при проведении конкретных хозяйственных мероприятий. Данный вид работ достаточно подробно отработан в середине XX в. и продолжает применяться до настоящего времени практически без изменений.

Опираясь на теорию лесообразовательного процесса профессора Б.П. Колесникова [Колесников и др., 1973], Н.Н. Теринов с соавторами [2020] обращают внимание, что естественное восстановление исходных насаждений происходит через стадии коротко- и длительно-производных насаждений. За время развития насаждений с преобладанием берёзы и осины постепенно восстанавливаются структура и энергетический баланс, или «относительное динамическое равновесие биохимических циклов минеральных элементов».

Формирование производных мягколиственных насаждений после гибели и вырубки коренных насаждений можно рассматривать как положительное явление с точки зрения улучшения лесорастительных условий. Присутствие лиственных пород в составе древостоев приводит к ускорению разложения подстилки, формированию плодородных почвенных горизонтов и развитию почвенной биоты. Применительно к ельникам данную стадию нужно рассматривать как один из этапов их восстановления, а возможно и как механизм сохранения коренных темнохвойных насаждений.

При этом исследования показывают, что продолжительное выращивание хвойных монокультур приводит к обеднению почвы и, соответственно, к снижению бонитета насаждений. Авторы делают практический вывод о необходимости включения процесса смены пород в систему управления лесами, используя для улучшения экологической ситуации чередование биологических типов древесных эдификаторов по аналогии с сельскохозяйственным севооборотом [Ибрагимов и др., 2004].

Стоимость проведения комплекса уходов за лесными культурами (включая агроуходы, лесоводственные уходы, осветления и прочистки) в 2025 г. в среднем составляет около 140 тыс. руб./га, что почти вдвое выше нормативной стоимости самого искусственного лесовосстановления (посадки лесных культур сеянцами с открытой корневой системой)[2]. При этом сохранившийся после рубки подрост не только уменьшает затраты на лесовосстановление,

[2] Приказ Комитета лесного хозяйства Московской области от 15.01.2025 № 30П-42 «О внесении изменений в приказ Комитета лесного хозяйства Московской области от 23.12.2024 №30П-2872 «Об утверждении значений затрат на выполнение государственных работ, выполняемых Государственным автономным учреждением Московской области, подведомственным Комитету лесного хозяйства Московской области на 2025 год и на плановый период 2026 и 2027 годов».

проведение агротехнических и лесоводственных уходов и рубок уходов молодняках, но также на 20–30 лет сокращает период воспроизводства леса [Побединский, 1973].

В то же время использование одних только процессов естественного восстановления хоть и сокращает затраты, но обеспечивает меньший контроль над будущим составом древостоя. Несмотря на то, что видовой состав естественного возобновления может не соответствовать нормативным показателям для конкретного участка, формирующиеся за счет процессов самоорганизации нарушенных экосистем лесные насаждения могут отличаться устойчивостью и адаптивностью за счет новых комбинаций видов и большего, чем обычно наблюдается в искусственно восстановленных древостоях, видового разнообразия [Романов и др., 2007; Fischer et al., 2002]. Комбинацией естественного и искусственного восстановления нарушенных или вырубленных участков является комбинированное лесовосстановление, которое может включать посадку с низкой густотой в сочетании с естественным возобновлением на оставшейся площади [Saha et al., 2013]. Такой подход обеспечивает определенную долю желаемых пород в будущем древостое при сохранении естественных процессов и новых комбинаций пород при сниженных затратах по сравнению с обычными посадками. Кроме того, потенциально большее разнообразие пород деревьев, обусловленное искусственным и естественным возобновлением, может привести к повышению продуктивности [Bauhus et al., 2012].

Таким образом, большинство современных исследователей склоняются к мысли, что естественное возобновление необходимо применять осознанно, в тех конкретных условиях, когда оно даст больший ожидаемый эффект.

Одним из практических направлений использования возможностей естественного возобновления быстрорастущих лиственных пород может стать формирование устойчивых к природным пожарам насаждений. Так, для создания системы противопожарного устройства вокруг населенных пунктов и примыкающих к ним насаждений 1 класса природной пожарной опасности предлагают отказаться от противопожарных разрывов, заменив их противопожарными заслонами, которые представляют собой комбинацию минерализованных полос (в том числе в полосе отвода автомобильных и железных дорог) с буферной 150 м зоной, где создаются лиственные опушки из берёзы [Залесов и др., 2013а].

Данные мероприятия также предусматриваются действующими нормативами противопожарного обустройства лесов[3].

[3] Приказ Рослесхоза от 27.04.2012 г. №174 «Об утверждении Нормативов противопожарного обустройства лесов».

Благодаря наличию зелёной листвы с влажностью на 40–60% выше влажности хвои [Чурило, 2017] примесь лиственных пород препятствует распространению верховых пожаров и тем самым снижает повреждаемость насаждений.

Поскольку сосновые и еловые культуры обладают чрезвычайно высокой пожарной опасностью, их рекомендуется разделять на отдельные участки (блоки) и окаймлять по периметру полосами, сформированными из наиболее пожароустойчивых лиственных древесных пород. Такие опушки формируются, в частности, путем проведения рубок ухода за лесом для формирования устойчивых насаждений с долей лиственных пород в составе древостоя не менее семи единиц [Усеня и др., 2009].

Сокращение площадей хвойных лесных культур при таком походе нельзя считать проблемой. По мнению М.Д. Евдокименко и В.В. Иванова [2017], в дилемме с выбором приоритетной цели ухода за насаждениями (продуктивность или пожароустойчивость), при ограниченных возможностях и ресурсах лесного хозяйства, решающим оказывается подход сокращения ущерба от огня. В условиях, когда успешно возобновляются лиственные породы, это обстоятельство можно использовать при формировании противопожарных полос на лесосеках в процессе последующего ухода за молодняками.

Важнейшим мероприятием, определяющим состав будущих насаждений, являются рубки ухода, которые при своевременном их проведении позволяют не только улучшить основные таксационные показатели выращиваемых древостоев, снизить пожарную опасность и повысить пожароустойчивость хвойных насаждений, но и предотвратить нежелательную смену пород без проведения дорогостоящих работ по искусственному лесовосстановлению [Залесов и др., 2013b].

К сожалению, действующие нормативные документы не в полной мере соответствуют задачам проведения рубок ухода в лиственных и лиственно-хвойных насаждениях, а разрабатываемые в различные годы рекомендации не имеют практической отработки [Теринов и др., 2020].

Материалы и методика исследования. Особенности естественного лесовосстановления рассмотрены на примере Восточного Подмосковья, традиционно рассматриваемого в границах Мещёрской низменности [Рысин, 2012], естественными границами которой в пределах Московской области являются реки Клязьма, Москва и Ока, а северо-западная граница проходит по условной линии Щёлково-Черноголовка-Покров. Рассматриваемая территория характеризуется особым геологическим строением, почвенно-грунтовыми условиями, растительностью, а также характером хозяйственного освоения и включает Ногинское, Орехово-Зуевское, Шатурское, Егорьевское лесничества, северо-

восточную часть Виноградовского лесничества, а также отдельные части Московского учебно-опытного, Подольского, Ступинского и Луховицкого лесничеств.

Для территории Мещёрской низменной равнины характерны леса с преобладанием сосны (*Pinus sylvestris* L.) и ели (*Picea abies* (L.) H.Karst.), в том числе смешанные сосново-еловые, с хорошо развитым кустарничковым ярусом черники (*Vaccinium myrtillus* L.): вейниково-черничные, черничнозеленомошные, орляково-вейниково-черничные, в сочетании с сосновыми чернично-зеленомошными, лишайниково-зеленомошными и другими заболоченными лесами и болотами [Огуреева и др., 1996].

Поскольку одной из основных лесоводственных классификационных единиц, объединяющих лесные земли по сходству почвенных и гидрологических факторов, являются типы лесорастительных условий [Ханина, 2019], проанализировано распределение лесных насаждений по данным параметрам (табл. 1).

Таблица 1

Распределение площади лесов Восточного Подмосковья по типам лесорастительных условий, %

Distribution of the forest area of the Eastern Moscow region by types of forest conditions, %

	A	B	C	D	Гигротопы
0	–	–	–	–	Очень сухие
1	0,07	–	–	–	Сухие
2	2,78	**18,87**	3,72	0,04	Свежие
3	1,16	**46,36**	**13,26**	0,04	Влажные
4	0,54	5,91	5,79	–	Сырые
5	0,48	0,38	0,60	–	Болота
	Боры	Простые субори	Сложные субори	Дубравы	Трофотопы

Примечание: Жирным шрифтом выделены наиболее представленные типы лесорастительных условий

Насаждения, соответствующие сухим и свежим борам (A_{2-3}), представлены преимущественно чистыми сосновыми насаждениями, иногда с примесью берёзы (*Betula pendula* Roth). Успешное естественное возобновление сосны под пологом древостоя отмечено в низкополнотных насаждениях, а также по полянам, прогалинам и в «окнах».

Участки с избыточным увлажнением, характерные для центральной части Мещёры, представлены простыми (B_4) и сложными (C_4) сырыми суборями, а также незначительной долей ряда болот (A_5, B_5 и C_5). В зависимости от географического положения в рельефе среди насаждений преобладают приручьевые черноольшаники и березняки (с доминированием *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. и *Betula pubescens* Ehrh. соответственно).

Наиболее оптимальными для естественного возобновления большинства произрастающих древесных пород на данной территории являются типы лесорастительных условий, которые соответствуют простым (B_2–B_3) и сложным (C_2–C_3) суборям. Они преимущественно представлены мозаикой зеленомошных типов леса и участков различной степени нарушенности и стадий восстановления после катастрофических нарушений.

На временных пробных площадях, заложенных на участках, восстанавливающихся после нарушений различной давности, связанных с лесными пожарами и вспышкой численности короеда типографа (*Ips typographus* Linnaeus), проведён учёт лесного возобновления (рис. 1, табл. 2).

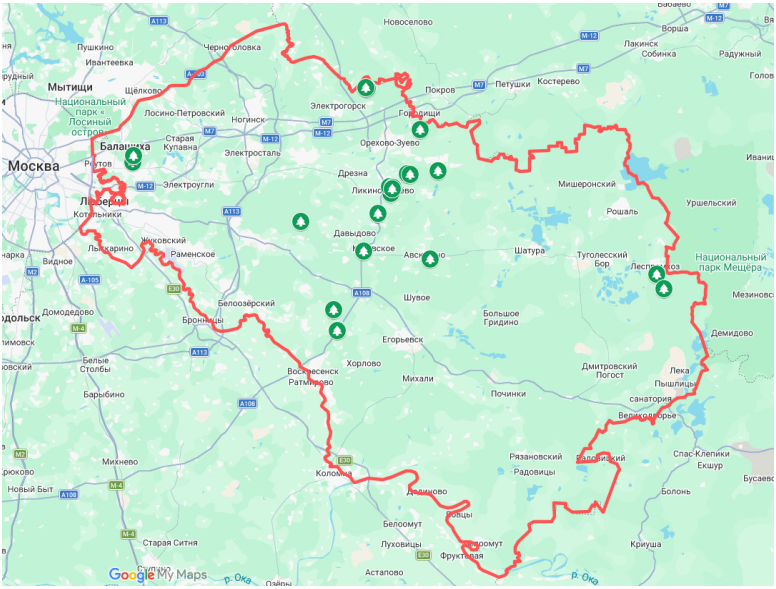


Рис. 1. Границы Мещёры в пределах Московской области и размещение участков исследования

Fig. 1. The boundaries of Meschera within the Moscow region and the location of research sites

Таблица 2

Характеристика пробных площадей

Characteristics of sample plots

Шифр пробной площади	Возраст на момент обследования, лет	Тип лесорастительных условий	Хозяйственные мероприятия
Ша-Мещ-47-1	3	B_3	
ОЗ-Бел-10-1	5	B_3	ЛК
ОЗ-Бел-75-1	5	B_3	
ОЗ-Бел-61-1	5	B_2	
ОЗ-Бел-54-1	5	B_2	
ОЗ-Бел-75-2	6	B_3	
ОЗ-Бел-74-1	6	B_3	
Ша-Мещ-4-1	6	B_3	
Но-Сал-52-1	7	C_3	
ОЗ-Губ-9-1	7	C_2	
ОЗ-Кур-31-2	7	B_3	ПРЧ 2024 г.
ОЗ-Кур-31-1	7	B_2	ПРЧ 2024 г.
ОЗ-Лик-60-1	8	B_2	ВСР 2017 г.
ОЗ-Лик-60-2	8	B_2	ВСР 2017 г.
Но-Сал-31-1	8	C_3	
Но-Сал-32-1	8	C_3	
ОЗ-Кур-44-1	9	A_2	ЛК
Ви-Вин-70-1	9	B_2	ЛК
Ви-Вин-70-2	9	B_2	ЛК
ОЗ-Гор-52-1	10	B_2	
Ша-Мещ-20-1	10	B_2	
ОЗ-Губ-1-1	12	B_3	ЛК
ОЗ-Губ-2-1	12	B_3	ЛК
ОЗ-Лик-25-1	12	B_3	
ОЗ-Губ-10-1	13	B_2	ЛК
ОЗ-Губ-8-1	13	B_3	коридор ПРХ
ОЗ-Губ-1-2	15	B_3	ЛК
ОЗ-Губ-3-1	15	B_3	

Примечания: ЛК – лесные культуры, ПРЧ – рубка прочистки, ПРХ – проходная рубка, ВСР – выборочная санитарная рубка

Результаты исследования. На пробных площадях, заложенных в насаждениях различного возраста, соответствующих типам лесорастительных условий B_2-B_3 и развивающихся без влияния лесохозяйственных мероприятий, отмечена значительная густота естественного возобновления основных лесообразующих пород. Для наиболее сухих вариантов суборей на песчаных почвах после пожаров в составе возобновления преобладает сосна (*Pinus sylvestris* L.). В прочих условиях, вплоть до влажных типов лесорастительных условий, преобладает берёза (*Betula pendula* Roth, B. *pubescens* Ehrh.), на втором месте по представленности находится осина (*Populus tremula* L.) (рис. 2).

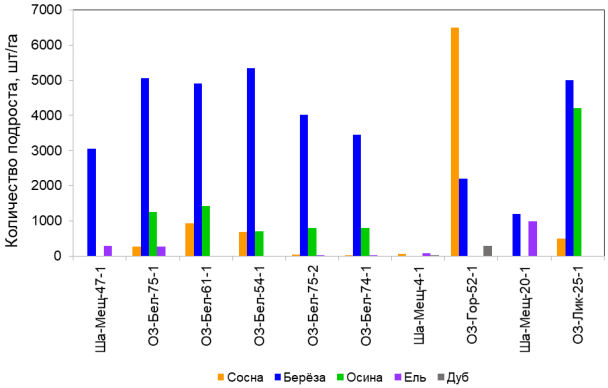


Рис. 2. Возобновление основных древесных пород в условиях простых суборей (B_2–B_3) без хозяйственных мероприятий

Fig. 2. Regeneration of main tree species in subor conditions (B_2–B_3) without management measures

На участках лесных культур и связанных с ними мероприятий – агротехнических и лесоводственных уходов, рубок осветления и прочистки – даже при высокой *сохранности* деревьев главной породы (на всех пробных площадях это сосна), примесь естественного возобновления восполняет гибель отдельных деревьев и способствует формированию смешанных насаждений (рис. 3).

С увеличением почвенного плодородия на пробных площадях растет разнообразие древесных пород в составе естественного возобновления: значительно чаще встречаются ель (*Picea abies* (L.) H.Karst.), дуб (*Quercus robur* L.) и примесь различных пород, объединенных на диаграммах в категорию

«Прочие» (Проч.) (липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill.), клён остролистный (*Acer platanoides* L.), ольха чёрная (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.), ива козья (*Salix caprea* L.)) (рис. 4). Берёза и в этих условиях занимает лидирующее положение, за исключением пробной площади, заложенной на месте распадающегося естественным путём старого ельника, поражённого короедом-типографом (ОЗ-Губ-9-1), где не произошло резкого изменения лесной среды.

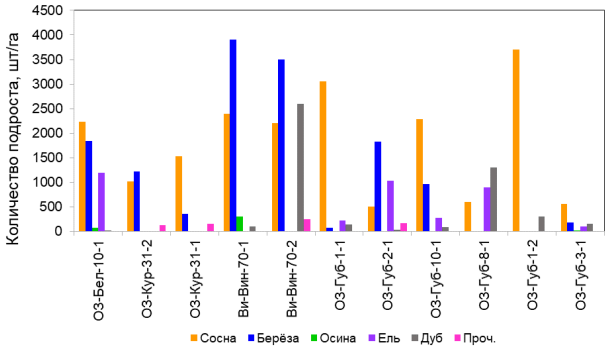


Рис. 3. Возобновление основных древесных пород в условиях простых суборей (B_2–B_3) на участках лесных культур сосны

Fig. 3. Regeneration of main tree species in subor conditions (B_2–B_3) in areas of pine forest plantations

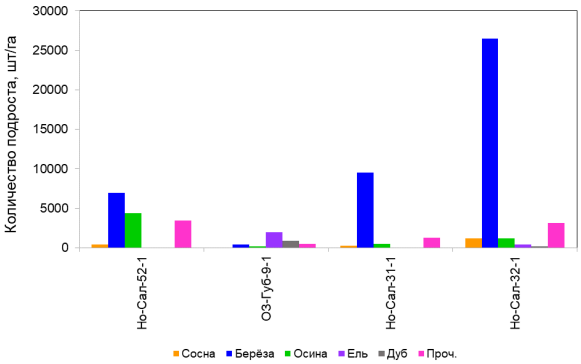


Рис. 4. Возобновление основных древесных пород в условиях сложных суборей без хозяйственных мероприятий

Fig. 4. Regeneration of main tree species in mixed subor conditions without management measures

Отдельно были рассмотрены участки, где после масштабных пожаров и гибели насаждений в качестве мер содействия естественному возобновлению была произведена напашка плужных борозд (табл. 3).

Таблица 3

Результаты естественного возобновления на участках Белавинского участкового лесничества Орехово-Зуевского лесничества Московской области с мерами и без мер содействия

Results of natural forest regeneration in areas of the Belavinsky district forestry of the Orekhovo-Zuevsky forestry of the Moscow region with and without measures of assistance

№ пп	Год пожара/ год рубки	До пожара		Меро-приятия*	На момент обследования			
		Состав	Тип леса, ТЛУ		Состав	Тип леса, ТЛУ	По-роды	Кол-во шт./га
1	2010 /2011	5С4Е1Б	СЧРМ $В_3$	ЕВ	8Б2Ос+С+Е	СЧРМ $В_3$	Б Ос С Е	5056 1257 275 266
2	2010/ 2012	9С1Е+Б	ССЛМ $В_2$	СЕВ	5Б3Ос2С	СЧРМ $В_3$	Б Ос С	4898 1433 941
3	2010/ 2013	8С1Е1Б	ССЛМ $В_2$	ЕВ	8Б1С1Ос	ССЛМ $В_2$	Б С Ос	5337 687 712
4	2010/ 2012	5С4Е1Б	СЧРМ $В_3$	СЕВ	8Б2Ос+С+Е	СЧРМ $В_3$	Б Ос С Е	4025 805 55 30
5	2010/ 2011	6С3Е1Б	СЧРМ $В_3$	ЕВ	8Б2Ос+С+Е	СЧРМ $В_3$	Б Ос С Е	3458 799 33 25

Примечание: ЕВ – естественное возобновление, СЕВ – содействие естественному возобновлению; СЧРМ – сосняки чернично-мелкотравные, ССЛМ – сосняки сложно-мелкотравные

Обсуждение. Преобладающими направлениями естественного возобновления основных древесных пород после различных нарушений на рассматриваемой территории являются:

• зарастание вырубок и гарей, а также участков погибших и повреждённых лесных культур берёзой, осиной и ивой с последующим развитием под лиственным пологом самосева ели;

• развитие самосева ели из состава предварительного возобновления в распадающихся/погибших еловых насаждениях, под пологом перестойных мягколиственных насаждений, а также под пологом хвойных и хвойно-лиственных насаждений с преобладанием сосны;

• развитие самосева сосны вблизи стен леса, после выборочных рубок, а также на участках с лёгкими сухими почвами и на микроповышениях.

В соответствии с действующими Правилами лесовосстановления[4] одной из основ воспроизводства лесов являются природные процессы и осуществление мер содействия естественному лесовосстановлению, включающих сохранение жизнеспособного укоренившегося подроста и молодняка основных лесных древесных пород при проведении рубок лесных насаждений, уход за подростом основных лесных древесных пород, минерализацию поверхности почвы, а также иные мероприятия. В защитных лесах, к которым относятся все леса Московской области, лесовосстановление должно обеспечивать формирование лесных насаждений, соответствующих целевому назначению категорий защитных лесов и особо защитных участков лесов.

Для реализации комплекса лесохозяйственных мероприятий в насаждениях, поврежденных пожарами, вредными организмами, погодными и другими факторами, сформулированы основные положения рекомендаций по применению естественного лесовосстановления для воспроизводства лесов в условиях Подмосковной Мещёры.

Согласно данным рекомендациям и действующей нормативной базе, при определении способа лесовосстановления на участке производится обследование участков земель, в ходе которого определяются:

• наличие подроста и молодняка основных лесных древесных пород;

• особенности лесорастительных условий участка;

• наличие источников семян на примыкающих участках;

• наличие или отсутствие по границе участка, где планируется лесовосстановление, безлесных территорий, покрытых травянистой растительностью, полос отвода автомобильных или железных дорог, просек линий электропередач, газопроводов и иных линейных объектов, участков молодняков

[4] Приказ Минприроды России от 29.12.2021 N 1024 (ред. от 03.08.2023) «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».

хвойных лесных культур, других территорий с повышенной пожарной опасностью.

Естественное лесовосстановление проектируется:

- на участках с наличием жизнеспособного подроста и молодняка хвойных и твердолиственных древесных пород не менее количества, определенного табл. 2 прил. 17 к Правилам лесовосстановления;
- на вырубках, гарях и их частях с наличием постоянного или временного переувлажнения;
- на полосах шириной не менее 20 м по границам участков хвойных лесных культур с безлесными территориями, покрытыми травянистой растительностью, полосами отвода автомобильных или железных дорог, просеками линий электропередач, газопроводов и иных линейных объектов, участками молодняков хвойных лесных культур и другими территориями с повышенной пожарной опасностью в целях формирования пожароустойчивых опушек из лиственных пород деревьев или с преобладанием лиственных пород;
- на участках, примыкающих к территориям массового посещения гражданами;
- на особо охраняемых природных территориях;
- на отдаленных участках, где вследствие транспортной труднодоступности нет возможности обеспечения своевременных уходов за создаваемыми лесными культурами.

Полученные в ходе исследования данные о результатах проведения мероприятий по содействию естественному возобновлению говорят о том, что за счёт напашки борозд двухотвальным плугом не происходит увеличения числа хвойных пород в составе молодняков.

В связи с этим в рекомендациях предлагается в целях содействия естественному лесовосстановлению осуществлять комплекс мероприятий, предусмотренных действующей нормативной базой воспроизводства лесов:

- сохранение жизнеспособного укоренившегося подроста и молодняка основных лесных древесных пород при проведении рубок лесных насаждений;
- уход за подростом (молодняком) основных лесных древесных пород на площадях, не занятых лесными насаждениями (оправка подроста, окашивание подроста, изреживание подроста);
- оставление семенных деревьев, куртин и групп из деревьев лесных древесных пород, количество и схема размещения которых указываются в технологической карте лесосечных работ;
- иные мероприятия, указанные в лесохозяйственном регламенте лесничества.

Как было отмечено выше, основу состава молодых древостоев, формирующихся на участках естественного возобновления, а также полностью или частично погибших лесных культур составляет берёза, которая в условиях защитных лесов рассматривается в качестве одной из целевых пород, отвечающей их назначению [Захаров и др., 2025; Лебедев и др., 2026].

В насаждениях, формирующихся в ходе естественных процессов, предлагается в обязательном порядке проводить мероприятия по уходу за лесами, направленные на сохранение и восстановление средообразующих, водоохранных, защитных, санитарно-гигиенических, оздоровительных и полезных функций лесов.

Требования к молоднякам основных лесообразующих пород, площади которых подлежат отнесению к землям, на которых расположены леса, указаны в табл. 1 прил. 17 к Правилам лесовосстановления.

Рубки, проводимые в целях ухода за лесными насаждениями, должны осуществляться для достижения следующих результатов:

- улучшения возрастной структуры и породного состава лесных насаждений;
- повышения качества и устойчивости лесных насаждений;
- сохранения и усиления защитных, водоохранных, санитарно-гигиенических свойств лесных насаждений.

Нормативы рубок, проводимых в целях ухода за лесными насаждениями в берёзовых (чистых или с примесью других пород) насаждениях, как и в хвойных, определяются в соответствии с Приложением №2 к Правилам ухода за лесами[5]. В зависимости от исходного состава, лесорастительных условий и типов леса в результате рубок ухода достигаются целевой состав древостоя, включающий до 2–3 единиц хвойных пород, и, при возможности, формирование 2 яруса или яруса подроста из ели.

Для лесных участков, в том числе участков хвойных лесных культур, где в ходе обследования выявлено присутствие самосева дуба и других широколиственных пород, проводится уход за самосевом дуба, липы, вяза, клёна.

Применение естественного способа лесовосстановления должно планироваться на этапе отвода лесосек[6], в том числе с оформлением в особые лесосеки или их части участков, где не планируется создание лесных культур, а также выделением семенных групп, куртин и полос.

[5] Приказ Минприроды России от 09.04.2026 N 200 «Об утверждении Правил ухода за лесами» (Зарегистрирован 02.06.2026 № 86842).

[6] Порядок отвода и таксации лесосек (утверждён приказом Минприроды России от 17 октября 2022 г. №688).

Заключение. Проведённые работы показали, что в связи с развитием экологических знаний и расширением представлений о разнообразных природных механизмах, обеспечивающих устойчивость и восстановление нарушенных лесов, а также с учётом социально-экологических особенностей территории в настоящее время целесообразно наряду с интенсивными технологиями воспроизводства рассматривать также и возможности естественного лесовосстановления. Для такого региона, как Московская область, отличающегося значительной численностью населения, активно использующего леса, и преобладанием экосистемных функций лесов над ресурсными, актуально:

- использование естественного возобновления на участках, где в силу природных и экономических причин искусственное лесовосстановление сопряжено с чрезмерными затратами (например, отдалённые участки ограниченной транспортной доступности, в том числе на переувлажнённых землях);
- отказ от искусственного лесовосстановления на участках, где вмешательство нецелесообразно по экологическим и социальным причинам, в том числе для создания малогоримых защитных кулис;
- применение комбинированного лесовосстановления, использующего потенциал естественных процессов, в том числе для формирования смешанных насаждений.

Эти подходы позволят сконцентрировать ресурсы лесного хозяйства на участках лесных культур, требующих интенсивного ухода.

Предлагаемые рекомендации включают цели, задачи и нормативы мероприятий по естественному лесовосстановлению, переформированию мягколиственных насаждений в лиственно-хвойные и хвойно-лиственные.

Использование данных рекомендаций возможно после их опытно-производственной апробации и включения соответствующих дополнений в Лесной план Московской области и лесохозяйственные регламенты лесничеств.

Учитывая, что действующая нормативно-правовая база лесного хозяйства не в полной мере обеспечивает выполнение сформулированных выше задач, для полноценного внедрения рекомендаций в производственную практику потребуется внесение изменений в документы, регламентирующие лесовосстановление и уход за лесами, а также устанавливающие критерии эффективности воспроизводства лесов.

Вклад авторов. Оба автора внесли равный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Бабич Н.А., *Корчагов С.А.*, *Конюшатов О.А.*, *Стребков Н.Н.*, *Лупанова И.Н.* Актуальные проблемы лесовосстановления на Европейском Севере России в рамках перехода к интенсивной модели ведения лесного хозяйства // ИВУЗ. Лесной журнал. 2013. №2 (332). С. 74–83.

Вайс А.А. Современные исследования в области рубок ухода // Исследования в области естественных наук. 2015. №6. URL: https://science.snauka.ru/2015/06/10202 (дата обращения: 17.01.2025).

Грязькин А.В., *Смирнов А.П.* Особенности возобновительного процесса на сплошной вырубке большой площади с выраженным мезорельефом // Лесопользование и гидролесомелиорация: мат. Всерос. симпозиума. СПб.-Вологда, 2007. Ч. 1. С. 96–101.

Денисов С.А., *Калинин К.К.*, *Бессчетнов В.П.*, *Демичева Н.В.*, *Батухтина Т.С.*, *Самоделкина В.В.* Проблемы воспроизводства сосновых лесов Среднего Поволжья // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2012. №1 (14). С. 12–23.

Евдокименко М.Д., *Иванов В.В.* Особенности противопожарного обустройства в лесах Прибайкалья // Сибирский лесной журнал. 2017. №5. С. 63–75.

Залесов С.В., *Годовалов Г.А.*, *Кректунов А.А.*, *Платонов Е.Ю.* Защита населенных пунктов от природных пожаров //Аграрный вестник Урала. 2013a. №2 (108). С. 34–36.

Залесов С.В., *Луганский Н.А.*, *Бережнов В.А.*, *Залесова Е.С.* Рубки ухода в производных мягколиственных молодняках как способ формирования сосняков на южном Урале // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2013b. №4 (28). С. 118–121.

Захаров В.П., *Калашникова Е.Н.*, *Коротков С.А.* Динамика лесных ресурсов центральной части Русской равнины // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: мат. XXIII межд. науч.-тех. конф. Вологда, 2025. С. 17–20.

Ибрагимов А.К., *Подольский А.В.*, *Ряполов С.Ф.*, *Лебедев Е.В.* Экологическая роль феномена «смены пород» и антропогенные смены типов леса //Актуальные проблемы лесного комплекса. 2004. №9. С. 104–108.

Калиниченко Н.П., *Писаренко А.И.*, *Смирнов Н.А.* Лесовосстановление на вырубках. М.: Экология, 1991. 381 с.

Колданов В.Я. Смена пород и лесовосстановление. М.; Л., 1966. 171 с.

Колесников Б.П., *Зубарева Р.С.*, *Смолоногов Е.П.* Лесорастительные условия и типы лесов Свердловской области. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1973. 275 с.

Корчагов С.А., *Сурина Е.А.*, *Конюшатов О.А.*, *Минин Н.С.*, *Гоголева Л.Г.* Лесоводственная оценка комплексных рубок в лесах Вологодской области // ИВУЗ. Лесной журнал. 2025. №1. С. 71–82.

Кутявин И.Н., *Манов А.В.*, *Осипов А.Ф.*, *Бобкова К.С.* Долговременная динамика состава, строения и состояния древостоев северотаежных сосняков на Европейском Северо-Востоке России // Сибирский лесной журнал. 2023. №2. С. 17–25.

Лебедев А.В, *Захаров В.П.*, *Коротков С.А.* Изменения основных таксационных характеристик лесного фонда Подмосковной Мещеры в первой четверти XXI века // Лесотехнический журнал. 2026. Т. 16, №1 (61). С. 52–68. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2026.1/4.

Мелехов И.С. Лесоводство. Вып. 1. Введение в лесоводство: пособие для студентов. Архангельск: АЛТИ, 1939. 36 с.

Морозов Г.Ф. Учение о лесе. М.: Гослесбумиздат, 1949. 455 с.

Никонов М.В. Особенности смены состава древостоев в условиях Новгородской области // Development of species and processes of their life support through the prism of natural evolution and expediency: peer-reviewed materials digest (collective monograph) published following the results of the LXXVIII International Research and Practice Conference and I stage of the Championship in Medicine and Pharmaceutics, Biology, Veterinary Medicine and Agriculture. L., 2014. С. 13–15.

Огуреева Г.Н., *Микляева И.М.*, *Суслова Е.Г.*, *Швергунова Л.В.* Среднемасштабное картографирование растительного покрова Московской области на эколого-динамической основе // Геоботаническое картографирование. 1996. №1994–1995. С. 3–15.

Побединский А.В. Рубки и возобновление в таежных лесах СССР. М.: Лесная промышленность, 1973. 200 с.

Романов Е.М., *Еремин Н.В.*, *Нуреева Т.В.* Состояние и проблемы воспроизводства лесов России // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2007. №1. С. 5–14.

Рысин Л.П. Леса Подмосковья. М.: КМК, 2012. 255 с.

Седых В.Н. Лесообразовательный процесс. М.: Наука, 2009. 163 с.

Теринов Н.Н., *Андреева Е.М.*, *Залесов С.В.*, *Луганский Н.А.*, *Магасумова А.Г.* Восстановление еловых лесов: теория, отечественный опыт и методы решения // ИВУЗ. Лесной журнал. 2020. №3 (375). С. 9–23. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-9-23.

Ткаченко М.Е., *Асосков А.И.*, *Синев В.Н.* Общее лесоводство. Л.: Гослестехиздат, 1939. 746 с.

Усеня В.В., *Каткова Е.Н.*, *Мыслейко И.Г.* Совершенствование противопожарного устройства лесов Беларуси // Лесное и охотничье хозяйство. 2009. №3. С. 24–27.

Ханина Л.Г. Классификация типов лесорастительных условий по индикаторным видам Воробьева-Погребняка: база данных и опыт анализа лесотаксационных данных // Вопросы лесной науки. 2019. Т. 2, №4. С. 1–30. DOI: 10.31509/2658-607X-2019-2-4-1-28.

Чурило Е.В. Лесоводственно-экономические аспекты формирования пожароустойчивых лесных насаждений //Труды БГТУ. Сер. 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2017. №2 (198). С. 122–127.

Barbier S., *Gosselin F.*, *Balandier P.* Influence of tree species on understory vegetation diversity and mechanisms involved – A critical review for temperate and boreal forests // For. Ecol. Manag. 2008. Vol. 254, iss. 1. P. 1–15. DOI: 10.1016/j.foreco.2007.09.038.

Bauhus J., *Schemerbeck J.*, *van der Meer P.*, *Kanninen M.* Silvicultural Options to Enhance and Use Forest Plantation Biodiversity // Ecosystem Goods and Services from Plantation Forests. L., 2012. P. 96–139.

Chavez V., *Macdonald S.E.* Partitioning vascular understory diversity in mixedwood boreal forests: The importance of mixed canopies for diversity conservation // For. Ecol. Manag. 2012. Vol. 271. P. 19–26. DOI: 10.1016/j.foreco.2011.12.038.

Fischer A., *Lindner M.*, *Abs C.*, *Lasch P.* Vegetation dynamics in central European forest ecosystems (near-natural as well as managed) after storm events // Folia Geobot. 2002. Vol. 37. P. 17–32. DOI: 10.1007/BF02803188.

Greene D.F., *Zasada J.C.*, *Sirois L.*, *Kneeshaw D.*, *Morin H.*, *Charron I.*, *Si Mard M.J.* A review of the regeneration dynamics of North American boreal forest tree species // Can. J. For. Res. 1999. Vol. 29. P. 824–839. DOI: 10.1139/x98-112.

Hemery G. Forest management and silvicultural responses to projected climate change impacts on European broadleaved trees and forests // Int. For. Rev. 2008. Vol. 10, iss. 4. P. 591–607. DOI: 10.1505/ifor.10.4.591.

Isaev A.S., *Bartalev S.A.*, *Loupian E.*, *Lukina N.V.* Earth observations from satellites as a unique instrument to monitor Russia's forests // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2014. Vol. 84. P. 413–419. DOI: 10.1134/S1019331614060094.

Kuehne C., *Puettmann K.J.* Natural regeneration in thinned Douglas-fir stands in western Oregon // J. Sustain. For. 2008. Vol. 27. P. 246–274. DOI: 10.1080/10549810802256221.

Morimoto M., *Juday G.*, *Young B.* Clearcutting and Site Preparation, but Not Planting, Promoted Early Tree Regeneration in Boreal Alaska // Forests. 2017. Vol. 8. Art. no. 12. DOI: 10.3390/f8010012.

Puettmann K. J. Silvicultural challenges and options in the context of global change: "Simple" fixes and opportunities for new management approaches // Journal of Forestry. 2011. Vol. 109, iss. 6. P. 321-331. DOI: 10.1093/jof/109.6.321.

Saha S., *Kuehne C.*, *Bauhu J.* Tree Species Richness and Stand Productivity in Low-Density Cluster Plantings with Oaks (*Quercus robur* L. and *Q. petraea* (Mattuschka) Liebl.) // Forests. 2013. Vol. 4. P. 650-665. DOI: 10.3390/f4030650.

Savchenkova V.A., *Vasilyev S.B.*, *Nikitin V.F.* Features of Restoration of Coniferous-Broad-Leaved Forests // Russian Forestry Journal. 2024. No. 6. P. 133–146. DOI: 10.37482/0536-1036-2024-6-133-146.

Shvarts E.A., *Karpachevskiy M.L*., *Shmatkov N.M*., *Baybar A.S.* Reforming Forest Policies and Management in Russia: Problems and Challenges // Forests. 2023. Vol. 14. Art. no. 1524. DOI: 10.3390/f14081524.

References

Babich N. A., *Korchagov S. A*., *Konyushatov O. A*., *Strebkov N. N*., *Lupanova I. N.* Actual problems of reforestation in the European North of Russia as part of the transition to an intensive model of forestry. *Russian Forestry Journal*, 2013, no. 2 (332), pp. 74–83. (In Russ.)

Barbier S., *Gosselin F*., *Balandier P.* Influence of tree species on understory vegetation diversity and mechanisms involved – A critical review for temperate and boreal forests. *For. Ecol. Manag*., 2008, vol. 254, iss. 1, pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.foreco.2007.09.038.

Bauhus J., *Schemerbeck J*., *van der Meer P*., *Kanninen M.* Silvicultural Options to Enhance and Use Forest Plantation Biodiversity. *Ecosystem Goods and Services from Plantation Forests*. London, 2012, pp. 96–139.

Chavez V., *Macdonald S.E.* Partitioning vascular understory diversity in mixedwood boreal forests: The importance of mixed canopies for diversity conservation. *For. Ecol. Manag*., 2012, vol. 271, pp. 19–26. DOI: 10.1016/j.foreco.2011.12.038.

Churilo E.V. Forestry-economic aspects of formation of fire-resistant forest plants. *Proceedings of BSTU. Ser. 1: Forestry*, *Nature management*, *Processing of renewable Resources*, 2017, no. 2 (198), pp. 122-127. (In Russ.)

Denisov S.A., *Kalinin K.K*., *Besschetnov V.P*., *Demicheva N.V*., *Batukhtina T.S*., *Samodelkina V.V*. Problems of reproduction of pine forests of the Middle Volga region. *Bulletin of the Volga State Technological University. Ser.: Forest. Ecology. Nature use*, 2012, no. 1 (14), pp. 12-23. (In Russ.)

Evdokimenko M.D., *Ivanov V.V*. Features of fire protection in the forests of the Baikal region. *Siberian Journal of Forest Science*, 2017, no. 5, pp. 63–75. (In Russ.)

Fischer A., *Lindner M*., *Abs C*., *Lasch P.* Vegetation dynamics in central European forest ecosystems (near-natural as well as managed) after storm events. *Folia Geobot*., 2002, vol. 37, pp. 17–32. DOI: 10.1007/BF02803188.

Greene D.F., *Zasada J.C*., *Sirois L*., *Kneeshaw D*., *Morin H*., *Charron I*., *Si Mard M.J.* A review of the regeneration dynamics of North American boreal forest tree species. *Can. J. For. Res*., 1999, vol. 29, pp. 824–839. DOI: 10.1139/x98-112.

Gryazkin A.V., *Smirnov A.P.* Features of the renewable process in continuous logging of a large area with pronounced mesorelief. *Forest management and hydroforestry*: proc. of the All-Russ. symposium. St. Petersburg-Vologda, 2007, part 1, pp. 96–101. (In Russ.)

Hemery G. Forest management and silvicultural responses to projected climate change impacts on European broadleaved trees and forests. *Int. For. Rev*., 2008, vol. 10, iss. 4, pp. 591–607. DOI: 10.1505/ifor.10.4.591.

Ibragimov A.K., *Podolsky A.V*., *Ryapolov S.F*., *Lebedev E.V.* The ecological role of the phenomenon of "tree species change" and anthropogenic changes in forest types. *Actual problems of the forest complex*, 2004, no. 9, pp. 104–108. (In Russ.)

Isaev A.S., *Bartalev S.A*., *Loupian E*., *Lukina N.V*. Earth observations from satellites as a unique instrument to monitor Russia's forests. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2014, vol. 84, pp. 413–419. DOI: 10.1134/S1019331614060094.

Kalinichenko N.P., *Pisarenko A.I*., *Smirnov N.A.* Reforestation in logging areas. Moscow: Ecology, 1991. 381 p. (In Russ.)

Khanina L.G. Classification of forest sites by the Vorobyev-Pogrebnyak's species indicator tables: database and experience of analysis of forest inventory data. *Forest science issues*, 2019, vol. 2, no. 4, pp. 1–30. DOI: 10.31509/2658-607X-2019-2-4-1-28. (In Russ.)

Koldanov V.Ya. Tree species change and reforestation. Moscow; Leningrad, 1966. 171 p. (In Russ.)

Kolesnikov B.P., *Zubareva R.S*., *Smolonogov E.P.* Forest conditions and types of forests in the Sverdlovsk region. Sverdlovsk: UNC of the USSR Academy of Sciences, 1973. 275 p. (In Russ.)

Korchagov S.A., *Surina E.A*., *Konyushatov O.A*., *Minin N.S*., *Gogoleva L.G.* Forestry assessment of complex logging in the forests of the Vologda region. *Russian Forestry Journal*, 2025, no. 1, pp. 71–82. (In Russ.)

Kuehne C., *Puettmann K.J.* Natural regeneration in thinned Douglas-fir stands in western Oregon. *J. Sustain. For*., 2008, vol. 27, pp. 246–274. DOI: 10.1080/10549810802256221.

Kutyavin I.N., *Manov A.V*., *Osipov A.F*., *Bobkova K.S.* Long-term dynamics of the composition, structure and condition of stands of northern pine forests in the European Northeast of Russia. *Siberian Journal of Forest Science*, 2023, no. 2, pp. 17–25. (In Russ.)

Lebedev A.V, *Zakharov V.P*., *Korotkov S.A.* Changes in the Main Forest Inventory Characteristics of the Forest Fund in the Moscow Meshchera Region during the First Quarter of the 21st Century. *Forestry Engineering journal*, 2026, vol. 16, no. 1 (61), pp. 52–68. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2026.1/4. (In Russ.)

Melekhov I.S. Forestry. Iss. 1. Introduction to forestry: a manual for students. Arkhangelsk: ALTI, 1939. 36 p. (In Russ.)

Morimoto M., *Juday G*., *Young B.* Clearcutting and Site Preparation, but Not Planting, Promoted Early Tree Regeneration in Boreal Alaska. *Forests*, 2017, vol. 8, art. no. 12. DOI: 10.3390/f8010012.

Morozov G.F. The doctrine of the forest. Moscow: Goslesbumizdat, 1949. 455 p. (In Russ.)

Nikonov M.V. Peculiarities of changing the composition of stands in the conditions of the Novgorod region. *Development of species and processes of their life support through the prism of natural evolution and expediency*: peer-reviewed materials digest (collective monograph) published following the results of the LXXVIII International Research and Practice Conference and I stage of the Championship in Medicine and Pharmaceutics, Biology, Veterinary Medicine and Agriculture. London, 2014, pp. 13–15. (In Russ.)

Ogureeva G.N., *Miklyaeva I.M.*, *Suslova E.G.*, *Shvergunova L.V.* Middle-scale mapping of vegetation cover of the Moscow district at the ecological-dynamic basis. *Geobotanical mapping*, 1996, no. 1994–1995, pp. 3–15. (In Russ.)

Pobedinsky A.V. Logging and renewal in the taiga forests of the USSR. Moscow: Lesnaya promyshlennost, 1973. 200 p. (In Russ.)

Puettmann K.J. Silvicultural challenges and options in the context of global change: "Simple" fixes and opportunities for new management approaches. *Journal of Forestry*, 2011, vol. 109, iss. 6, pp. 321-331. DOI: 10.1093/jof/109.6.321.

Romanov E.M., *Eremin N.V.*, *Nureeva T.V.* The state and problems of reproduction of forests in Russia. *Bulletin of the Volga State Technological University. Ser.: Forest. Ecology. Nature use*, 2007, no. 1, pp. 5-14. (In Russ.)

Rysin L.P. Forests of the Moscow region. Moscow: KMK, 2012. 255 p. (In Russ.)

Saha S., *Kuehne C.*, *Bauhu J.* Tree Species Richness and Stand Productivity in Low-Density Cluster Plantings with Oaks (*Quercus robur* L. and *Q. petraea* (Mattuschka) Liebl.). *Forests*, 2013, vol. 4, pp. 650-665. DOI: 10.3390/f4030650.

Savchenkova V.A., *Vasilyev S.B.*, *Nikitin V.F.* Features of Restoration of Coniferous-Broad-Leaved Forests. *Russian Forestry Journal*, 2024, no. 6, pp. 133–146. DOI: 10.37482/0536-1036-2024-6-133-146.

Sedykh V.N. The forest formation process. Moscow: Nauka, 2009. 163 p. (In Russ.)

Shvarts E.A., *Karpachevskiy M.L.*, *Shmatkov N.M.*, *Baybar A.S.* Reforming Forest Policies and Management in Russia: Problems and Challenges. *Forests*, 2023, vol. 14, art. no. 1524. DOI: 10.3390/f14081524.

Terinov N.N., *Andreeva E.M.*, *Zalesov S.V.*, *Lugansky N.A.*, *Gasumova A.G.* Restoration of spruce forests: theory, domestic experience and solution methods. *Russian Forestry Journal*, 2020, no. 3(375), pp. 9–23. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-9-23. (In Russ.)

Tkachenko M.E., *Asoskov A.I.*, *Sinev V.N.* General forestry. Leningrad: Goslestekhizdat, 1939. 746 p. (In Russ.)

Usenya V.V., *Katkova E.N.*, *Mysleiko I.G.* Improving the fire protection system of forests in Belarus. *Forestry and hunting*, 2009, no. 3, pp. 24–27. (In Russ.)

Weiss A.A. Modern research in the field of logging care. *Research in the field of natural sciences*, 2015, no. 6. URL: https://science.snauka.ru/2015/06/10202 (accessed January 17, 2025). (In Russ.)

Zakharov V.P., *Kalashnikova E.N.*, *Korotkov S.A.* Dynamics of forest resources in the central part of the Russian Plain. *Actual problems of the development of the forest complex*: proc. of the XXIII int. sci.-tech. conf. Vologda, 2025, pp. 17–20. (In Russ.)

Zalesov S.V., *Godovalov G.A.*, *Krektunov A.A.*, *Platonov E.Yu.* Protection of settlements from wildfires. *Agrarian Bulletin of the Urals*, 2013a, no. 2 (108), pp. 34–36. (In Russ.)

Zalesov S.V., *Lugansky N.A.*, *Berezhnov V.A.*, *Zalesova E.S.* Maintenance scars in soft-leaved young trees as a method of forming pine forests in the southern Urals. *Bulletin of the Bashkir State Agrarian University*, 2013b, no. 4 (28), pp. 118-121. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 13.10.2025

Захаров В.П., Коротков С.А. Потенциал естественного возобновления леса и рекомендации по его использованию в условиях Восточного Подмосковья // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2026. Вып. 259. С. 6–29. DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.6-29

Рассмотрены особенности естественного возобновления леса на примере лесничеств востока Московской области, расположенных на территории Мещёрской низменности, характеризующейся особым геологическим строением, почвенно-грунтовыми условиями, растительностью и историей хозяйственного освоения. На пробных площадях, заложенных на участках, восстанавливающихся после нарушений различной давности, проведён учёт лесного возобновления основных древесных пород. Установлено, что преобладающими направлениями естественного возобновления являются зарастание вырубок, гарей, а также участков погибших и повреждённых лесных культур берёзой, осиной и ивой с последующим развитием под лиственным пологом самосева ели; развитие самосева ели из состава предварительного возобновления в распадающихся/погибших еловых насаждениях, под пологом перестойных мягколиственных и хвойно-лиственных насаждений с преобладанием сосны; развитие самосева сосны вблизи стен леса, а также на участках с лёгкими сухими почвами и на микроповышениях. Получены данные о неудовлетворительных результатах проведения мероприятий по содействию естественному возобновлению путём напашки плужных борозд для увеличения числа хвойных пород в составе молодняков. Исходя из требований нормативной документации об обеспечении формирования лесных насаждений, соответствующих целевому назначению категорий защитных лесов, сформулированы основные положения

рекомендаций по применению естественного лесовосстановления для воспроизводства лесов в условиях Подмосковной Мещёры, включающие цели, задачи и нормативы мероприятий по естественному лесовосстановлению, переформированию мягколиственных насаждений в лиственно-хвойные и хвойно-лиственные. Сделаны выводы о целесообразности использования естественного возобновления леса для повышения устойчивости лесов к различным неблагоприятным факторам и рационального использования ресурсов лесного хозяйства.

Ключевые слова: естественное лесовосстановление, рубки ухода, смена пород, динамика лесных экосистем, защитные леса.

Zakharov V.P., Korotkov S.A. The potential of natural forest renewal and recommendations for its use in the conditions of the Eastern Moscow region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2026, iss. 259, pp. 6–29 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.6-29

The characteristics of natural forest regeneration are examined using forestry units in the eastern Moscow Region as an example. These units are located in the Meshchera Lowland, which is characterized by its unique geological structure, soil conditions, vegetation characteristics, and history of economic development. A survey of forest regeneration of the main tree species was conducted on sample plots established in areas recovering from disturbances of varying ages. It was established that the predominant patterns of natural regeneration include the reforestation of clearings, burnt-out areas, and areas of dead and damaged forest stands with birch, aspen, and willow, followed by the development of spontaneous spruce seeding under the deciduous canopy; spruce self-seeding from preliminary regeneration in decaying dead spruce stands, under the canopy of overmature softwood and mixed-coniferous stands dominated by pine; pine self-seeding near forest walls, as well as in areas with light, dry soils and on micro-elevations. Data has been obtained on the unsatisfactory results of measures to promote natural regeneration by plowing furrows to increase the number of conifers in young stands. Based on regulatory requirements for ensuring the formation of forest stands that meet the intended purpose of protective forest categories, the main provisions of recommendations for the use of natural reforestation for forest reproduction in the Meshchera region of Moscow have been formulated. These recommendations include the goals, objectives, and standards for natural reforestation measures, as well as the transformation of softwood stands into deciduous-coniferous and coniferous-deciduous forests. Conclusions have been drawn regarding the feasibility of using natural forest regeneration to increase forest resilience to various adverse factors and the rational use of forestry resources.

Keywords: natural reforestation, thinning, species succession, forest ecosystem dynamics, protective forests.

ЗАХАРОВ Владимир Петрович – заместитель начальника отдела экологического просвещения и медиакоммуникаций ГАУ МО «Мособллес». SPIN-код: 2512-1631. ORCID: 0009-0005-0176-6053. WoS ResearcherID: MHR-4616-2025.

143082, Рублево-Успенское ш., 1-й километр, д. 1А., д. Раздоры, Одинцовский городской округ, Московская область, Россия. E-mail: zakharov@forest.ru

ZAKHAROV Vladimir P. – Deputy Head of the Department of Environmental Education and Media Communications, State Institution of the Moscow region «Mosoblles». SPIN-code: 2512-1631. ORCID: 0009-0005-0176-6053. WoS ResearcherID: MHR-4616-2025.

143082. 1st km of Rublevo-Uspenskoe av. Build. 1A. Razdory village. Odintsovo city district. Moscow region. Russia. E-mail: zakharov@forest.ru

КОРОТКОВ Сергей Александрович – доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал);

141005, ул. 1-я Институтская, д. 1, Московская обл., г. Мытищи, Россия;

старший научный сотрудник лаборатории лесоводства и биологической продуктивности Института лесоведения РАН, кандидат биологических наук. SPIN-код: 1514-9516. ORCID: 0000-0003-2754-6014.

143030, Советская ул., д. 21, с. Успенское, Московская область, Россия. E-mail: skorotkov-71@mail.ru

KOROTKOV Sergey A. – PhD (Biological), Associate Professor, BMSTU (Mytishchi branch);

141005. 1st Institutskaya str. 1. Mytishchi. Moscow region. Russia;

Senior Researcher, Laboratory of Forestry and Biological Productivity, Institute of Forest Science of the RAS. SPIN-code: 1514-9516. ORCID: 0000-0003-2754-6014.

143030. Sovetskaya str. 21. Uspenskoe village. Moscow region. Russia. E-mail: skorotkov-71@mail.ru

УДК 598.2

Л.Ю. Пукинская, М.Ю. Пукинская

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ГНЕЗДОВЫХ ТЕРРИТОРИЙ, ЭЛЕМЕНТЫ ЭКОЛОГИИ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОХРАНЕНИЮ МАЛОГО ПОДОРЛИКА CLANGA POMARINA В ПСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ В УСЛОВИЯХ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

Введение. Малый подорлик Clanga pomarina – гнездящийся перелетный вид Псковской области, внесен в федеральную и региональную Красные книги [Федорова, 2014; Бардин, Фетисов, 2019; Мищенко, 2021]. В 2024 г. статус редкости малого подорлика в Красной книге Псковской области повысился – из категории 3 (редкий вид) он переведен в категорию 2 – вид, сокращающийся в численности [Федорова, 2014; Список …, 2024[1]]. Между тем, в начале XX века в Псковской губернии он был обычной гнездящейся птицей [Зарудный, 1910].

Малый подорлик гнездится в лесонасаждениях, а добывает корм в подавляющем большинстве случаев на открытых пространствах. На Северо-Западе малые подорлики обитают в местах, где участки леса чередуются с сухими пустошами, заброшенными полями, сенокосами, частично заросшими вырубками и гарями [Мальчевский, Пукинский, 1983; Васильев, 2003; Пчелинцев, 2018; Фетисов, 2022]. В Тверской области места гнездования приурочены к участкам лесов вблизи сельхозугодий и пойменно-болотных угодий, корм птицы добывают в долинах рек, на лесных полянах, лугах и пастбищах [Керданов, 2013]. В долине р. Оки малые подорлики охотятся на пойменных лугах [Соловков, 2008], в Калужской области – на залежах, суходольных и пойменных лугах, в приручьевых ольшаниках [Костин, Галактионов, 2008]. В Эстонии отмечается предпочтение для охоты пастбищ и избегание пахотных земель [Väli et al., 2014]. Для Северной Белоруссии показано, что плотность гнездования имеет положительную зависимость от доли открытых суходольных биотопов в структуре ландшафта. В качестве

[1] Список видов птиц, занесенных в Красную книгу Псковской области // Приказ Комитета по природным ресурсам и экологии Псковской области от 03.09.2024 №445 «О внесении изменений в приказ Государственного комитета Псковской области по природопользованию и охране окружающей среды от 18.07.2013 №550».

охотничьих угодий птицы используют суходольные луга, пастбища, сенокосы, поля, вырубки, мелиорированные болота [Ивановский, Башкиров, 2002; Шамович и др., 2008]. Несмотря на разнообразие охотничьих биотопов – от заброшенных полей и пустошей, пастбищ и сенокосов до вырубок и мелиорированных болот – повсеместно проявляется биотопическая приуроченность охотничьих участков малых подорликов к территориям, преобразованным сельскохозяйственной деятельностью.

В отношении влияния лесохозяйственной деятельности на гнездование малого подорлика известно следующее. Гнезда нередко уничтожаются в процессе сплошных рубок смешанных заболоченных и черноольховых лесов [Ивановский, 2012]. По данным А.Б. Костина и А.С. Галактионова [2008], лесозаготовительные работы в апреле-июне приводили к оставлению гнезд, размножение птиц на участке возобновлялось на второй год после прекращения лесозаготовок. При проведении рубок зимой птицы продолжают занимать свои старые гнезда или строят новые в местах, где сохранился древостой. Санитарные рубки на гнездовых участках ухудшают условия обитания малых подорликов.

В Псковской области к основным лимитирующим факторам в местах гнездования малого подорлика относят сокращение площади охотничьих угодий в результате зарастания заброшенных сенокосов и пастбищ, и уменьшение количества гнездопригодных участков в результате омоложения лесов, лесозаготовок и выборочных рубок перестойных деревьев [Федорова, 2014; Фетисов, 2022].

Для сохранения мест гнездования малого подорлика в Красной книге РФ рекомендована ширина буферной зоны вокруг гнезда 500 м в любое время года [Мищенко, 2021] со ссылкой на п. 19 «Примерного перечня нормативов выявления и параметров сохранения объектов биологического разнообразия и буферных зон»[2]. Здесь следует отметить, что в рекомендациях, содержащихся в «Примерном перечне…», размеры буферных зон определяются, исходя из размеров гнезд, и для гнезд диаметром от 1 м и более составляют 500 м в любое время год, а для гнезд диаметром менее 1 м – не менее 100–300 м в период гнездования и 50-200 м в остальное время. В Красной книге Псковской области вокруг гнезд малого подорлика рекомендуется устанавливать

[2] Примерный перечень нормативов выявления и параметров сохранения объектов биологического разнообразия и буферных зон, рекомендуемых для сохранения при осуществлении лесосечных работ // Письмо Федерального агентства лесного хозяйства от 12 февраля 2018 г. № НК-06-54/2013 «О биоразнообразии и лесах национального наследия».

буферную зону радиусом 250 м с запретом рубок и мелиоративных работ и объявлять гнезда памятниками природы [Федорова, 2014].

Сохранение малого подорлика в орнитофауне области требует особого внимания к изучению его экологии и вопросам уязвимости вида в условиях природопользования. В Псковской области детального анализа структуры гнездовых территорий малых подорликов не проводилось.

Целью работы было определение структуры гнездовых территорий малого подорлика в Псковской области, выявление факторов, лимитирующих его размножение в условиях природопользования и обоснование необходимых мер для сохранения этого вида. В задачи исследования входило: выявление гнездовых территорий малого подорлика, сбор сведений по экологии вида, поиск гнезд, анализ структуры гнездовых территорий в связи с хозяйственной деятельностью в местах гнездования.

Материалы и методика исследования. Исследование проведено на территории Псковской области в период 2017-24 гг. Гнездовые территории устанавливались в результате проведения выборочных полевых учетов (преимущественно на площадках с круговым обзором) и отдельных наблюдений с учетом показателей, позволяющих судить о наличии занятой гнездовой территории [Ивановский, 2012, 2018]. Для поиска гнезд велись наблюдения и выслеживание. Наблюдения у гнезд проводили из наземных укрытий. На трех гнездовых территориях малого подорлика, на которых были найдены гнезда, для анализа структуры местообитаний были заложены три круговые пробные площади (ПП) радиусом 2 км от гнезда. Структура гнездовых территорий рассчитывалась как соотношение площадей открытых участков и леса на ПП. Структура охотничьих участков рассчитывалась как соотношение площадей различных открытых угодий в процентах от общей площади открытых местообитаний на ПП. К открытым угодьям мы отнесли: поля и луга; открытые, имеющие луга, участки пойм; вырубки (в том числе прочищенные рубками ЛЭП, проходящие через лесные массивы); открытые участки моховых болот («болота»); необлесенные обводненные участки, связанные с системой канав, регулирующих сток с полей («стокорегулирующая система»); территории деревень. Территории, покрытые древесно-кустарниковой растительностью, отнесены нами к категории «лес».

Измерения расстояний и площадей осуществлялись по космоснимкам в программе Google Earth Pro. На гнездовых выделах (территория в радиусе 50 м от гнезда [Ивановский, 2017]) делались краткие геоботанические описания. Диаметр гнездовых деревьев измерялся на высоте 1,3 м, возраст гнездовых деревьев определялся по керну, взятому на той же высоте.

Результаты исследования и обсуждение.

О фенотипе малого подорлика в районе исследования. В зоне симпатрии малого *Clanga pomarina* и большого *Clanga clanga* подорликов отмечается их гибридизация [Lõhmus, Väli, 2005; Väli et al., 2010], и гибридные особи могут иметь признаки обоих видов или промежуточные [по Домбровский, 2009; Коблик, 2014]. К тому же правильность определения подорликов по полевым признакам может зависеть и от условий наблюдений. В связи со сказанным отметим, что все особи, которых нам удалось хорошо рассмотреть, имели характерные для малого подорлика полевые признаки [Домбровский, 2009]. Все взрослые птицы имели, сравнительно с большим подорликом, относительно «светлый» облик, кроющие с нижней (а также и с верхней) стороны крыла были светлее маховых, иногда контраст нижних кроющих и маховых был выражен очень слабо. В Себежском районе мы встречали малого подорлика светлой морфы. Птица имела очень светлый белесо-охристый окрас нижних кроющих, брюшная сторона тела также выделялась светлым тоном, контрастирующим с более темным оперением на груди и шее. Два птенца, выросшие в разные годы в одном гнезде, имели яркое рыжее затылочное пятно и слабую пятнистость верхних кроющих крыла. Слеток, встреченный на другой гнездовой территории, имел сильную поперечную исчерченность второстепенных маховых снизу и слабую пятнистость верхних кроющих крыла. Таким образом, все указанные в данной работе сведения относятся именно к малым подорликам.

Выявленные гнездовые территории. В Псковской области нами было выявлено 11 гнездовых территорий малого подорлика – 7 в Себежском районе и по одной в Опочецком, Бежаницком, Порховском, на границе Плюсского и Стругокрасненского районов. На трех из этих территорий с 2020 по 2024 гг. были найдены гнезда.

Ниже приведены собранные нами сведения, представляющие интерес для анализа и мониторинга современного размещения малого подорлика, с указанием местоположения выявленных гнездовых территорий и наблюдений, послуживших основанием для их установления.

Себежский район:

1. У д. Будани 29 августа 2017 г. встречен взрослый малый подорлик, докармливающий «слетка». Молодая птица уже хорошо летала, но предпочитала сидеть на присаде, громкими криками выпрашивая корм;

2-4. В окрестностях д. Томсино и соседней с ней д. Ермолова Гора в период 2020-22 гг. установлены гнездовые территории трех пар малого подорлика на основании регулярных встреч охотящихся птиц, целенаправленных полетов с добычей, элементов токования в воздухе. На одной из этих

гнездовых территорий найдены 3 гнезда, принадлежащие одной паре, в которых птицы гнездились в разные годы;

5. В окрестностях пос. Идрица у д. Стояки в 2021 г. мы неоднократно встречали малых подорликов в типичном охотничьем биотопе. В том числе 22 июля были встречены три особи (по-видимому, все взрослые) одна из которых демонстрировала элементы токования в воздухе («горки»), а другая пикировала на нее. Третья птица летала поблизости;

6. У д. Александрово в 2020, 2021 и 2024 гг. на протяжении гнездового периода отмечены регулярные встречи охотящихся малых подорликов и целенаправленный полет с добычей;

7. В окрестностях д. Борисенки в 2024 г. было найдено гнездо малого подорлика, в котором благополучно вырос птенец. Помимо линных перьев текущего сезона размножения под гнездовым деревом также были найдены и старые – очевидно, что птицы использовали это гнездо и в прошлые годы.

5 из 7 указанных гнездовых территорий в Себежском районе по состоянию на 2024 г. заселены малым подорликом и, по-видимому, занимаются им стабильно, что подтверждено повторными наблюдениями. Две другие гнездовые территории – вблизи д. Будани и д. Стояки – позднее года установления не проверялись;

8. В Опочецком районе у д. Сырохново в 2024 г. установлена гнездовая территория малого подорлика на основании регулярных встреч птиц, в том числе пары, и регистраций элементов токования (гирляндообразный полет, пикирование одной особи на другую, вокализация);

9. В Бежаницком районе в окрестностях д. Дулово 4 августа 2020 г. на краю вырубки было обнаружено гнездо, очевидно, малого подорлика. Гнездо было демаскировано в результате примыкания рубки к гнездовому дереву и не носило следов размножения текущего сезона. В данном случае принадлежность гнезда определена по следующим признакам: 1) по внешнему виду и расположению гнезда, характерному для малого подорлика; 2) под гнездом обнаружены линные маховые перья подорлика; 3) поблизости встречена особь малого подорлика. Судя по степени сохранности линных маховых перьев, найденных под гнездом, оно использовалось в 2018-19 гг. Тем не менее, кричащий в полете малый подорлик был встречен в 300 м от этого гнезда, что свидетельствует о занятости гнездовой территории. При проверке гнезда в 2022 г. оно выглядело заброшенным и уже не поддерживалось птицами;

10. В Порховском районе вблизи д. Уза в 2022 г. гнездовая территория малого подорлика установлена на основании неоднократных встреч взрослой птицы в гнездовой период в типичных охотничьих биотопах – на полях

и на примыкающих к реке небольших заливных открытых пойменных участках;

11. На границе Плюсского и Стругокрасненского районов в окрестностях д. Малые Льзи в 2021 г. гнездовая территория установлена на основании неоднократных встреч птиц, в том числе пары, и регистрации полета с добычей.

Помимо перечисленных гнездовых территорий в Красногородском районе между д. Бриданово и д. Покровское 1 мая 2020 г. мы наблюдали пару малых подорликов, которые не производили впечатления пролетных птиц. Однако при проведении повторных наблюдений и учета в этом месте подорлики не были нами отмечены. Поэтому мы не относим эту территорию к гнездовой и можем лишь предположить ее наличие ближе к одной из соседних деревень.

Краткие сведения по экологии малого подорлика. Наиболее ранняя отмеченная нами весенняя встреча малых подорликов в местах гнездования – 15 апреля (Себежский район). Но, по-видимому, появляются они здесь раньше. В середине апреля еще наблюдается пролет или распределение по территории: встречи птиц в это время заметно более часты, чем в гнездовой период. В течение второй половины апреля малые подорлики занимают гнездовые территории. После начала мая вне гнездовых территорий они встречаются уже редко, после 5-6 мая – особенно редко.

Гнезда (n=5) располагались в 12-18 м от земли на высоте 2/3 дерева или немного выше. Три гнезда были устроены на боковых ветвях у ствола, 1 – в месте раздвоения вершины, 1 – в развилке главного ствола. Диаметр гнездовых построек составлял приблизительно от 70 до 100 см.

В результате мониторинга найденных гнезд в период 2020-24 гг. отслежено 5 случаев размножения малого подорлика в Себежском районе. В двух случаях оно было безуспешным: в одном по не установленным причинам, во втором – в результате беспокойства при рубке. В трех случаях успешного размножения пара вырастила по 1 птенцу. Таким образом, размножение было успешным в 60% случаев. Сроки оставления гнезд: вылет – 3-4 августа в 2022 г.; 20 июля 2023 г. оперенный птенец еще в гнезде; 27 июля 2024 г. в гнезде находился птенец с еще обильным птенцовым пухом на голове и шее.

Питание нами специально не изучалось. За время наблюдений за охотой малых подорликов на открытых местах мы ни разу не были свидетелями поимки хоть сколько-нибудь крупных животных. В случаях, когда удавалось разглядеть добычу, это были лягушки и «мышевидные грызуны». Во время наблюдений из укрытий у гнезд во второй половине июля, птенцам

приносили «мышевидных грызунов». С последней декады июля подорлики, по-видимому, хорошо обеспечены кормом. Днем и вечером в это время птенцы молчаливы и малоподвижны, в том числе в дни перед вылетом. Не раз мы наблюдали отсутствие реакции птенца на принесенный корм. Иногда в таких случаях взрослая птица брала добычу и несколько раз перекладывала ее в гнезде. Если птенец оставался безучастным, бывало, что взрослая птица сама забирала корм и слетала с гнезда. Обеспеченность кормом в конце гнездового периода, вероятно, связана с увеличением его доступности с началом уборки урожая на полях и сенокошением.

Расстояние между гнездами одной пары малых подорликов составило 190, 350 и 360 м.

Ближайшее гнездо другого вида хищных птиц – канюка *Buteo buteo* – располагалось на расстоянии 480 м от гнезда малого подорлика. Конфликтов между птицами мы не наблюдали.

Структура гнездовых территорий. Гнездовая территория состоит из гнездового и охотничьего участков. Для малого подорлика гнездовой участок – это лесонасаждения, охотничий – открытые пространства. Площади различных местообитаний на гнездовых территориях малого подорлика приведены в табл. 1.

Таблица 1

Площадь (га) различных местообитаний в радиусе 2 км от гнезд малого подорлика

Area (ha) of different habitats within a 2 km radius of the lesser spotted eagle nests

Местообитание	Себежский район		Бежаницкий район
	ПП 1	ПП 2	ПП 3
Поля, луга	127,6	501,6	323,7
Открытые участки пойм	16,6	22,5	14,0
Вырубки	5,6	7,2	79,7
Территории деревень	2,4	–	1,8
Болота	85,2	–	–
Стокорегулирующая система	мертвопокровный	11,8	–
Итого открытых местообитаний	237,4	543,1	419,2
Лес	1019,2	713,5	837,4

Соотношение открытых и лесных территорий в радиусе 2 км от гнезд малого подорлика показано на рис. 1.

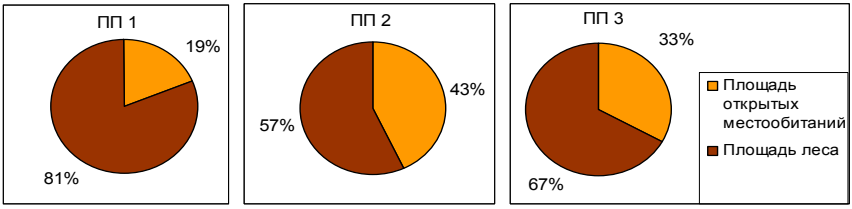


Рис. 1. Структура гнездовых территорий малого подорлика
Fig. 1. Structure of the lesser spotted eagle's nesting territories

Как видно из приведенных данных (табл. 1, рис. 1), на гнездовых территориях малого подорлика в радиусе 2 км от гнезд лесные насаждения преобладают по площади над открытыми пространствами и занимают от 57 до 81% территории.

Следует отметить, что соотношение местообитаний на гнездовой территории на ПП 2 выделяется при сравнении с другими ПП: открытые местообитания занимают здесь наибольшую площадь, и почти вся она занята полями и лугами (табл. 1). При этом здесь же, но за пределами ПП 2, выявлены гнездовые территории еще двух пар малого подорлика, и охотничьи участки всех трех пар частично перекрываются. В районе, где расположена ПП 2, находятся обширные пространства обрабатываемых полей (посевная площадь более 3,2 тыс. га [В себежском…, 2025], две трети из них заняты зерновыми), которые привлекают сюда охотящихся подорликов, в том числе издалека. Вероятно, в этих окрестностях гнездится больше, чем три пары. Мы считаем, что ПП 2 иллюстрирует наиболее благоприятные условия для обитания малых подорликов.

Отметим, что для соседней территории Северной Белоруссии наиболее благоприятными местообитаниями малого подорлика определены территории, где в равной мере представлены открытые пространства и участки спелых лесов, преимущественно заболоченных [Шамович и др., 2008].

Охотничьи участки. Соотношение различных открытых угодий на гнездовой территории в процентах от общей площади открытых местообитаний показано в табл. 2.

Таблица 2

Структура открытых местообитаний в радиусе 2 км от гнезд малого подорлика

Structure of open habitats within a 2 km radius of lesser spotted eagle nests

Открытые местообитания, %	ПП1	ПП2	ПП3
Поля, луга	53,7	92,4	77,3
Открытые участки пойм	7,0	4,1	3,3
Вырубки	2,4	1,3	19,0
Территории деревень	1,0	–	0,4
Болота	35,9	–	–
Стокорегулирующая система	–	2,2	–

Среди открытых местообитаний на всех трех ПП преобладают поля и луга. Их площадь составляет от 54% до 92% открытых пространств. Открытые пойменные местообитания представлены также на всех ПП, но они занимают не более 7% площади охотничьего участка. На всех ПП имеются вырубки, их вклад в общую структуру охотничьего участка составляет от 1,3% до 19%. Однако следует отметить, что вырубка пригодна для охоты малого подорлика очень недолго. Вскоре она зарастает и теряет свое значение в структуре его охотничьего участка. Другие открытые местообитания: болота, участки стокорегулирующей системы полей, территории деревень – встречаются не на каждой ПП, то есть не являются обязательными для охотничьего участка малого подорлика.

Таким образом, исходя из анализа структуры открытых местообитаний на трех ПП, поля и луга занимают более половины открытых угодий и, по-видимому, играют наиболее существенную роль в составе охотничьего участка малых подорликов.

Неравномерность пространственного распределения малого подорлика неоднократно отмечалась в литературе [Мальчевский, Пукинский, 1983; Ивановский, Башкиров, 2002; Шамович и др., 2008; Коблик, 2014; Мищенко, Суханова, 2017; Мищенко, 2021; Фетисов, 2022]. Это подтверждают и наши данные. Все 11 выявленных нами гнездовых территорий приурочены к лесным участкам, граничащим с агроландшафтом и/или окрестностями деревень.

Как показали наши наблюдения, в качестве постоянных мест охоты птицы использовали поля с интенсивным ведением сельского хозяйства (посевы зерновых, рапса, посадки овощных культур, пашни), сенокосы, а также

недавно заброшенные или временно выведенные из оборота участки. Регулярно использовались для охоты также окраины деревень, огородов и примыкающие к ним очень небольшие в здешних местах пастбища, обочины дорог – места, где травянистая растительность нарушается человеческой деятельностью. Другие же открытые пространства, где малый подорлик добывает корм, например, естественные открытые участки пойм, лишь дополняют его охотничьи угодья. В местах наших исследований такие биотопы сравнительно редки, невелики по площади и представлены преимущественно небольшими участками заливаемых весной лугов и затапливаемых ивняков вдоль берегов небольших речек. Добывание корма малым подорликом в пойменных угодьях характерно в первой половине гнездового периода – с весеннего подтопления поймы и пока не отросла высокая и густая трава, в то время как поля используются им для охоты в течение всего сезона размножения. Малый подорлик иногда охотится также по краям и на открытых участках моховых болот, однако, исходя из частоты наблюдений охотящихся птиц в таком биотопе, приоритет остается за сельскохозяйственными угодьями. В местах, где имеются сфагновые болота, но отсутствуют обрабатываемые поля, нами не было выявлено гнездовых участков малого подорлика.

Заброшенные сельскохозяйственные угодья покрываются густым высокотравьем, что делает их малопригодными для добывания корма малым подорликом. Суходольные низкотравные луга с разреженным травостоем нам попадались здесь редко и в небольшом по площади количестве. После прекращения сельскохозяйственного использования такие луга дольше всего сохраняются на возвышенных местах и песчаных холмах. Отдельные встречи птиц на участках мелкотравных лугов (непосредственно не соседствующих с обрабатываемыми полями) нами отмечены около нежилой д. Бошкино, вблизи деревень Руково и Костелище Себежского района. Однако редкость этих встреч в течение гнездового сезона свидетельствует о том, что либо это периферийные, наиболее дальние и редко посещаемые птицами части гнездовых территорий, либо это места редких охот летующих подорликов.

Таким образом, можно сказать, что там, где сельскохозяйственные угодья давно заброшены и зарастают густым высокотравьем, малый подорлик или очень редок, или отсутствует. Напротив, в местах ведения сельского хозяйства этот редкий вид, по нашим наблюдениям, – характерный обитатель. Неравномерность распределения обрабатываемых сельскохозяйственных угодий, на наш взгляд, и определяет неравномерность размещения малого подорлика в районе исследования.

В отношении дальности полетов за добычей мы располагаем данными, полученными в результате прямых наблюдений с открытых возвышенных

мест. Зачастую птицы охотятся в пределах 2 км от гнезда, в том числе утром и в дождливую и ветреную погоду. При хорошей «летной» погоде достаточно часто мы наблюдали охоту малых подорликов на расстоянии 2-4,5 км от их гнезд. В нескольких случаях для птиц из неизвестных нам гнезд, или когда мы не были уверены в принадлежности птицы к известному гнезду, дальность перемещений на отслеженном отрезке их пути превышала 4,5 км. Вероятно, перемещения во время охоты на такие значительные дистанции обусловлены неравномерным распределением лучших охотничьих биотопов. Наши наблюдения свидетельствуют, что в гнездовой период малые подорлики регулярно используют охотничьи угодья в радиусе 4,5 км от своих гнезд.

В связи с вышесказанным отметим, что в Эстонии большинство полетов за добычей размножающихся подорликов не превышает дистанцию 2 км от гнезда [Komischke et al., 2001: цит. по Lõhmus, Väli, 2005; Scheller et al., 2001: цит. по Lõhmus, Väli, 2005]. В Латвии радиус гнездовой территории составляет 1,5-2,7 км [Bergmanis, 1999: цит. по Ивановский, Башкиров, 2002]. В Северной Белоруссии площадь охотничьего участка малого подорлика в среднем составляет 360 га при среднем удалении от гнезда 1,9 км [Голодушко, 1965: цит. по Ивановский, Башкиров, 2002].

Судя по дальности полетов гнездящихся птиц за кормом в местах наших исследований, размеры охотничьих участков и гнездовых территорий здесь, очевидно, существенно больше, чем приводимые для других районов. При этом охотничьи участки разных пар в хороших кормовых угодьях могут перекрываться.

Гнездовые выделы. Все найденные нами гнезда малого подорлика (n=5) располагались в смешанном лесу. Расстояния от гнезд до русла ближайших небольших речек варьируют от 280 до 1500 м. Гнездовые выделы (территория в радиусе 50 м от гнезда) были представлены древостоем сомкнутостью 0,8-0,9. В одном случае гнездовое дерево располагалось на границе смешанного леса и мохового болота. Описания гнездовых выделов представлены в табл. 3. В составе лесообразующих пород во всех гнездовых выделах присутствует ель *Picea abies* L. (H.Karst.), иногда в виде единичной примеси или подроста. Эта порода наиболее часто выбиралась птицами в качестве дерева для гнезда. Гнезда в 3 случаях располагались на елях и по одному – на сосне *Pinus sylvestris* L. и березе *Betula pendula* Roth. Высота гнездовых деревьев – 25-27 м, диаметр – 35-76 см, возраст гнездовых деревьев на уровне груди составил 65-117 лет, при этом 4 дерева были моложе 100 лет.

Таблица 3

Характеристика гнездовых выделов малого подорлика

Characteristics of the nesting sites of the lesser spotted eagle

№	Тип леса	Лесообразующие породы	Порода гнездового дерева	Сомкнутость древостоя	Проективное покрытие подлеска, %	Расположение гнездового выдела
1	снытево-хвощовый	береза с примесью сосны, осины, с единичной примесью ели; подрост ели и дуба	ель	0,8	20	У границы с черноольшаником
2	кисличнопапоротниковый	береза, осина, сосна, ольха черная, ель; подрост ели	ель	0,9	35	У границы с заболоченным лесом
3	снытево-кисличный	береза, осина, ольха черная, сосна; подрост ели	береза	0,8	35	Сухой бугор среди заболоченного леса
4	мертво покровный	ель, осина	ель	0,9	–	Среди относительно однородного лесного насаждения
5	черничносфагновый	ель, сосна, береза; подрост ели	сосна	0,8 со стороны леса	30	На границе мохового болота и леса

«–» – нет данных

Исходя из характеристик гнездовых деревьев и гнездовых выделов, в местах наших исследований участки такого леса не представляют редкости. Учитывая, что на пробных площадях лесонасаждения преобладают по площади над открытыми пространствами, малый подорлик при гнездовании, по-видимому, лимитирован не недостатком гнездовых, а недостатком охотничьих участков. Это подтверждается тем, что в местах, где имеются пригодные для гнездования смешанные леса с примесью ели, заболоченные леса, в том числе черноольшаники, но сельскохозяйственные угодья давно заброшены и нет жилых деревень, нам не удалось выявить гнездовых территорий малого подорлика (например, в Себежском районе в окрестностях нежилых деревень и урочищ Горелики, Шутово, Минин стан, Галызовка, Пуньки, Дрожжино, Жанвиль, Ясеновец, Круглики).

Влияние хозяйственной деятельности на гнездование малого подорлика и меры по его сохранению. Терпимость малого подорлика к сельскохозяйственной и лесохозяйственной деятельности мы оценивали, анализируя случаи, когда птицы бросали гнезда, а также учитывая расстояния от жилых гнезд до ближайших полей и вырубок.

Относительно трех брошенных гнезд малого подорлика установлено следующее. При примыкании вырубки к гнездовому дереву (два случая), несмотря на его сохранение, птицы бросили гнездо, и заселения его в последующие годы не произошло. В обоих случаях гнездовое дерево стало краевым, оказавшись в нескольких метрах от вырубленной площади. Одно из гнезд птицы поддерживали в течение еще двух лет после рубки, однако для размножения использовали другие гнезда, удаленные от границы вырубки на 350 и 360 м, а спустя 2 года старое гнездо было окончательно ими брошено. В третьем случае при спиливании группы деревьев 1 яруса в 80 м от гнезда в период насиживания гнездо с кладкой было брошено.

Расстояния от жилых гнезд малого подорлика до полей и вырубок приведены в табл. 4.

Таблица 4

Расстояния от жилых гнезд малого подорлика до участков хозяйственной деятельности

Distances from residential nests of the lesser spotted eagle to areas of human activity

№ гнезда	Расстояние до края поля, м	Расстояние до ближайшей зоны нарушения вырубкой, м
1	100	350
2	180	1500
3	160	360
4	270	430; до ЛЭП 240
5	230	660; до ЛЭП 400

При механизированном ведении сельского хозяйства (сенокошение, пахота, посевы, механизированная обработка и др.), птицы продолжают заселять свои гнезда и успешно размножаться на расстоянии 100–270 м от края полей (табл. 4). Следует отметить, что присутствие людей, перемещающихся пешком, беспокоит малого подорлика на более дальних расстояниях, чем работающая техника и движущиеся автомашины.

Расстояния от жилых гнезд, которые птицы продолжают заселять, до ближайших сплошных вырубок составили 350-1500 м; до ЛЭП, проходящих через лесные массивы, – 240 и 400 м. В большинстве случаев расстояние от гнезд до ближайших участков, нарушенных рубками, не превышало 500 м. Исходя из этого, мы считаем, что для сохранности гнездовых территорий и успешного размножения малого подорлика при лесозаготовительной деятельности целесообразно выделение буферной зоны радиусом 500 м от известных гнезд и отнесение ее к неэксплуатационной площади с запретом рубок внутри буферной зоны в течение всего года.

Также при лесопользовании очень важно сохранение массивов спелых и приспевающих смешанных лесов, заболоченных лесов, обеспечивающих малых подорликов гнездопригодными участками.

Заключение. Таким образом, малый подорлик обитает на территориях, вовлеченных в сельскохозяйственную и лесохозяйственную деятельность, находя благоприятные условия среди обрабатываемых сельскохозяйственных полей, «встроенных» в лесонасаждения.

На гнездовых территориях малого подорлика в радиусе 2 км от гнезд лесные насаждения преобладают по площади над открытыми пространствами и занимают от 57 до 81% территории. Гнезда располагаются в 300-метровой зоне от края полей.

В структуре охотничьего участка преобладают поля и луга, их площади составляют от 54% до 92% открытых местообитаний. Наиболее важной составляющей являются обрабатываемые сельскохозяйственные угодья.

Гнездование малого подорлика лимитировано недостатком охотничьих участков, в первую очередь обрабатываемых сельскохозяйственных угодий.

Со стороны лесохозяйственной деятельности лимитирующим фактором является некорректное проведение рубок. Птицы бросают гнезда при примыкании вырубок к гнездовым деревьям, а также при проведении рубки вблизи гнезда в период размножения.

Для сохранения малого подорлика в исследуемом регионе, на наш взгляд, наиболее благоприятной является структура местообитаний, при которой лесопокрытая площадь составляет 55-60%, а доля обрабатываемых сельскохозяйственных угодий – 40-45%. На территориях с близким соотношением используемых сельхозугодий и лесопокрытой площади особенно важно соблюдение мер охраны мест гнездования при лесопользовании.

С увеличением используемых площадей сельскохозяйственных угодий численность гнездящихся малых подорликов в регионе, по всей видимости, будет увеличиваться при условии сохранения гнездопригодных участков и с учетом вышеуказанной благоприятной структуры местообитаний.

Рекомендации:

• При лесозаготовительной деятельности вокруг известных гнезд необходимо выделять буферные зоны радиусом 500 м с запретом рубок внутри буферной зоны в течение всего года;

• В местах обитания малых подорликов за пределами буферных зон и на участках, где точное местоположение гнезд не установлено, рубки лесонасаждений должны проводиться во внегнездовой период – с сентября по март;

• При планировании лесозаготовок необходимо предусматривать сохранение участков спелых и приспевающих смешанных лесов, заболоченных лесов, в первую очередь в 300-метровой зоне вокруг полей;

• При отведении участков, подлежащих рубке, для обнаружения неизвестных гнезд и недопущения примыкания рубок к деревьям с гнездами должен производиться осмотр деревьев, особенно тщательно – в 300-метровой полосе вдоль края полей, в том числе должны осматриваться деревья, примыкающие к границе отводимого в рубку участка. При обнаружении гнезд среднего размера (диаметром от 70 см) необходима консультация с орнитологом для установления видовой принадлежности гнезда с последующим определением размеров буферной зоны в зависимости от вида птицы;

• Все работы по расширению полей также должны проводиться во внегнездовой период.

Благодарности. Авторы выражают благодарность д.б.н. В.В. Ивановскому за консультации, члену Санкт-Петербургского клуба фотоохотников ЛООИР В.В. Шишенкову за активное участие в проведении ряда полевых работ.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Бардин А.В., *Фетисов С.А.* Птицы Псковской области: аннотированный список видов // Русский орнитологический журнал. 2019. №28 (1733). С. 731-789.

Васильев С.Н. Наблюдения над хищными птицами и совами в Порховском районе Псковской области в 2000-2002 годах // Русский орнитологический журнал. 2003. Экспресс-выпуск 231. С. 848-853.

В себежском хозяйстве «Веть» идет активная уборка урожая // Официальный сайт Правительства Псковской области. 2025. URL: https://pskov.ru/novosti/21.08.25/168336 (дата обращения: 14.09.2025).

Голодушко Б.З. Хищные птицы и их роль в охотничьем хозяйстве Беловежской пущи: автореф. дис. …канд. биол. наук. Минск, 1965. 22 с.

Домбровский В.Ч. О видовой идентификации малого, большого подорликов и их гибридов в полевых условиях // Raptor Research. Raptors Conservation. 2009. №15. С. 97-110.

Зарудный Н.А. Птицы Псковской губернии // Русский орнитологический журнал. 2003 (1-е изд. 1910 г.). Экспресс-выпуск 237. С. 1047-1066.

Ивановский В.В. Хищные птицы Белорусского Поозерья: монография. Витебск, 2012. 209 с.

Ивановский В.В. Структура гнездовых биотопов хищных птиц Белорусского Поозерья // Веснік ВДУ. 2017. №4 (97). С. 62-68.

Ивановский В.В. Закономерности структурной организации, механизмы разделения трофических ресурсов и пути сохранения хищных птиц Белорусского Поозерья: дис. …д-ра биол. наук. Витебск, 2018. 376 с.

Ивановский В.В., *Башкиров И.В.* Численность гнездовых популяций большого и малого подорликов в северной Белоруссии // Беркут. 2002. Т. 11, вып. 1. С. 34–47.

Керданов Д.А. Подорлик малый *Aquila pomarina* (C.L.Brehm 1831) // Красная книга Тверской области. Тверь, 2013. С. 212.

Коблик Е.А. Отряд Соколообразные, или Дневные хищные птицы // Полный определитель птиц европейской части России. М., 2014. Т. 1. С. 154-220.

Костин А.Б., *Галактионов А.С.* Состояние гнездящейся группировки малого подорлика в заповеднике «Калужские засеки» // Изучение и охрана большого и малого подорликов в Северной Евразии: мат. к V межд. конф. по хищным птицам Северной Евразии. Иваново, 2008. С.187-189.

Мальчевский А.С., *Пукинский Ю.Б.* Птицы Ленинградской области и сопредельных территорий: история, биология, охрана. Т. 1. Л., 1983. 480 с.

Мищенко А.Л. Малый подорлик *Aquila pomarina* (C.L.Brehm, 1831) // Красная книга Российской Федерации: Животные. М., 2021. С. 627-628.

Мищенко А.Л., *Суханова О.В.* Малый подорлик *Aquila pomarina* в западном Подмосковье // Русский орнитологический журнал. 2017. №26 (1486). С. 3410-3415.

Пчелинцев В.Г. Малый подорлик *Aquila pomarina* (C.L. Brehm, 1831) // Красная книга Ленинградской области. СПб., 2018. С. 407-408.

Соловков Д.А. Большой и малый подорлики долины Оки // Изучение и охрана большого и малого подорликов в Северной Евразии: мат. к V межд. конф. по хищным птицам Северной Евразии. Иваново, 2008. С. 228-233.

Федорова Е.Г. Малый подорлик – *Aquila pomarina* C. L. Brehm, 1831 // Красная книга Псковской области. Псков, 2014. С. 410.

Фетисов С.А. Птицы, внесённые в Красную книгу Псковской области: малый подорлик *Aquila pomarina* // Русский орнитологический журнал. 2022. №31 (2198). С. 2649-2679.

Шамович Д.И., *Ивановский В.В.*, *Шамович И.Ю.* Структурная и функциональная роль малого подорлика и обыкновенного канюка в сообществах хвойно-мелколиственных лесов северной Беларуси // Изучение и охрана большого и малого подорликов в Северной Евразии: мат. к V межд. конф. по хищным птицам Северной Евразии. Иваново, 2008. С. 234-252.

Bergmanis U. Taxonomy, distribution, number and ecology of the Lesser Spotted Eagle *Aquila pomarina* C. L. Brehm in Latvia. Riga, 1999. 52 p.

Komischke B., *Graszynski K*., *Meyburg B.-U.* Zur Biologie des Schelladlers *Aquila clanga* // Acta Ornithoecologica. 2001. № 4. P. 321–324.

Lõhmus A., *Väli Ü.* Habitat use by the Vulnerable greater spotted eagle *Aquila clanga* interbreeding with the lesser spotted eagle *Aquila pomarina* in Estonia // Oryx. 2005. Vol. 39, no. 2. P. 170–177. DOI: 10.1017/S0030605305000414.

Scheller W., *Bergmanis U*., *Meyburg B.-U*., *Furkert B*., *Knack A*., *Röper*, *S.* Raum-Zeit-Verhalten des Schreiadlers (*Aquila pomarina*) // Acta Ornithoecologica. 2001. №4. P. 75–236.

Väli Ü., *Dombrovski V*., *Treinys R*., *Bergmanis U*., *Daroczi S. J*., *Dravecky M*., *Ivanovski V*., *Lontkowski J*., *Maciorowski G*., *Meyburg B.-U*., *Mizera T*., *Zeitz R*., *Ellegren H.* Widespread hybridization between the Greater Spotted Eagle *Aquila clanga* and the Lesser Spotted Eagle *Aquila pomarina* (Aves: Accipitriformes) in Europe // The Linnean Society of London. Biological Journal of the Linnean Society. 2010. Vol. 100. P. 725–736. DOI: 10.1111/j.1095-8312.2010.01455.x.

Väli Ü., *Sein G*., *Abel U*., *Tuvi J.* Effects of agricultural land use patterns on the habitat selection, foraging behaviour and reproductive success of the Lesser Spotted Eagle in Estonia // International Conference on the Conservation of the Lesser Spotted Eagle (*Aquila pomarina*). Košická Belá, 2014. P. 24.

References

Active harvesting of crops is in progress in “Vet’” Sebezh farm. *Official site of Pskov region government*, 2025. URL: https://pskov.ru/novosti/21.08.25/168336 (accessed September 14, 2025). (In Russ.)

Bardin A.V., *Fetisov S.A.* Birds of the Pskov Region: Annotated Species Checklist. *Russian Journal of Ornithology*, 2019, no. 28 (1733), pp. 731-789. (In Russ.)

Bergmanis U. Taxonomy, distribution, number and ecology of the Lesser Spotted Eagle *Aquila pomarina* C. L. Brehm in Latvia. Riga, 1999. 52 p.

Dombrovsky V.Ch. On Species Identification of the Lesser and Greater Spotted Eagles and Their Hybrids in the Field. *Raptor Research. Raptors Conservation*, 2009, no. 15, pp. 97-110. (In Russ.)

Golodushko B.Z. Birds of prey and their role in the hunting economy of Belovezhskaya Pushcha: author’s abstract. Diss. … Cand. Biol. Sci. Minsk, 1965. 22 p. (In Russ.)

Ivanovsky V.V. Birds of prey of the Belarusian Lakeland: monograph. Vitebsk, 2012. 209 p. (In Russ.)

Ivanovsky V.V. Structure of nesting biotopes of birds of prey of the Belarusian Lakeland. *Vesnik VDU*, 2017, no. 4 (97), pp. 62-68. (In Russ.)

Ivanovsky V.V. Patterns of structural organization, mechanisms of division of trophic resources and ways of conservation of birds of prey of the Belarusian Lakeland. Diss. ... Doct. Biol. Sci. Vitebsk, 2018. 376 p. (In Russ.)

Ivanovsky V.V., *Bashkirov I.V.* The number of nesting populations of Greater and Lesser Spotted Eagles in northern Belarus. *Berkut*, 2002, vol. 11, iss. 1, pp. 34–47. (In Russ.)

Fedorova E.G. Lesser Spotted Eagle – *Aquila pomarina* C.L. Brehm, 1831. *Red Data Book of the Pskov Region*. Pskov, 2014, p. 410. (In Russ.)

Fetisov S.A. Birds listed in the Red Data Book of the Pskov Region: Lesser Spotted Eagle *Aquila pomarina*. *Russian Ornithological Journal*, 2022, no. 31 (2198), pp. 2649-2679. (In Russ.)

Kerdanov D.A. Lesser Spotted Eagle *Aquila pomarina* (C.L.Brehm 1831). *Red Data Book of Tver Region*. Tver, 2013, p. 212. (In Russ.)

Koblik E.A. Falconiformes, or Diurnal Birds of Prey. *Complete Key to the Birds of the European Part of Russia*. Moscow, 2014, vol. 1, pp. 154–220. (In Russ.)

Komischke B., *Graszynski K.*, *Meyburg B.-U.* Zur Biologie des Schelladlers *Aquila clanga*. *Acta Ornithoecologica*, 2001, no. 4, pp. 321–324.

Kostin A.B., *Galaktionov A.S.* Status of the Breeding Group of Lesser Spotted Eagle in the Kaluga Zaseki Nature Reserve. *Study and Conservation of Greater and Lesser Spotted Eagles in Northern Eurasia*: proc. of the V int. conf. on Birds of Prey of Northern Eurasia. Ivanovo, 2008, pp. 187-189. (In Russ.)

Lõhmus A., *Väli Ü.* Habitat use by the Vulnerable greater spotted eagle *Aquila clanga* interbreeding with the lesser spotted eagle *Aquila pomarina* in Estonia. *Oryx*, 2005, vol. 39, no. 2, pp. 170–177. DOI: 10.1017/S0030605305000414.

Malchevsky A.S., *Pukinsky Y.B.* Birds of the Leningrad Region and Adjacent Territories: History, Biology, Conservation. Vol. 1. Leningrad, 1983. 480 p. (In Russ.)

Mishchenko A.L. Lesser Spotted Eagle *Aquila pomarina* (C.L.Brehm, 1831). *Red Data Book of the Russian Federation*: *Animals*. Moscow, 2021, pp. 627-628. (In Russ.)

Mishchenko A.L., *Sukhanova O.V.* Lesser Spotted Eagle *Aquila pomarina* in Western Moscow Region. *Russian Ornithological Journal*, 2017, no. 26 (1486), pp. 3410–3415. (In Russ.)

Pchelintsev V.G. Lesser Spotted Eagle *Aquila pomarina* (C.L. Brehm, 1831). *Red Data Book of the Leningrad Region*. St. Petersburg, 2018, pp. 407-408. (In Russ.)

Scheller W., *Bergmanis U.*, *Meyburg B.-U.*, *Furkert B.*, *Knack A.*, *Röper*, *S.* Raum-Zeit-Verhalten des Schreiadlers (*Aquila pomarina*). *Acta Ornithoecologica*, 2001, no. 4, pp. 75–236.

Shamovich D.I., *Ivanovsky V.V.*, *Shamovich I.Y.* Structural and functional role of the Lesser Spotted Eagle and Common Buzzard in coniferous-small-leaved forest communities of northern Belarus. *Study and conservation of Greater and Lesser Spotted Eagles in Northern Eurasia*: proc. of the V int. conf. on Birds of Prey of Northern Eurasia. Ivanovo, 2008, pp. 234-252. (In Russ.)

Solovkov D.A. Greater and Lesser Spotted Eagles of the Oka Valley. *Study and conservation of Greater and Lesser Spotted Eagles in Northern Eurasia*: proc. of the V int. conf. on Birds of Prey of Northern Eurasia. Ivanovo, 2008, pp. 228-233. (In Russ.)

Väli Ü., *Dombrovski V.*, *Treinys R.*, *Bergmanis U.*, *Daroczi S. J.*, *Dravecky M.*, *Ivanovski V.*, *Lontkowski J.*, *Maciorowski G.*, *Meyburg B.-U.*, *Mizera T.*, *Zeitz R.*, *Ellegren H.* Widespread hybridization between the Greater Spotted Eagle *Aquila clanga*

and the Lesser Spotted Eagle *Aquila pomarina* (Aves: Accipitriformes) in Europe. *The Linnean Society of London. Biological Journal of the Linnean Society*, 2010, vol. 100, pp. 725–736. DOI: 10.1111/j.1095-8312.2010.01455.x.

Väli Ü., *Sein G*., *Abel U*., *Tuvi J.* Effects of agricultural land use patterns on the habitat selection, foraging behaviour and reproductive success of the Lesser Spotted Eagle in Estonia. *International Conference on the Conservation of the Lesser Spotted Eagle* (*Aquila pomarina*). Košická Belá, 2014, p. 24.

Vasiliev S.N. Observations of Raptors and Owls in the Porkhov District of the Pskov Region in 2000-2002. *Russian Journal of Ornithology*, 2003, express issue 231, pp. 848-853. (In Russ.)

Zarudny N.A. Birds of the Pskov Province. *Russian Journal of Ornithology*, 2003 (1st ed. 1910), express issue 237, pp. 1047-1066. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 14.11.2025

Пукинская Л.Ю., Пукинская М.Ю. Анализ структуры гнездовых территорий, элементы экологии и рекомендации по сохранению малого подорлика *Clanga pomarina* в Псковской области в условиях природопользования // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2026. Вып. 259. С. 30–50. DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.30-50

В статье приведены результаты работы по выявлению и исследованию гнездовых территорий малого подорлика *Clanga pomarina* в Псковской области, проводившегося в 2017-2024 гг. Целью работы было определение структуры гнездовых территорий малого подорлика, выявление факторов, лимитирующих его размножение в условиях природопользования и обоснование необходимых мер для сохранения этого вида. Приводятся краткие сведения о фенотипе и экологии малого подорлика в районе исследования, об успехе размножения и размере территории, используемой гнездящимися птицами для добычи корма. Как показало исследование, на гнездовых территориях малого подорлика в радиусе 2 км от гнезд лесные насаждения преобладают по площади над открытыми пространствами и занимают от 57 до 81% территории. Гнезда располагаются в 300-метровой зоне от края полей. В структуре охотничьего участка преобладают поля и луга, их площади составляют от 54% до 92% открытых местообитаний. Гнездование малого подорлика лимитировано недостатком охотничьих участков, в первую очередь обрабатываемых сельскохозяйственных угодий. Лимитирующим фактором также является некорректное ведение лесохозяйственной деятельности. Птицы бросают гнезда при примыкании вырубок к гнездовым деревьям, а также при проведении рубки вблизи гнезда в период размножения. Для сохранения малого подорлика в исследуемом регионе наиболее благоприятной является структура

местообитаний, при которой лесопокрытая площадь составляет 55-60%, а доля обрабатываемых сельскохозяйственных угодий – 40-45%. В статье даны рекомендации по выделению буферных зон и особенностям природопользования в местах гнездования малых подорликов.

Ключевые слова: малый подорлик *Clanga pomarina*, структура гнездовой территории, природопользование, буферные зоны.

Pukinskaya L.Y., Pukinskaya M.Y. Analysis of the structure of nesting areas, elements of ecology and recommendations for the conservation of the lesser spotted eagle *Clanga pomarina* in the Pskov region in the context of nature management. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2026, iss. 259, pp. 30–50 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.30-50

This article presents the results of identifying and studying the lesser spotted eagle's nesting territories in the Pskov Region from 2017 to 2024. The aim of the study was to determine the structure of lesser spotted eagle nesting territories, identify factors limiting its reproduction in nature management conditions, and substantiate the necessary conservation measures for this species. Brief information on the lesser spotted eagle's phenotype and ecology in the study area, breeding success, and the size of the territory used by nesting birds for foraging are provided. The study showed that forest stands predominate over open spaces within a 2-km radius of lesser spotted eagle nesting territories, accounting for 57 to 81% of the territory. Nests are located within a 300-meter zone from the edge of fields. Fields and meadows predominate in the structure of the hunting territory, accounting for 54% to 92% of open habitat. lesser spotted eagle nesting is limited by a lack of hunting areas, primarily cultivated agricultural land. Inappropriate forest management practices are also a limiting factor. Birds abandon nests when clear-cut areas adjoin nesting trees, as well as when felling occurs near nests during the breeding season. For the conservation of the lesser spotted eagle in the study region, the most favorable habitat structure is one in which forest cover accounts for 55-60% and cultivated agricultural land accounts for 40-45%. This article provides recommendations for the designation of buffer zones and environmental management practices in lesser spotted eagle nesting areas.

Keywords: lesser spotted eagle *Clanga pomarina*, structure of the nesting territory, nature management, buffer zones.

ПУКИНСКАЯ Людмила Юрьевна – аспирант кафедры защиты леса, древесиноведения и охотоведения Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. ORCID: 0009-0008-7225-9173.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: lpukinskaya@gmail.com

PUKINSKAYA Lyudmila Yu. – PhD student, Department of Forest Protection, Wood Science and Game Science, St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0009-0008-7225-9173.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: lpukinskaya@gmail.com

ПУКИНСКАЯ Мария Юрьевна – старший научный сотрудник лаборатории общей геоботаники Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН, кандидат биологических наук. ORCID: 0000-0002-3493-2418.

197376, ул. Профессора Попова, д. 2, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: pukinskaya@gmail.com

PUKINSKAYA Marya Yu. – PhD (Biological), Senior Researcher, General Geobotany Laboratory, Komarov Botanical Institute of the RAS. ORCID: 0000-0002-3493-2418.

197376. Professora Popova str. 2. St. Petersburg. Russia. E-mail: pukinskaya@gmail.com

УДК 630.91+712.03

Н.П. Громов

ИСТОРИКО-АРХИВНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСАДЬБЫ ШТИГЛИЦЕВ В КРАМОРСКОМ УРОЧИЩЕ

Введение. Усадьба Штиглицев, расположенная в Ленинградской области является уникальным по своей красоте памятником природного наследия нашей страны [Штиглиц, 2021]. Несмотря на возросший в последнее время интерес к восстановлению дворянских усадеб, многие вопросы остаются неизученными. Для восстановления усадебных парков самым сложным является определение его первоначального облика или облика в точке его наивысшего расцвета [Русская…, 1994; Исаченко, 2003; Топорина, 2011; Гусаров, 2015; Нащокина, 2015; Черданцева, Жукова, 2018, Шуваева, 2021]. Таким образом, изучение исторических архивных документов может во многом помочь в реализации проекта по восстановлению исторических усадеб [Русская…, 1994; Мурашова, Мыслина, 2003; Мурашова, 2005; Топорина, 2011; Аксенова, Клавир, 2014; Глинка, 2017; Черданцева, Жукова, 2018; Шуваева, 2021; Шуваева и др., 2024].

Работа посвящена изучению исторических, библиографических, картографических документов, которые позволят воссоздать картину формирования фабричного комплекса «Парусинка» и усадьбы Штиглицев.

Материалы и методика исследования. Изучение историко-архивных и библиографических документов усадьбы Штиглицев проводилось в фондах ФГБУ «Российская национальная библиотека» (г. Санкт-Петербург) [Российская…, 2024], Санкт-Петербургского ГКУ «Центральный государственный исторический архив Санкт-Петербурга» [Центральный…, 2024], ФКУ «Российский государственный архив древних актов» (г. Москва) [Российский…, 2024a], ФКУ «Российский государственный исторический архив» (г. Санкт-Петербург) [Российский…, 2024b], ГКУ ЛО «Дирекция по сохранению объектов культурного наследия» [Дирекция…, 2024]. Были исследованы фотографические изображения усадьбы-дачи в ее исторической среде в разные исторические периоды, библиографические и картографические материалы, расположенные в электронных базах данных и библиотеках в общем доступе в сети Интернет.

Натурное обследование усадьбы Штиглицев с целью определения характеристик сложившегося историко-культурного ландшафта, историко-архитектурной среды, фотофиксации, определения природно- и исторически ценных объектов проводилось в июле и сентябре 2024 г.

Данные, полученные в результате историко-архивного исследования, были проанализированы для дальнейшего использования в работе по восстановлению Парусинки и создания проекта по актуализации культурно-природного наследия Ленинградской области.

Результаты исследования и обсуждения. Общая площадь обследуемой территории усадьбы Штиглицев, расположенной по адресу: Ленинградская область, Кингисеппский район, г. Ивангород, микрорайон «Парусинка» – ориентировочно составляет 27 га, находится рядом с льноджутовой мануфактурой барона Штиглица, в Краморском урочище на правом берегу реки Наровы.

Кингисеппский район (до 1922 г. – Ямбургский уезд, ранее – Ямской) находится на древней земле Ингерманландии, названной так в честь дочери шведского короля Ингигерд.

Изначально землю заселяли финно-угорские племена, затем на протяжении нескольких столетий территория принадлежала разным государственным образованиям, пока в 1721 г. не был заключен Ништадтский мирный договор между Швецией и Россией, согласно которому Ингерманландия отошла к последней [Кочеповский, 1991; Мурашова, Мыслина, 2003; Ленинградская..., 2018; Садовникова, 2020; Шуваева, 2021].

История формирования помещичьей мызы на изучаемой территории начинается с начала XIX века. До этого периода местность не осваивалась, о чем свидетельствуют картографические материалы (рис. 1-5; здесь и на рис. 6-11 фиолетовыми флажками отмечены смежные с Краморским урочищем землевладения). На специальной карте Западной части России Шуберта, так называемой «Десятиверстке Шуберта», датируемой 1824-1840 гг. [Специальная…, 1824-1840] обозначено владение Крамера на левом берегу Наровы и суконная фабрика на правом берегу (рис. 6, обозначено красным флажком). На пятиверстной топографической карте Шуберта С.-Петербургской губернии, датируемой 1834 г. [Пятиверстная…, 1834], на правом берегу Наровы обозначены две суконные фабрики (рис. 7, обозначено красным флажком). На трехверстной военной топографической карте Российской Империи Шуберта, отражающей планы местности с 1846 по

1863 гг. [Трехверстная…, 1846-1863], впервые обозначена усадьба Штиглица (рис. 8; здесь и на рис. 9-11 обозначена красным флажком) , сохраняющаяся на более поздних картах (рис. 9-11).

Рис. 1. Карта Шелонской пятины по писцовым книгам, датируемая 1498–1576 г. [Карта…, 1498–1576]

Fig. 1. Map of the Shelon Pyatina according to the land registers of 1498- 1576

Рис. 2. Карта Ингерманландии 1727 г. из атласа Кирилова [Карта…, 1727]

Fig 2. Map of Ingria in 1727 from Kirilov's atlas

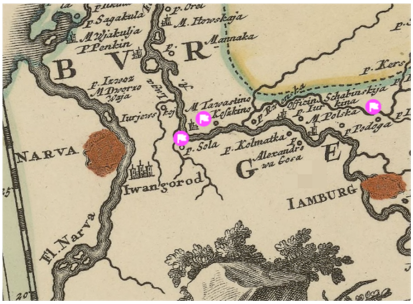


Рис. 3. Карта Ингерманландии 1734 г. [Карта…, 1734]

Fig. 3. Map of Ingria in 1734

Рис. 4. Карта Ингерманландии и Карелии 1745 г. [Карта…, 1745]

Fig. 4. Map of Ingria and Karelia in 1745

В списке земельных владений Ямбургского уезда 1867 г. указано, что «мыза в урочище Краморском при р. Нарове … действ. ст. сов. Барона Александра Людвиговича Штиглиц и Комп.» имеет 80 десятин 505 саженей земли всего, под суконной и льнопрядильной фабрикой и двух лечебницах при них 18 десятин 2026 саженей, под мызой и оранжереями 23 десятины 1505 саженей (рис. 12) [Список..., 1867].

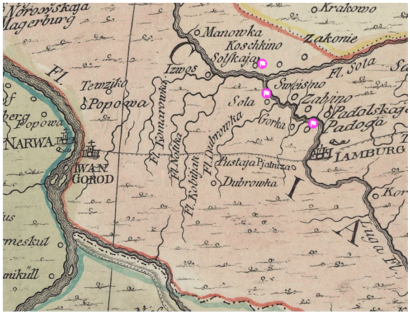


Рис. 5. Карта Санкт-Петербургской губернии 1770 г. Якоба Шмидта [Карта…, 1770]

Fig. 5. Map of the St. Petersburg province in 1770 by Jacob Schmidt

Рис. 6. Специальная карта Западной части России Шуберта. 1826–1840 гг. [Специальная…, 1826–1840]

Fig. 6. Special map of Western Russia by Schubert in 1826–1840

Рис. 7. Пятиверстная топографическая карта Шуберта С.-Петербургской губернии 1834 г. [Пятиверстная…, 1834]

Fig. 7. Schubert's five-verst topographic map of the St. Petersburg province, 1834

Рис. 8. Карта Шуберта Санкт-Петербургской губернии (трёхверстовка), 1846-1863 [Трехверстная…, 1846–1863]

Fig. 8. Schubert map of the St. Petersburg province (three-verst), 1846–1863

Рис. 9. Карта Санкт-Петербургской губернии (одноверстка) 1860 г. [Карта…, 1860]

Fig. 9. Map of the Saint Petersburg province (one verst) in 1860

Рис. 10. Карта Стрельбицкого. Специальная карта Европейской России. 1871 г. [Карта…, 1871]

Fig. 10. Strelbitsky's Map. Special map of European Russia. 1871

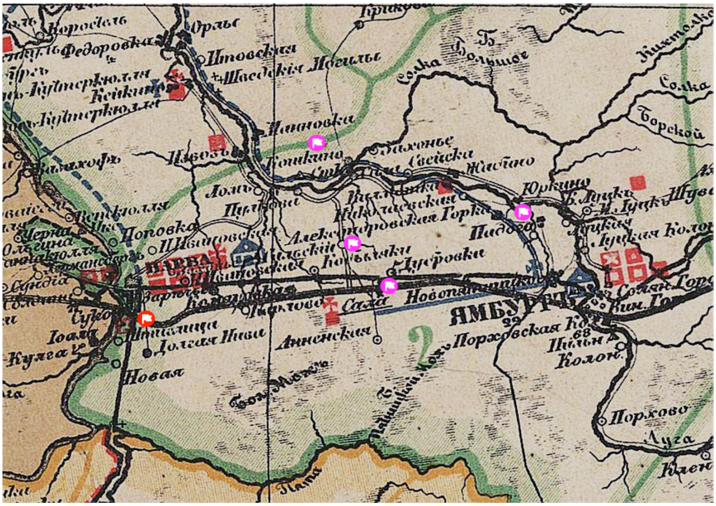


Рис. 11. Карта С.-Петербургской губернии 1895 г.

Fig. 11. Map of St. Petersburg province, 1895 [Карта…, 1895]

(a) (b)

Рис. 12. Список земельных владений 1867 г.: (a) титульный лист; (b) мыза Штиглица

Fig. 12. List of land holdings in 1867: (a) title page; (b) Stieglitz manor

В списке земляных владений 1867 г. в Ямбургском уезде насчитывается 139 мыз, полумызков и усадеб, в том числе 108 помещичьих мыз и полумызков при населенных имениях и 31 отделенных мыз, усадеб и домов.

В юго-западной части Ямбургского уезда можно выделить следующие землевладения (табл. 1), смежные с Краморским урочищем [Списки..., 1864].

В середине XIX века в Краморском урочище А.Л. Штиглиц основал усадьбу-дачу с великолепным парком.

Александр Людвигович Штиглиц (1814-1884) являлся крупнейшим российским промышленником, финансистом и меценатом [Кочеровский, 1991; Мурашова, Мыслина, 2003; Мурашова, 2005; Штиглиц, 2021].

Род Штиглицев, немцев с еврейскими корнями, появился в России во времена правления Екатерины II в конце XVIII века. В 1802 году в Россию прибыл Людвиг Штиглиц, женился на Ангелине Христиане Амалие Готшальк, стал успешным предпринимателем, вступил в первую гильдию купечества Санкт-Петербурга. Людвиг Иванович Штиглиц возглавил Петербургскую биржу и 22 августа 1828 г. был возведен в потомственное баронское достоинство, затем получил дворянское звание. Также Людвиг Иванович Штиглиц основал первое в Российской империи акционерное страховое общество. Банкирский дом Штиглицев вел международные финансовые расчеты государственных ведомств, ввел судоходство между Санкт-Петербургом и Ригой. Помимо этого, вел активную меценатскую деятельность: многие студенты смогли получить образование за границей по грантам Штиглица.

Таблица 1

Смежные землевладения

Adjacent landholdings

	1500 гг.	1600 гг.	1700 гг.	1800 гг.	Владельцы
Сала	Впервые упоминается в писцовых книгах Шелонской пятины от 1571 г. как деревня Сола	В шведских писцовых книгах 1618–1623 гг. – Solaby. На карте Ингерманландии Бергенгейма 1676 г. – Stora Lantakyla	На карте Ингерманландии 1704 г. – Lautakÿla. На карте 1727 г. – Сола. На карте Санкт-Петербургской губернии Шмидта 1770 г. – Сола при мызе Сольская	На карте Санкт-Петербургской губернии Шуберта 1834 г. – Сола при мызе Сола	По списку земельных владений Ямбургского уезда 1887 г. мыза Сала площадью 5780 десятин принадлежала барону П.П. Корфу, мыза была приобретена до 1868 г.
Деревня Кошкино/мыза Мариенгоф	В книгах «Шелонской пятины» – деревня в Кишкине в Ямском Окологородье. В шведских «Балтийских писцовых книгах» 1589 г. – Hamela	В шведских книгах 1618-1623 гг. – Koskinaby. На карте Ингерманландии Бергенгейма 1676 г. – Koskinaby	На карте Ингерманландии 1704 г. – Koskina. На «Географическом чертеже Ижорской земли» Шонбека 1705 г. – Коскинако. На карте Ингерманландии. 1727 г. – Кошкино. На Картах Санкт-Петербургской губернии Шмидта 1770 г. – Кошкино	На картах Шуберта 1834 г. – Кошкино	По списку земельных владений Ямбургского уезда 1887 г. мыза Мариенгоф площадью 1003 десятины принадлежала дворянину Д.М. Резвому, она была приобретена до 1868 г.
Падога	В писцовых книгах Шелонской пятины – Подога в Ямском Окологородье	В шведских писцовых книгах 1618–1623 гг. – Podoga Mäschoua by. На карте Ингерманландии А.И. Бергенгейма, 1676 г. – Padoga при мызе Padoga Hoff	На карте Ингерманландии 1704 г. – Padoga при мызе Padoga hof. На карте Шонбека 1705 г. – мыза Подога. На карте Ингерманландии 1727 г. – Подога. На карте Санкт-Петербургской губернии Шмидта 1770 г. – Падога	На карте Санкт-Петербургской губернии Шуберта 1834 г. – Падога, состоящая из 24 крестьянских дворов и к югу от неё мыза Падожская	По списку земельных владений Ямбургского уезда 1887 г. мызы Александровская Горка и Подога общей площадью 3352 десятины принадлежали графу А.А. Лидерс-Веймарну, мызы были приобретены в 1883 г.
Мыза Анненгоф	-	-	-	На карте Санкт-Петербургской губернии Шуберта 1834 г. – мыза Барона Корфа. На «Топографической карте частей Санкт-Петербургской губернии» 1860 г. – Полумызок Салы.	По списку земельных владений Ямбургского уезда 1887 г. мыза Анненгоф площадью 517 десятин принадлежала дворянину В. В. Лангаммеру, она была приобретена до 1868 г.

После смерти Людвига Ивановича в 1843 г. дела и состояние Штиглицев отошли к его сыну Александру Людвиговичу, который, как и его отец, продолжил служить России.

Александр Людвигович Штиглиц родился в 1814 г. в Санкт-Петербурге, получил образование в Дерптском (ныне Тартусском) университете, затем поступил на государственную службу в Министерство финансов. Благодаря усилиям Александра Людвиговича Российской империи удалось получить выгодные кредиты для строительства железной дороги. Банк Штиглица имел исключительную репутацию, он вел дела с ведущими банками Европы, Азии и Америки [Лизунов, 2014; Штиглиц, 2021; Штиглиц, Штиглиц, 2022]. С 1846 по 1859 гг. Штиглиц занимал пост председателя Биржевого Комитета Санкт-Петербурга. В 1857 г. Александр Людвигович стал одним из учредителей Общества российских железных дорог и способствовал осуществлению проекта по строительству железных дорог в России общей протяженностью 4000 верст. Барон А.Л. Штиглиц был очень успешен как промышленник. В 1847 г. он основал суконную фабрику в Нарве, в 1851 г. – льнопрядильную. В 1880 г. они были преобразованы в Товарищество нарвской суконной мануфактуры. В 1857 г. Штиглиц на личные средства в размере 2 миллионов рублей построил Петергофскую железную дорогу от Санкт-Петербурга до Петергофа, в 1858 г. была проложена ветка от Лигова до Красного села, а в 1864 г. дорога была продолжена до Ораниенбаума.

Будучи одним из богатейших людей России, Штиглиц щедро финансировал многие проекты, выделял значительные средства на ведение Крымской кампании.

Самым известным памятником меценатства Штиглица явилось создание Центрального училища технического рисования. В 1876 г. на средства Александра Людвиговича в Соляном городке Санкт-Петербурга по проекту архитекторов А.И. Кракау и Р.А. Гедике было возведено великолепное здание училища, которое в наше время гордо носит имя барона Штиглица [Памятники…, 2005].

В 1884 г. Александр Людвигович скончался и был похоронен в склепе Свято-Троицкой церкви в усадьбе Штиглицев под Петербургом.

А.Л. Штиглиц основал усадьбу в Краморском урочище в 1852 г. рядом с его фабричным комплексом [Мурашова, Мыслина, 2003; Мурашова, 2005; Шуваева, 2021; Штиглиц, Штиглиц, 2022; Шуваева и др., 2024].

История возникновения фабричного комплекса на берегах Нарвы связана с использованием энергии Нарвских водопадов, обусловлена удачным расположением: выходом в Балтику, близостью столицы, дешёвой рабочей силой, из вчерашних крестьян. В XIX веке Нарва являлась крупным

промышленным центром, на острове Кренгольм находились 2 лесопильных завода и 2 суконные фабрики. На левом берегу Наровы в 1857 г. Л. Кноп основал передовое предприятие того времени «Товарищество Кренгольмской мануфактуры», на правом берегу в 1820 г. П. Момм основал суконную фабрику. В 1836 г. он продает фабрику «Обществу Нарвской мануфактуры», одним из учредителей которого был барон Л. Штиглиц. К сожалению, «Общество Нарвской мануфактуры» просуществовало недолго: в 1845 г. возникший пожар уничтожил фабрику. После смерти Людвига Ивановича Штиглица Александр Людвигович Штиглиц совместно с русским предпринимателем немецкого происхождения Наполеоном Пельтцером на торгах выкупил остатки мануфактуры и начал ее восстановление.

Благодаря усилиям новых хозяев удалось не только восстановить мануфактуру, но и создать передовое во всех смыслах производство. На месте деревянных строений были построены новые корпуса фабрики из местного природного известняка, расположенные вдоль береговой линии. Восточнее параллельно возвели хозяйственные и вспомогательные помещения, в которых располагались красильные, белильные, сушильные, сортовальные конторы. Архитектура зданий напоминала типичные английские промышленные кварталы, и по-видимому, строилась английскими архитекторами. А.Л. Штиглиц при проектировании фабрики вдохновлялся деятельностью Роберта Оуэна на бумагопрядильной фабрики в Нью-Ланарке (Шотландии), основанной в 1785 г. [The Utopian…, 2024]. Этот уникальный рабочий поселок в настоящее время полностью отреставрирован и с 2001 г. является объектом Всемирного наследия ЮНЕСКО.

А.Л. Штиглиц передал управление суконной фабрикой Пельтцерам и в 1851 г. основал выше по течению Наровы «Товарищество Нарвской льнопрядильной фабрики барона А.Л. Штиглица». Производственные цеха и вспомогательные помещения фабрики были расположены перпендикулярно руслу реки и практически полностью сформировались к 1870-м гг.

Территория фабрики располагалась на острове, окруженном обводным каналом со шлюзами. Корпуса фабрики в дальнейшем подвергались реконструкции, но все же сохранили свой первоначальный облик. Вокруг фабрики сформировался рабочий поселок, названный «Парусинка». Это название он получил по основному вырабатываемому материалу – парусине для флота Российской империи. В Парусинке были построены казармы для работников и дома управляющих, больница, школа, училище, собственная хлебопекарня, библиотека и многое другое. Рядом с льноджутовой мануфактурой в Краморском урочище Штиглицам принадлежала усадьба, построенная по проекту известного российского архитектора Александра

Ивановича Кракау. Усадебный дом был построен в неорусском стиле. Есть мнение, что проект дома принадлежал другому знаменитому архитектору – А.И. Штакеншнейдеру [Лизунов, 2014; Штиглиц, 2021] .

Облик усадебного дома можно воссоздать по сохранившимся фотографиям и гравюре, выполненной по рисунку известного немецко-эстонского скульптора и художника Вильгельма Ставенхагена в 1884–1886 гг. (рис. 13). Современники, описывая усадьбу Штиглицев, сравнивают «дачу» с загородным дворцом с множеством комнат, башенок и балконов (рис. 14). С внутренней стороны дома находилась оранжерея. В усадьбе даже был организован кегельбан (рис. 15a).

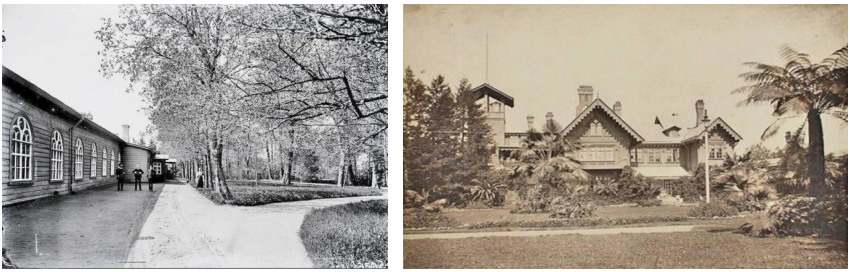
Рис. 13. Вильгельм Зигфрид Ставенхаген. Дача барона А.Л. Штиглица близ Нарвы. Гравюра из альбома «Album Ehstländischer Ansichten». 1867

Fig. 13. Wilhelm Siegfried Stavenhagen. The cottage of Baron A.L. Stieglitz near Narva. An engraving from the album “Album Ehstländischer Ansichten”. 1867

В августе 1890 г. в Нарве состоялось исключительно важное историческое событие – встреча императоров Александра III и Вильгельма II. Императоры, члены императорских фамилий, придворные сановники, министры обеих держав с многочисленной свитой расположились в усадьбе Штиглицев. Высоких гостей принимала чета Половцевых – Александр Александрович с Надеждой Михайловной, приёмной дочерью А.Л. Штиглица. Половцев в своих дневниках подробно описывает подготовку к приёму императоров в усадьбе и каждый день визита. Для встречи был сооружён пальмовый сад с тропическими растениями и пальмами в кадках (рис. 15b), который не оставил равнодушным

даже Вильгельма II [Половцев, 1887-1892; Исаков, Шор, 2009]. Дорогу к даче украшали три триумфальные арки, она была освещена электричеством и даже «иллюминована газом».

Рис. 14. Усадебный дом. Ок. 1900 г.
Fig. 14. Manor house. Circa 1900



(a) (b)

Рис. 15. (a) Кегельбан в усадьбе Штиглица. Ок. 1900 г; (b) Усадьба, украшенная пальмами и тропическими растениями во время встречи императоров России и Германии Александра III и Вильгельма II в 1890 г.

Fig. 15. (a) Bowling alley in the Stieglitz estate. Photo circa 1900; (b) A manor house decorated with palm trees and tropical plants during the meeting of the emperors of Russia and Germany Alexander III and Wilhelm II in 1890

В усадьбе Штиглицев по проекту и под руководством Кракау был возведен храм во имя Святой Троицы (рис. 16a, b). Храм был заложен 29 июня 1873 г. и освящен 17 августа 1875 г. митрополитом Исидором, предназначался стать усыпальницей супруги А.Л. Штиглица Каролины Логиновны.

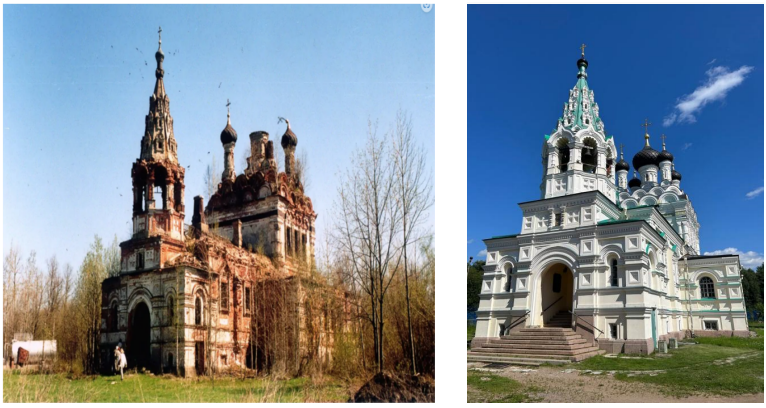
Впоследствии храм стал также усыпальницей Александра Людвиговича, когда он скончался в 1884 г., и их приемной дочери Надежды Михайловны и Александра Александровича Половцова [Иванен, 2004].

(a) (b)

Рис. 16. (a) Усадебный парк с видом на церковь 1900–1909 г.;
(b) Вид из парка на Свято-Троицкую церковь. Ок. 1910 г.

Fig. 16. (a) Manor park with a view of the church from 1900 to 1909.
(b) View from the park of the Holy Trinity Church. Circa 1910

Великолепный пятиглавый храм, возведенный в неорусском стиле, постепенно ветшал, после революции и в последующие годы был практически разрушен, но в период с 1997 по 2007 гг. на средства прихожан и попечителей храм удалось восстановить (рис. 17a, b).



(a) (b)

Рис. 17. Свято-Троицкая церковь: (a) фото 1991-1995 г; (b) фото 2024 г.
Fig. 17. Holy Trinity Church: (a) photo in 1991-1995; (b) photo in 2024

С 2011 г. храму присвоен статус памятника градостроительства и архитектуры регионального значения (Распоряжение Правительства Ленинградской области от 28.06.2011 №292-р).

Усадебный дом Штиглицев пережил революцию, нашествие фашистских захватчиков, но в 1972 г. был снесён по непонятным причинам.

От некогда большого имения в настоящее время остался только заросший фундамент усадебного дома. Из построек на территории парка сохранился в заброшенном состоянии кирпичный двухэтажный дом управляющего мануфактурой.

В результате натурного обследования усадьбы Штиглица в июле-сентябре 2024 г. установлено: исторические границы парка не нарушены, территория парка составляет 15 га, сохранность исторического облика древесно-кустарниковой растительности парка средняя, сохранность старовозрастных деревьев составляет более 50%, видовой состав растительности частично соответствует историческому, территория парка заросла малоценными породами деревьев, кустарниками и самосевными сорными растениями, а так же не характерными для данной парковой куртины видами. Тем не менее сохранены основные структурные элементы парка, частично сохранена главная дубовая аллея парка, пейзажные группы представлены историческими дубами (*Quercus robur* L.), ясенями (*Fraxinus excelsior* L.) и незначительным количеством лиственниц (*Larix decidua* Mill.).

В честь 165-летия основания усадьбы 21.10.2017 г. на главную подъездную аллею были высажены именные дубки, присланные из немецкого питомника Лорберг,.

В 2022 г. произошло очень значимое культурно-исторической событие: фабрично-жилой район и усадьба барона Штиглица «Парусинка» по приказу Комитета по сохранению культурного наследия Ленинградской области от 27 мая были включены в Перечень выявленных объектов культурного наследия, расположенных на территории Ленинградской области. Для осуществления деятельности по сохранению и реконструкции «Парусинки» объект был передан АУПИК фонду «Наследие барона Штиглица» (Приказ Комитета по сохранению культурного наследия Ленинградской области от 27.05.2022 №01-03/22-97).

Заключение. Исследуемая территория усадебно-паркового комплексаА.Л. Штиглица в Краморском урочище в исторической перспективе представляла собой загородный владельческий комплекс, а также фабрично-жилой район «Парусинка», связанный с уникальным природным явлением – Нарвскими водопадами, имеющий достаточно развитую планировочную

структуру и разнообразные промышленные, вспомогательные и хозяйственные постройки.

До настоящего времени усадебный дом не сохранился. Церковь на территории усадебного парка полностью восстановлена. Фабричные здания нуждаются в реставрации. Парковая территория усадьбы нуждается в реновации, восстановлении и постоянном уходе. Проведённый анализ архивных планов и натурное обследование территории выявили, что сформировавшаяся планировочная структура комплекса является характерной для периода расцвета садово-паркового искусства России, связанного с созданием великолепных пейзажных парков. Окружающий ландшафт усадьбы искажен мало, но требуются работы по восстановлению утраченных элементов парка. В настоящее время еще возможно предпринять меры для восстановления ансамбля и его объектов в характерной и подлинной исторической среде, сохранения духа места загородной усадьбы Санкт-Петербургской губернии середины XX века. Сочетание уникальных природных условий прибрежной зоны Нарвских водопадов, сохранившихся парковых насаждений и памятников архитектуры и истории могли бы сделать усадебно-парковый комплекс «Парусинка» привлекательным местом для отдыха и экскурсий. Возрождение льноджутовой мануфактуры открывает возможность создания уникального арт-кластера, включающего в себя музейную, образовательную и рекреационную составляющую.

Благодарности. Автор выражает огромную признательность научному руководителю Данилову Дмитрию Александровичу – заведующему кафедрой почвоведения Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С.М. Кирова, доктору сельскохозяйственных наук, профессору, а также Штиглиц Елене Олеговне – ландшафтному архитектору, специалисту по реставрации памятников садово-паркового искусства, директору фонда «Наследие барона Штиглица».

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Аксенова И.В., *Клавир Е.В.* Проблемы охраны и современного использования загородных дворянских усадеб // Вестник МГСУ. 2014. №11. С. 14–25. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.11.14-25.

Глинка Н.В. Ленинградская область. Исторические очерки. СПб.: Аврора, 2017. 160 с.

Гусаров А.Ю. Юго-западные предместья Петербурга. История, архитектура, дачная жизнь. СПб.: Паритет, 2015. 368 с.

Дирекция по сохранению объектов культурного наследия. URL: https://dsokn.ru/ (дата обращения: 27.09.2024).

Иванен А.В. Ивангородская Свято-Троицкая церковь (барона Александра Штиглица). СПб.: Коло, 2004. 318 с.

Исаков С.Г., *Шор Т.К.* Властители Российской Империи на эстонской земле. Таллин: Aleksandra, 2009. 224 с.

Исаченко Т.Е. Природно-культурные комплексы старинных усадеб в ландшафтах Санкт-Петербургского региона // Известия Русского географического общества. 2003. Т. 135, вып. 2. С. 1–14.

Карта Ингерманландии 1727 г. из атласа, составленного обер-секретарем Сената И.К. Кирилловым на основе шведских картографических документов. // ЭтоМесто. Старые карты России и мира онлайн. URL: http://www.etomesto.ru/karta4332/?ysclid=mq7rvddt7k943274863 (дата обращения: 06.11.2024).

Карта Ингерманландии 1734 г. // ЭтоМесто. Старые карты России и мира онлайн. URL: http://www.etomesto.ru/map-peterburg_ingria-1734/?ysclid=mq7smkc8xx321587357 (дата обращения: 06.11.2024).

Карта Ингерманландии и Карелии 1745 г. // ЭтоМесто. Старые карты России и мира онлайн. URL: http://www.etomesto.ru/map-peterburg_ingria-1745/?ysclid=mq7t9tqtjj174149201 (дата обращения: 06.11.2024).

Карта Санкт-Петербургской губернии 1770 г. Якоба Шмидта // ЭтоМесто. Старые карты России и мира онлайн. URL: http://www.etomesto.ru/map-peterburg_guberniya-1770/?ysclid=mq7tgpdwh500154179 (дата обращения: 06.11.2024).

Карта С.-Петербургской губернии 1895 г. // ЭтоМесто. Старые карты России и мира онлайн. URL: http://www.etomesto.ru/map-peterburg_spb-gub-1895/?ysclid=mq7vxzeegm965293844 (дата обращения: 06.11.2024).

Карта Стрельбицкого. Специальная Карта Европейской России. 1871 г. // ЭтоМесто. Старые карты России и мира онлайн. URL: http://www.etomesto.ru/map-karta-strelbickogo/?ysclid=mq7vltosik593585299 (дата обращения: 06.11.2024).

Карта Шелонской пятины по писцовым книгам, датируемая 1498 – 1576 гг. // ЭтоМесто. Старые карты России и мира онлайн. URL: http://www.etomesto.ru/map-novgorod_shelonskaya-pyatina/?ysclid=mq7r0jy37t571880690 (дата обращения: 07.11.2024).

Кочеповский О.В. Нарва. Градостроительное развитие и архитектура. Таллин: Валгус, 1991. 301 с.

Ленинградская земля: краеведческий альманах. Т. I. Санкт-Петербург: Ленинградский государственный университет им. А.С. Пушкина, 2018. 360 с.

Лизунов П.В. Петербургские купцы, фабриканты и банкиры Штиглицы. СПб.: Алетейя, 2014. 608 с.

Мурашова Н.В. Сто дворянских усадеб Санкт-Петербургской губернии: исторический справочник. СПб.: Выбор, 2005. 399 с.

Мурашова Н.В., *Мыслина Л.П.* Дворянские усадьбы Санкт-Петербургской губернии: Кингисеппский район. СПб.: Выбор, 2003. 276 с.

Нащокина М.В. Русский усадебный парк: феноменология, проблемы сохранения и пропаганды // Русская усадьба. 2015. №20 (36). С. 584–598.

Одноверстовая карта Санкт-Петербургской губернии 1860 г. // ЭтоМесто. Старые карты России и мира онлайн. URL: http://www.etomesto.ru/map-peterburg_3versty/?ysclid=mq7v1a3c6d79927147 (дата обращения: 06.11.2024).

Памятники истории и культуры Санкт-Петербурга, состоящие под государственной охраной: справочник. СПб.: Альт-Софт, 2005. 974 с.

Половцев А.А. Дневник государственного секретаря в 2-х томах. Т. 2: 1887-1892. М.: Центрполиграф, 2005. 639 с.

Пятиверстная топографическая карта Шуберта С-Петербургской губернии 1834 г. // ЭтоМесто. Старые карты России и мира онлайн. URL: http://www.etome sto.ru/map-peterburg_5verst/?ysclid=mq7u6l1jkf138776151 (дата обращения: 06.11.2024).

Российская национальная библиотека (г. Санкт-Петербург). URL: https://nlr.ru/elibrary (дата обращения: 04.11.2024).

Российский государственный архив древних актов (г. Москва). URL: http://rgada.info/ (дата обращения: 12.10.2024a).

Российский государственный исторический архив (г. Санкт-Петербург). URL: https://fgurgia.ru/ (дата обращения: 06.11.2024b).

Русская усадьба: сб. О-ва изуч. рус. усадьбы. Вып. 1 (17). М.; Рыбинск: Рыбин. подворье; Михайлов посад, 1994. 239 с.

Садовникова Н.В. Усадьбы Санкт-Петербургской губернии. Два ареала строительства // Научные труды. 2020. Вып. 54. С. 144–159.

Специальная карта Западной части России Шуберта, 1824-1840 г // ЭтоМесто. Старые карты России и мира онлайн. URL: http://www.etomesto.ru/map-shubert-10-verst/?ysclid=mq7troo5xm870754368 (дата обращения: 07.11.2024).

Списки населённых мест Российской Империи, составленные и издаваемые центральным статистическим комитетом министерства внутренних дел. XXXVII. Санкт-Петербургская губерния. По состоянию на 1862 год. СПб., 1864. URL: http://lopress.47lib.ru/imageViewer/img?url=mZaTmpGekprCl4uLj8XQ0JmQh4uNkIv (дата обращения: 16.10.2024).

Список земельных владений Ямбургского уезда 1867 года. URL: https://maps.southklad.ru/forum/viewtopic.php?t=4402&ysclid=m4i83qhpeo566068380 (дата обращения: 01.10.2024).

Топорина В.А. Роль усадебных комплексов в формировании культурных ландшафтов // Проблемы региональной экологии. 2011. № 3. С. 195–203.

Трехверстная военная топографическая карта Российской Империи Шуберта 1846-1863 г. // ЭтоМесто. Старые карты России и мира онлайн. URL: http://www.etomesto.ru/map-peterburg_3versty/?ysclid=mq7whhtwno647462836 (дата обращения: 07.11.2024).

Центральный государственный исторический архив Санкт-Петербурга. URL: https://spbarchives.ru/infres (дата обращения: 01.10.2024).

ЦГИА СПб ф.262, оп.16 д.121.

ЦГИА СПб ф.262, оп.16 д.126.

ЦГИА СПб ф.262, оп.16 д.161.

Черданцева О.А., *Жукова Е.А.* О важности создания единой методики инвентаризации зеленых насаждений исторических садов в Санкт-Петербурге // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2018. Вып. 222. С. 6–22. DOI: 10.21266/2079-4304.2018.222.6-22.

Штиглиц М.С. Непарадный Петербург: наследие промышленной архитектуры. М.: Прогресс-Традиция, 2021. 368 с.

Штиглиц М.С., *Штиглиц Е.О.* Наследие барона А.Л. Штиглица. Архитектура Ивангорода: история и проблемы сохранения // Terra artis. Искусство и дизайн. 2022. №1. С. 66-76.

Шуваева Е.Ю. Особенности формирования дальних усадеб высшей знати на территории Ямбургского уезда Санкт-Петербургской губернии // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2021. №3. С. 87–96. DOI:10.34031/2071-7318-2021-6-3-87-96

Шуваева Е.Ю., *Лисовский В.Г.*, *Пухаренко Ю.В.* Этапы формирования дальних усадеб высшей знати на территории Санкт-Петербургской губернии // Жилищное строительство. 2024. № 1–2. С. 58–62. DOI: 10.31659/0044-4472-2024-1-2-58-62.

The Utopian Cotton Spinning Factory of New Lanark. URL: https://britishheritage.com/cotton-spinning-factory-new-lanark (дата обращения: 04.11.2024).

References

Aksenova I.V., *Klavier E.V.* Problems of protection and modern use of country noble estates. *Bulletin of MGSU*, 2014, no. 11, pp. 14–25. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.11.14-25. (In Russ.)

Central State Historical Archive of St. Petersburg. URL: https://spbarchives.ru/infres (accessed October 01, 2024). (In Russ.)

Central State Historical Archive of St. Petersburg f.262, op.16 d.121 (In Russ.)

Central State Historical Archive of St. Petersburg f.262, op.16 d.126 (In Russ.)

Central State Historical Archive of St. Petersburg f.262, op.16 d.161 (In Russ.)

Cherdantseva O.A., *Zhukova E.A.* On the importance of creating a unified methodology for inventorying green spaces of historical gardens in St. Petersburg. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2018, iss. 222, pp. 6–22. DOI: 10.21266/2079-4304.2018.222.6-22. (In Russ.)

Directorate for the Preservation of Cultural Heritage Sites. URL: https://dsokn.ru/ (accessed September 09, 2024). (In Russ.)

Glinka N.V. Leningrad Region. Historical Essays. St. Petersburg: Avrora, 2017. 160 p. (In Russ.)

Gusarov A.Yu. Southwestern suburbs of St. Petersburg. History, architecture, dacha life. St. Petersburg: Paritet, 2015. 368 p. (In Russ.)

Historical and cultural monuments of St. Petersburg under state protection: reference book. St. Petersburg: Alt-Soft, 2005. 974 p. (In Russ.)

Isachenko T.E. Natural and cultural complexes of ancient estates in the landscapes of the St. Petersburg region. *Bulletin of the Russian Geographical Society*, 2003, vol. 135, iss. 2, pp. 1–14. (In Russ.)

Isakov S.G., *Shor T.K.* Rulers of the Russian Empire on Estonian soil. Tallinn: Aleksandra, 2009. 224 p. (In Russ.)

Ivanen A.V. Ivangorod Holy Trinity Church (Baron Alexander Stieglitz). St. Petersburg: Kolo, 2004. 318 p. (In Russ.)

Kochenovsky O.V. Narva. Urban development and architecture. Tallinn: Valgus, 1991. 301 p. (In Russ.)

Leningrad land: local history almanac. Vol. I. Saint Petersburg: Leningrad State University named after A.S. Pushkin, 2018. 360 p. (In Russ.)

List of land holdings of the Yamburg district in 1867. URL: https://maps.southklad.ru/forum/viewtopic.php?t=4402&ysclid=m4i83qhpeo566068380 (accessed October 1, 2024). (In Russ.)

Lists of populated areas of the Russian Empire, compiled and published by the Central Statistical Committee of the Ministry of Internal Affairs. XXXVII. St. Petersburg Province. 1862. St. Petersburg, 1864. URL: http://lopress.47lib.ru/imageViewer/img?url=mZaTmpGekprCl4uLj8XQ0JmQh4uNkIv (accessed October 16, 2024). (In Russ.)

Lizunov P.V. St. Petersburg merchants, manufacturers and bankers Stieglitz. St. Petersburg: Aleteya, 2014. 608 p. (In Russ.)

Map of Ingria, 1727, from an atlas compiled by the Chief Secretary of the Senate, I.K. Kirillov, based on Swedish cartographic documents. *EtoMesto. Old maps of Russia and world online*. URL: http://www.etomesto.ru/karta4332/?ysclid=mq7rvddt7k943274863 (accessed November 06, 2024). (In Russ.)

Map of Ingria, 1734. *EtoMesto. Old maps of Russia and world online*. URL: http://www.etomesto.ru/map-peterburg_ingria-1734/?ysclid=mq7smkc8xx321587357 (accessed November 06, 2024). (In Russ.)

Map of Ingria and Karelia, 1745. *EtoMesto. Old maps of Russia and world online*. URL: http://www.etomesto.ru/map-peterburg_ingria-1745/?ysclid=mq7t9tqtjj174149201 (accessed November 06, 2024). (In Russ.)

Map of the Shelon Pyatina based on census books, dating from 1498 to 1576. *EtoMesto. Old maps of Russia and world online*. URL: http://www.etomesto.ru/map-novgorod_shelonskaya-pyatina/?ysclid=mq7r0jy37t571880690 (accessed November 07, 2024). (In Russ.)

Map of the St. Petersburg Governorate in 1770 by Jacob Schmidt. *EtoMesto. Old maps of Russia and world online*. URL: http://www.etomesto.ru/map-peterburg_guberniya-1770/?ysclid=mq7tgpdwh500154179 (accessed November 06, 2024). (In Russ.)

Map of the St. Petersburg Governorate, 1895. *EtoMesto. Old maps of Russia and world online*. URL: http://www.etomesto.ru/map-peterburg_spb-gub-1895/?ysclid=mq7vxzeegm965293844 (accessed November 06, 2024). (In Russ.)

Murashova N.V. One Hundred Noble Estates of the St. Petersburg Province: Historical Handbook. St. Petersburg: Vybor, 2005. 399 p. (In Russ.)

Murashova N.V., *Myslina L.P.* Noble estates of the St. Petersburg province: Kingisepp district. St. Petersburg: Vybor, 2003. 276 p. (In Russ.)

Nashchokina M.V. Russian estate park: phenomenology, problems of preservation and propaganda. *Russian estate*, 2015, no. 20 (36), pp. 584–598. (In Russ.)

National Library of Russia (St. Petersburg). URL: https://nlr.ru/elibrary (accessed November 04, 2024). (In Russ.)

One-verst map of the St. Petersburg province, 1860. *EtoMesto. Old maps of Russia and world online*. URL: http://www.etomesto.ru/map-peterburg_3versty/?ysclid=mq7v1a3c6d79927147 (accessed November 06, 2024). (In Russ.)

Polovtsev A.A. Diary of the Secretary of State in 2 volumes. Vol. 2: 1887-1892. Moscow: Tsentrpoligraf, 2005. 639 p. (In Russ.)

Russian estate: collection of articles on Russian estates. Iss. 1 (17). Moscow; Rybinsk: Rybinsk farmstead: Mikhailov posad, 1994. 239 p. (In Russ.)

Russian State Archive of Ancient Acts (Moscow). URL: http://rgada.info/ (accessed October 12, 2024a). (In Russ.)

Russian State Historical Archive (St. Petersburg). URL: https://fgurgia.ru/ (accessed November 06, 2024b). (In Russ.)

Sadovnikova N.V. Estates of the St. Petersburg Province. Two Construction Areas. *Scientific Works*, 2020, iss. 54, pp. 144–159. (In Russ.)

Schubert's five-verst topographic map of the St. Petersburg province, 1834. *EtoMesto. Old maps of Russia and world online*. URL: http://www.etomesto.ru/map-peterburg_5verst/?ysclid=mq7u6l1jkf138776151 (accessed November 06, 2024). (In Russ.)

Schubert's Special Map of Western Russia, 1824-1840. *EtoMesto. Old maps of Russia and world online*. URL: http://www.etomesto.ru/map-shubert-10-verst/?ysclid=mq7troo5xm870754368 (accessed November 07, 2024). (In Russ.)

Schubert's Three-Verst Military Topographic Map of the Russian Empire, 1846–1863. *EtoMesto. Old maps of Russia and world online*. URL: http://www.etomesto.ru/map-peterburg_3versty/?ysclid=mq7whhtwno647462836 (accessed November 07, 2024). (In Russ.)

Shuvaeva E.Yu. Features of the formation of distant estates of the highest nobility on the territory of the Yamburg district of the St. Petersburg province. *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*, 2021, no. 3, pp. 87–96. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-3-87-96. (In Russ.)

Shuvaeva E.Yu., *Lisovsky V.G.*, *Pukharenko Yu.V.* Stages of formation of distant estates of the highest nobility on the territory of the St. Petersburg province. *Housing construction*, 2024, no. 1–2, pp. 58–62. DOI: 10.31659/0044-4472-2024-1-2-58-62. (In Russ.)

Stieglitz M.S. Unceremonial Petersburg: the legacy of industrial architecture. Moscow: Progress-Traditsiya, 2021. 368 p. (In Russ.)

Stieglitz M.S., *Stieglitz E.O.* The Legacy of Baron A.L. Stieglitz. Architecture of Ivangorod: History and Problems of Preservation. *Terra artis. Art and Design*, 2022, no. 1, pp. 66-76. DOI: 10.53273/27128768_2022_1_66. (In Russ.)

Strelbitsky Map. Special Map of European Russia. 1871. *EtoMesto. Old maps of Russia and world online*. URL: http://www.etomesto.ru/map-karta-strelbickogo/?ysclid=mq7vltosik593585299 (accessed November 06, 2024). (In Russ.)

Toporina V.A. The role of estate complexes in the formation of cultural landscapes. *Problems of regional ecology*, 2011, no. 3, pp. 195–203. (In Russ.)

The Utopian Cotton Spinning Factory of New Lanark. URL: https://britishheritage.com/cotton-spinning-factory-new-lanark (accessed November 4, 2024).

Материал поступил в редакцию 18.12.2024

Громов Н.П. Историко-архивное исследование усадьбы Штиглицев в Краморском урочище // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2026. Вып. 259. С. 51–72. DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.51-72

На примере усадьбы Штиглицев в Краморском урочище рассматривается малоизученный период образования дворянских усадеб в Ямбургском уезде. Описана методология исследования, основанная на изучении архивных, библиографических, картографических источников и натурных обследований с последующей систематизацией полученных данных. В статье изложены результаты историко-картографических и архивных изысканий, выполненных с привлечением значительного количества первоисточников, большая часть которых впервые введена в научный оборот. Определены исторические периоды формирования фабрично-жилого района «Парусинка» и дачи-усадьбы Штиглицев. Актуальность исследования обусловлена проблемами восстановления исторического облика усадебных парков, как части культурного наследия нашей страны, а также их использования в современных условиях.

Ключевые слова: усадебно-парковый комплекс, мыза, исторический анализ, культурное наследие.

Gromov N.P. Historical and Archival Research of the Stieglitz Estate in the Kramorsky Tract. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2026, iss. 259, pp. 51–72 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.51-72

The example of the Stieglitz estate in the Kramorskoye tract is used to examine a little-studied period in the formation of noble estates in the Yamburg district. The article describes the research methodology based on the study of archival, bibliographic, cartographic sources and field surveys with subsequent systematization of the obtained data. The article presents the results of historical, cartographic and archival research carried out with the involvement of a significant number of primary sources, most of

which are introduced into scientific circulation for the first time. The historical periods of the formation of the Parusinka factory and residential area and the Stieglitz dacha-estate are determined. The relevance of the study is due to the problems of restoring the historical appearance of estate parks, as part of the cultural heritage of our country, as well as their use in modern conditions.

K e y w o r d s : manor and park complex, estate, historical analysis, cultural heritage.

ГРОМОВ Никита Петрович – аспирант Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: wwwleningradspb.sru@yandex.ru

GROMOV Nikita P. – PhD student, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: wwwleningradspb.sru@yandex.ru

УДК 595.768.24

А.А. Ефременко, Д.А. Демидко, Н.И. Кириченко, В.И. Пономарев, Ю.Н. Баранчиков

ИНВАЗИЯ ПОЛИГРАФА УССУРИЙСКОГО *POLYGRAPHUS PROXIMUS* BLANDFORD (COLEOPTERA: CURCULIONIDAE, SCOLYTINAE) НА УРАЛЕ

Введение. Проблема инвазий чужеродных видов насекомых не сходит с повестки дня практически в любой стране. В регионах, для которых накоплены достаточные количественные данные, количество чужеродных видов увеличивается экспоненциально [Aukema et al., 2010; Brockerhoff, Liebhold, 2017; Roques et al., 2020; López et al., 2023]. В ряде случаев вселенцы наносят во вторичном ареале существенный ущерб. Такие виды относят к категории «инвайдер» [Soto et al., 2024].

Особое значение среди групп чужеродных лесных фитофагов, выделяемых по трофической специализации, имеют ксилофаги. Значительно уступая по числу видов сосущим насекомым [Aukema et al., 2010; Roques et al., 2020], а в некоторых регионах и хвое-листогрызущим, ксилофаги включают пропорционально больше инвайдеров, чем эти две группы [Aukema et al., 2011]. Огромный ущерб лесам и древесным видам растений в населённых пунктах наносят в последние десятилетия ясеневая узкотелая изумрудная златка *Agrilus planipennis* Fairmaire [Орлова-Беньковская, 2013; Aukema et al., 2011; Bradshaw et al., 2016], азиатский усач *Anoplophora glabripennis* (Motschulsky) [Bradshaw et al., 2016; Faccoli, Gatto, 2016], еловый тёмный дровосек *Tetropium fuscum* (Fabricius) [Bradshaw et al., 2016] и многие другие.

Лесам России с преобладанием пихты сибирской *Abies sibirica* Ledeb. в последние десятилетия существенно вредит полиграф уссурийский *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae). Последствия его инвазии связаны с гибелью древостоев пихты сибирской [Кривец и др., 2015а; Кривец и др., 2019; Кобзарь и др., 2023]. На 2023 г. площадь древостоев, повреждённых им в той или иной степени, превышала 400 тыс. га [Лямцев, 2024], а на 2024 г. только в Красноярском крае превысила 500 тыс. га [Кривец и др., 2024]. При этом следует предполагать гораздо более значительные масштабы наносимого *P. proximus* ущерба: например, даже в Германии, при гораздо лучшей, чем в Сибири, доступности лесов, значительная часть повреждённых древостоев, как правило, не учитывается [Schiefer et al., 2024].

По-видимому, вектором инвазии полиграфа уссурийского послужила неокорённая древесина, перевозимая по Транссибирской магистрали [Баранчиков и др., 2011]. Дендрохронологическая датировка отмирания деревьев в очагах массового размножения этого короеда показала, что на территорию Красноярского края вид попал не позднее 1970-х гг. [Баранчиков и др., 2014], а в Томскую область – в конце 1990-х гг. [Демидко, 2014]. С тех пор вторичный ареал *P. proximus* значительно расширился. Если на 2015 г. в пределах природного ареала пихты сибирской ареал *P. proximus* был ограничен Салаирским кряжем на западе и Енисейским кряжем на востоке [Кривец и др., 2015b], то спустя всего девять лет его пределы в меридиональном направлении расширились от среднего течения Вятки до Байкала [Кривец и др., 2024].

Первые находки инвайдера на Урале, в Приуралье и Поволжье отмечены с конца 2010-х гг. В Татарстане и Удмуртии *P. proximus* был впервые обнаружен в 2019 г. [Баранчиков и др., 2020; Дедюхин, Титова, 2021], в Пермском крае и Челябинской области – в 2022 г., а в Свердловской области – в 2023 г. [Кривец и др., 2024]. По последним данным, в результате маршрутного обследования в июле 2024 г. уссурийский полиграф был обнаружен в лесных насаждениях вдоль автомобильных трасс «Екатеринбург–Серов» и «Екатеринбург–Пермь» [Пономарев и др., 2025]. В Челябинской области инвайдер выявлен на территории всех лесничеств, имеющих в составе древостоев пихту сибирскую, а также в ряде городских лесов и парков, региональных и федеральных ООПТ [Кудрявцев и др., 2024]. Инвазия в эти регионы почти наверняка произошла значительно раньше. Обнаружение популяции чужеродных видов сразу после их проникновения на новые для них территории затруднено из-за малой численности и, следовательно, отсутствия заметных признаков, подтверждающих её существование. Прохождение этого периода, называемого лаг-фазой, является общим для всех таксономических и экологических групп чужеродных организмов [Crooks, Soulé, 1999; Sakai et al., 2001], включая лесных насекомых [Liebhold, Tobin, 2006; Siegert et al., 2014].

Скорость дальнейшего расширения ареала полиграфа уссурийского в Урало-Поволжском регионе инвазии точно оценить сложно. Моделирование расширения вторичного ареала насекомых должно учитывать по меньшей мере два разных процесса [Pitt, 2008]. Локальное распространение происходит при самостоятельном перемещении особей на новые территории, зависит от их летной активности и хорошо предсказывается детерминированными моделями [Столбовая и др., 2017; Taylor, 1978; Kareiva, 1983; Lyttek et al., 2019]; перемещение на дальние расстояния происходит, как правило, при участии человека и требует применения вероятностного моделирования [Yemshanov et al., 2015; Orlova-Bienkowskaja, Bieńkowski, 2018; Jones et al., 2019].

Применение моделей даёт возможность оптимизировать мероприятия по мониторингу популяций видов-инвайдеров. Но при планировании мониторинга следует учитывать и лаг-фазу. Существование промежутка между обоснованием вида на новой территории и его обнаружением неизбежно приведёт к тому, что выдаваемый моделью прогноз будет запаздывать относительно реальной картины. Учёт этого обстоятельства хорошо согласуется с разрабатываемыми подходами к уточнению актуальных границ вторичного ареала инвазионных видов [Leung et al., 2010].

Возможность оценить продолжительность лаг-фазы дают дендрохронологические методы. В литературе описаны многочисленные примеры датирования повреждения ксилофагами деревьев с помощью этого подхода [Eisenhart, Veblen, 2000; Caccianiga et al., 2008; Smith et al., 2012; Negrón, Huckaby, 2020]. Использовали его и для уточнения времени начала инвазии насекомых-ксилофагов [Баранчиков и др., 2014; Демидко, 2014; Siegert et al., 2014].

В данной работе нами выполнено датирование инвазии полиграфа уссурийского в сравнительно близко расположенных регионах Урала и Приуралья. Результаты датирования позволяют нам: а) установить время начала отмирания пихты сибирской в результате атак *P. proximus* и б) оценить, насколько запаздывает обнаружение этого вида относительно реального момента его проникновения в новую часть ареала.

Материал и методы исследования. Исследования проводили на территории четырёх регионов Урала и Приуралья: Республики Удмуртия, Пермского края, Свердловской и Челябинской областей. Более или менее значительная часть территории этих регионов занята среднетаёжными, южнотаёжными и горно-таёжными лесами [Леса…, 1966, 1969], одним из элементов которых является пихта сибирская. Леса с её преобладанием в перечисленных регионах занимают от 0,46% (Удмуртия) до 1,72% (Челябинская область) от общей площади лесов [Алексеев, Зимницкий, 2006], но пихта входит в состав лесов с преобладанием многих других лесообразующих пород [Крылов и др., 1986], что обеспечивает полиграфу уссурийскому значительную кормовую базу в дополнение к лесам с её доминированием. Мало того, именно в смешанных лесах наблюдается максимальный отпад пихты сибирской от полиграфа [Иванчина и др., 2025].

Материал был собран на 9 участках леса, где ранее всего в регионе были отмечены повреждённые полиграфом уссурийским деревья пихты (табл. 1). Сбор материала проводили в 2019 г. в Удмуртии и в октябре 2023 г. на остальных участках. На территории Пермского края было обследовано пять участков: участок №1 находился на окраине города Добрянка в окрестностях биатлонной трассы; участок №2 – севернее п. Полазна, вдоль берега

Камского водохранилища. Остальные три участка были расположены в городских лесах г. Пермь: №3 – окр. коттеджного поселка «Пихтовая стрелка»; №4 – экологический парк «Южный лес»; №5 – окр. микрорайона Соболи (рис. 1). В Республике Удмуртия (участок №6) сбор материала проводили в Завьяловском районе. В Свердловской области исследовали очаги массового размножения *P. proximus* на двух участках: в природном парке «Оленьи ручьи» вдоль туристических троп, в окр. п. Бажуково (участок №7) и в Ботаническом саду УрО РАН, г. Екатеринбург (участок №8), где уссурийский полиграф повредил две куртины *Abies sibirica.* В Челябинской области керны были взяты в национальном парке «Таганай» (участок №9) в пределах нижней и верхней тропы на расстоянии 1–1,5 км от центральной усадьбы национального парка (рис. 1).

Для исследований с живых и погибших деревьев провели сбор кернов или спилов. Подтверждением того, что деревья погибли в результате атак *P*. *proximus*, считали наличие под корой характерных отпечатков маточных и личиночных ходов с куколочными колыбельками [Кривец и др., 2015с.]. На участке «Южный лес» живых деревьев пихты не было, поэтому при датировке для построения мастер-хронологии использовали живые деревья из участка Соболи, расположенного в 4 км к юго-западу (рис. 1).

Таблица 1

Координаты лесных участков, в которых был отобран материал для датирования инвазии *P. proximus*

Coordinates of forest sites where material was collected for dating the *P. proximus* invasion

Регион	Участок	Широта, ºN	Долгота, ºE	Деревьев, шт. (живых / погибших)
Пермский край	Добрянка	58.451	56.460	13 / 16
	Пихтовая стрелка	58.023	56.371	5 / 13
	Полазна	58.339	56.429	12 / 26
	Соболи	57.949	56.286	9 / 20
	Южный лес	57.978	56.323	0 / 43
Удмуртия	Завьялово	56.67	53.320	7 / 19
Свердловская область	Бот. сад УрО РАН	56.799	60.603	15/35
	Оленьи ручьи	56.522	59.240	10 / 27
Челябинская область	Таганай	55.232	59.743	19 / 54

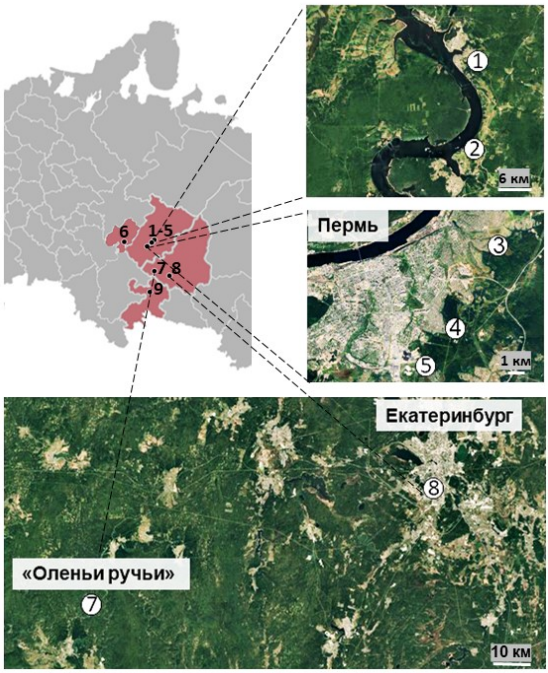


Рис. 1 Расположение исследованных участков: в Пермском крае (1 – Добрянка, 2 – Полазна, 3 – «Пихтовая стрелка», 4 – «Южный лес», 5 – «Соболи») [Efremenko et al., 2025]; в Республике Удмуртия (6 – Завьялово); в Свердловской обл. (7 – природный парк «Оленьи ручьи», 8 – Ботанический сад УрО РАН); в Челябинской обл. (9 – национальный парк «Таганай»)

Fig. 1 Studied sites: in Perm Krai (1 – Dobryanka, 2 – Polazna, 3 – «Pikhtovaya strelka», 4 – «Yuzhny les» 5 – Soboli) [Efremenko et al., 2025]; in the Udmurtia Republic (6 – Zavyalovo); in Sverdlovsk Oblast (7 – «Olenyi ruchyi» Nature Park, 8 – Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences); in Chelyabinsk Oblast (9 – «Taganay» National Park)

Обработка материала и измерение ширины годичных колец. Керны и спилы сушили, после чего для дальнейшей обработки керны наклеивали с помощью термоклея на деревянные подложки с пропиленным пазом. Подготовленный таким образом материал шлифовали наждачной бумагой с размером зерна, постепенно уменьшающимся от 240 до 600...2000 по ISO 6344. Шлифованные керны и спилы сканировали, в зависимости от ширины

годичных колец, с разрешением 2400...3600 dpi. Измерение ширины годичных колец проводили в программе CooRecorder (Cybis, Швеция) [Cybis.se.., 2024], после чего предварительно датировали их в программе CDendro (Cybis, Швеция) [Cybis.se.., 2024] методом поэлементной кросс-валидации. На этом этапе отбраковывали те образцы, коэффициент корреляции Пирсона *r* которых с усреднённой по остальной выборке хронологией после удаления тренда методом первых разностей был менее 0,4.

Дендрохронологическое датирование инвазии полиграфа уссурийского. Оценку представительности выборки и окончательное датирование проводили в среде R [R…, 2021] средствами пакета dplR 1.7.6 [Bunn, 2008]. Перед этим из древесно-кольцевых рядов (ряд – последовательность измеренной ширины годичных колец образца вдоль одного направления от периферии к сердцевине) удаляли авторегрессионную компоненту (функция detrend со значением method = ‘Ar’), что позволяло сохранить в них только наиболее важные для перекрёстного датирования высокочастотные колебания [Methods…, 1990]. Для характеристики представительности выборки рассчитывали величину выраженного сигнала популяции (expressed population signal, EPS). Общепринято считается, что изученная выборка достаточно полно отражает закономерности, характерные для популяции деревьев, если значение EPS ≥ 0,85 [Methods…, 1990]. Датировку гибели дерева, заселённого полиграфом уссурийским, считали подтверждённой, если временной ряд после удаления авторегрессионной компоненты при поэлементной кросс-валидации имел $r \geq 0{,}4$. Годом гибели дерева считали год формирования последнего годичного кольца.

Результаты и обсуждение. Древесно-кольцевые статистики для исследованных древостоев после удаления плохо коррелированных рядов приведены в табл. 2.

Определение даты гибели первых деревьев, освоенных уссурийским полиграфом, позволяет установить время проникновения инвайдера на территорию Урала, а также динамику его распространения во времени. Самое раннее отмирание деревьев пихты сибирской на исследованных территориях было датировано 2007 г. в национальном парке «Таганай» (Челябинская обл.) [Ефременко и др., 2024] и в природном парке «Оленьи ручьи» (Свердловская обл.) [Ponomarev et al., 2024]; 2010 г. в Завьялово (Республика Удмуртия) и 2012 г. в Ботаническом саду УрО РАН (рис. 2). Коэффициенты корреляции с основной хронологией, построенной методом исключения отдельных объектов, составили, соответственно, 0,55, 0,52, 0,72, 0,68.

Таблица 2

Древесно-кольцевые статистические характеристики исследованных древостоев

Tree-ring statistics of the studied forest stands

Участок	Количество древесно-кольцевых рядов, шт.	Количество деревьев, шт.	Средняя длина древесно-кольцевого ряда, лет	Средняя ширина кольца, мм	Эффективная корреляция	Выраженный сигнал популяции (EPS)
Добрянка	17	17	66	1,251	0,231	0,836
Пихтовая Стрелка	7	7	51	1,580	0,261	0,680
Полазна	33	22	52	1,697	0,418	0,941
Соболи	13	13	63	1,382	0,311	0,854
Южный лес	16	16	68	1,321	0,182	0,770
Завьялово	17	17	55	1,903	0,382	0,913
Бот. сад УрО РАН	64	41	42	1,580	0,596	0,984
Оленьи ручьи	34	28	62	1,500	0,604	0,977
Таганай	67	50	84	1,054	0,315	0,958

Датирование в Пермском крае показало динамику отмирания первых отработанных инвайдером деревьев на участках в следующем порядке: 2011 г. – Добрянка, 2014 г. – Полазна, 2018 г. – Соболи, 2021 г. – «Пихтовая стрелка» и 2022 г. – «Южный лес». Коэффициенты корреляции с основной хронологией, построенной методом исключения отдельных объектов, составили 0,67, 0,54, 0,73, 0,51 и 0,45 соответственно [Efremenko et al., 2025].

С помощью дендрохронологического анализа было получено графическое представление динамики гибели пихт на исследуемых территориях в результате их освоения уссурийским полиграфом. По построенным гистограммам видно, что на участках с самым ранним датированием гибели деревьев («Таганай» и «Оленьи ручьи») определенным в 2007 г., уссурийский полиграф наращивал численность достаточно долго (более 10 лет), с пиками отпада древостоев в 2019 г. на участке «Таганай» и в 2022 г. на участке «Оленьи ручьи» [Ефременко и др., 2024; Ponomarev et al., 2024]. Первое отмирание пихты в Ботаническом саду УрО РАН датировано 2012 г. Там пик гибели деревьев совпадал с участком «Оленьи ручьи» и датировался 2022 г. В Удмуртии же первое отмирание деревьев датировано 2010 г. (рис. 3).

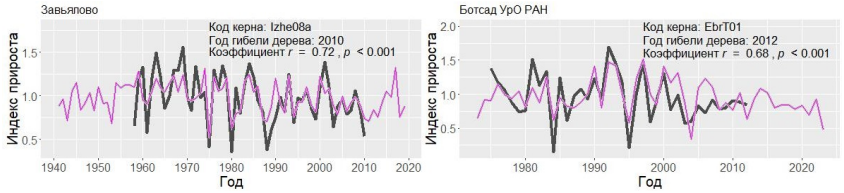


Рис. 2. Пример проверки качества датировки деревьев, ранее всего погибших из-за заселения *P. proximus* в Свердловской обл. (Бот. Сад УрО РАН) и в Республике Удмуртия (Завьялово). Мастер-хронология обозначена тонкой фиолетовой линией; проверяемые ряды показаны жирной черной линией

Fig. 2. Quality check of dating of trees which died first from *P. proximus* in Sverdlovsk Oblast (Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences) and Udmurt Republic (Zavyalovo). The master chronology is indicated by a thin purple line; the tested data are shown by a thick black line

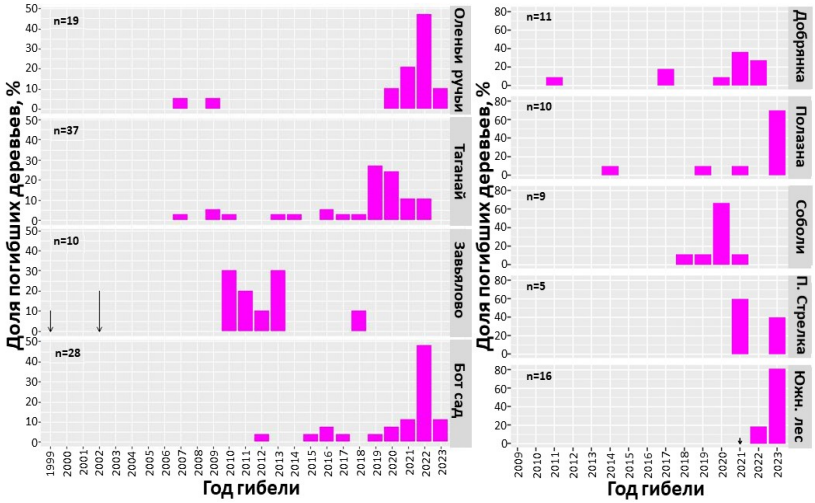


Рис. 3. Динамика гибели пихт, заселенных *P. proximus* в Челябинской, Свердловской обл., Пермском крае и Республике Удмуртия, по данным дендрохронологического анализа (n = количество успешно датированных деревьев; ↓ – доля деревьев, успешно датированных на предварительном этапе, но не прошедших поэлементную кросс-валидацию)

Fig. 3. Dynamics of mortality of firs inhabited by *P. proximus* in the Chelyabinsk and Sverdlovsk Oblast, Perm Krai and the Udmurt Republic, according to dendrochronological analysis (n = number of successfully dated trees; ↓ – proportion of trees successfully dated at the preliminary stage, but not having passed cross-validation)

В Пермском крае на участках с самым ранним датированием гибели деревьев (Добрянка – 2011 г. и Полазна – 2014 г.) уссурийский полиграф также наращивал численность более 10 лет, с пиками отпада древостоев в 2021 г. (Добрянка) и 2023 г. (Полазна), одновременно постепенно расселяясь на другие территории уже естественным путем. На исследованные участки, расположенные южнее, в городских лесах г. Пермь, инвайдер расселился позднее, о чем говорят данные отпада первых деревьев (2018 г.), полученные на участке Соболи, с максимумом отмирания в 2020 г. Затем он освоил участки «Пихтовая стрелка» и «Южный лес», где в массе повреждал деревья с 2021 по 2022 гг. [Efremenko et al., 2025] (рис. 3).

Определённый нами год отмирания первых погибших в очагах полиграфа деревьев позволил установить приблизительное время начала инвазии *P. proximus* на исследованной территории. Так как от года появления полиграфа на новой территории до гибели от него первого дерева пихты проходит минимум 2-3 года [Кривец и др., 2015], то следует учитывать этот срок при определении даты инвазии. Дендрохронологический анализ показал, что самая ранняя гибель, отмеченная для деревьев из Челябинской (Таганай) и Свердловской (Оленьи ручьи) областей, датирована 2007 г. [Ефременко и др., 2024, Ponomarev et al., 2024]. Другие исследователи датировали первое погибшее дерево в национальном парке «Таганай» 2013 г. [Агафонов и др., 2025]. Однако в последнем исследовании авторами не описана методика датировки, и в связи с этим ее качество трудно оценить. В Ботаническом саду УрО РАН отпад деревьев начался на несколько лет позже – в 2012 г. (рис. 2). На участке «Завьялово» датировка отмирания первого дерева совпадает с пиком отпада пихт и датируется 2010 г. (рис. 3). На предыдущих участках полиграф наращивал численность довольно долго (до 15 лет), после чего происходило массовое отмирание деревьев (рис. 3). Можно предположить, что гибель первых деревьев в результате их освоения полиграфом произошла гораздо раньше, в начале 2000-х гг. Также на это указывает более раннее обнаружение инвайдера в регионе [Дедюхин, Титова, 2021] и недостаточное количество надежно датированных образцов с более давней гибелью (рис. 3).

Далее можно проследить динамику распространения инвайдера в Пермском крае. Согласно результатам дендрохронологической датировки, инвазия уссурийского полиграфа в Пермском крае произошла севернее г. Пермь, вдоль Камского водохранилища. Данные на участках Добрянка и Полазна, где ранее всего была датирована гибель деревьев в результате освоения их *P. proximus* (2011 и 2014 гг.), это подтверждают. В городские леса г. Пермь, где отпад пихты на некоторых участках достигал 100%, полиграф проник позже, согласно данным, полученным на участке Соболи, где самая ранняя гибель дерева датирована 2018 г. [Efremenko et al., 2025].

Скорее всего, первичный занос вредителя произошел с «сырой» неокоренной древесиной из других регионов РФ транспортным путем. Поначалу численность вредителя была низкой, т.к. следы его поселения несут только единичные достоверно датированные деревья пихты, отмершие с 2007 г. (рис. 3). Наращивая численность в течение 10-15 лет и постепенно расселяясь естественным путем, короед начал продвигаться на другие территории. Пути же расселения *P. proximus* требуют дополнительного изучения. На примере работ по моделированию распространения насекомых [Pitt, 2008; Yemshanov et al. 2015; Orlova-Bienkowskaja, Bieńkowski, 2018] при расселении на большие расстояния расширение их ареала имеет вероятностный характер, поэтому пространственные закономерности появления вредителя на разных территориях являются нечеткими.

Также стоит отметить несовершенство и необходимость улучшения методологии локального мониторинга уссурийского полиграфа с целью его более раннего выявления на новых территориях, т.к. результаты и данной работы, и предшествовавших исследований [Баранчиков и др., 2014] показывают, что с момента его появления на территории до первого обнаружения проходит не один десяток лет (рис. 4).

Рис. 4. Первые находки уссурийского полиграфа
во вторичном ареале (числитель) и датировки гибели
от полиграфа первых деревьев в регионе (знаменатель)

Fig. 4. The first finds of the four-eyed fir bark beetle
in the secondary range (numerator) and the dates of the death
of the first trees in the region from the *P. proximus* (denominator)

Заключение. Датировка отпада первых заселенных инвайдером деревьев дала представление о времени, когда произошло внедрение уссурийского полиграфа на обследованную территорию. Скорее всего, инвазия *P. proximus* началась в Удмуртии в 2000-х гг. Самая ранняя гибель деревьев отмечена в Челябинской и Свердловской областях в 2007 г. В Пермском крае гибель деревьев ранее всего отмечена на двух участках Добрянского лесничества (2011 и 2014 гг.). В Пермь инвайдер пришел существенно позднее: в городских лесах отмирания пихт начались в 2018, 2021 и 2022 гг. Соответственно, инвазия этого вредителя началась не менее, чем на 2-3 года раньше указанных сроков.

Благодарности. Авторы благодарны А.О. Шилоносову и сотрудникам Центра защиты леса Пермского края за помощь в организации полевых работ и сборе материала; сотрудникам Пермского городского лесничества Н.С. Бруеву и А.А. Давыдову за помощь в подборе подходящих участков для наших исследований и в сборе материала; П.П. Кудрявцеву за помощь в проведении полевых работ в национальном парке «Таганай»; Н.М. Калинкину и В.Ю. Чернову за содействие в проведении полевых работ в природном парке «Оленьи ручьи», а также В.В. Титовой за сбор материала в Республике Удмуртия.

Сведения о финансировании исследования. Работа выполнена в рамках Государственного задания ИЛ СО РАН, проект № FWES-2024-0029.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Агафонов Л.И., *Гурская М.А.*, *Кудрявцев П.П.* Дендрохронологический анализ поражения древостоев с участием *Abies sibirica* Ledeb. инвазионным видом *Polygraphus proximus* Blandford в Национальном парке «Таганай» // Мониторинг и биологические методы контроля вредителей и патогенов древесных растений: от теории к практике: мат. Четвертой Всерос. конф. с межд. уч. М.-Красноярск, 2025. С. 15–16.

Алексеев В.А., *Зимницкий П.В.* Статистические данные о биоразнообразии древесных ресурсов России на начало XXI века. СПб.: СПбНИИЛХ, 2006. 161 с.

Баранчиков Ю.Н., *Петько В.М.*, *Астапенко С.А.*, *Акулов Е.Н.*, *Кривец С.А.* Уссурийский полиграф – новый агрессивный вредитель пихты в Сибири // Лесной вестник. 2011. №4. С. 78–81.

Баранчиков Ю.Н., *Демидко Д.А.*, *Лаптев А.В.*, *Петько В.М.* Динамика отмирания деревьев пихты сибирской в очаге уссурийского полиграфа // Лесной вестник. 2014. №6. С. 132–138.

Баранчиков Ю.Н., *Ефременко А.А.*, *Демидко Д.А.*, *Титова В.В.* Уссурийский полиграф *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) в Предуралье: где, откуда и когда? // Дендробионтные беспозвоночные животные и

грибы и их роль в лесных экосистемах: XI чтения памяти О.А. Катаева. СПб., 2020. С. 74–75.

Дедюхин С.В., *Титова В.В.* Обнаружение уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus* Blandford, 1894) (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) в Удмуртии // Российский журнал биологических инвазий. 2021. Т. 14, №2. С. 32–39. DOI: 10.35885/1996-1499-2021-14-2-32-39.

Демидко Д.А. Датировка инвазии полиграфа уссурийского *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera, Curculionidae, Scolytinae) на территорию Томской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2014. Вып. 207. С. 225–234.

Ефременко А.А., *Демидко Д.А.*, *Кудрявцев П.П.*, *Кириченко Н.И.*, *Баранчиков Ю.Н.* Дендрохронологическая датировка инвазии *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) в национальном парке «Таганай» (Челябинская область) // Чтения памяти Алексея Ивановича Куренцова. 2024. №35. С. 76–86. DOI: 10.25221/kurentzov.35.5.

Иванчина Л.А., *Ротэрмель Э.Е.*, *Большаков Е.Г.*, *Шилоносов А.О.* Влияние типа леса на устойчивость пихтовых древостоев подзоны южной тайги Пермского края к заселению уссурийским полиграфом // Географический вестник. 2025. №2 (73). С. 130–140. DOI: 10.17072/2079-7877-2025-2-130-140. EDN: RBQSVE

Кобзарь В.Ф., *Колесова Н.И.*, *Петрик А.А.* Уссурийский полиграф *Polygraphus proximus* Blandford, 1894 в пихтарниках экопарка «Озера на Снежной» (Иркутская область) // Фитосанитария. Карантин растений. 2023. №1 (13). С. 59–71.

Кривец С.А., *Бисирова Э.М.*, *Керчев И.А.*, *Пац Е.Н.*, *Чернова Н.А.* Трансформация таёжных экосистем в очагах инвазии полиграфа уссурийского *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) в Западной Сибири // Российский журнал биологических инвазий. 2015a. Т. 8, №1. С. 41–63.

Кривец С.А. Керчев И.А., *Бисирова Э.М.*, *Демидко Д.А.*, *Петько В.М.*, *Баранчиков Ю.Н.* Распространение уссурийского полиграфа *Polygraphus proximus* Blandf. (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) в Сибири // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2015b. Вып. 211. С. 33–45. DOI: 10.1603/ICE.2016.92728.

Кривец С.А., *Керчев И.А.*, *Бисирова Е.М.*, *Пашенова Н.В.*, *Демидко Д.А.*, *Петко В.М.*, *Баранчиков Ю.Н.* Уссурийский полиграф в лесах Сибири (распространение, биология, экология, выявление и обследование повреждённых насаждений): метод. пособие. Томск; Красноярск: УМИУМ, 2015c. 48 с.

Кривец С.А., *Бисирова Э.М.*, *Дебков Н.М.*, *Керчев И.А.* Организация и результаты мониторинга состояния пихты сибирской в зоне инвазии уссурийского полиграфа в Томской области // Лесные экосистемы бореальной зоны: биоразнообразие, биоэкономика, экологические риски. Красноярск: Институт леса СО РАН, 2019. С. 214–216.

Кривец С.А., *Керчев И.А.*, *Бисирова Э.М.*, *Волкова Е.С.*, *Астапенко С.А.*, *Ефременко А.А.*, *Косилов А.Ю.*, *Кудрявцев П.П.*, *Кузнецова Ю.Р.*, *Пономарёв В.И.*, *Потапкин А.Б.*, *Тараскин Е.Г.*, *Титова В.В.*, *Шилоносов А.О.*, *Баранчиков Ю.Н.* Обзор

современного вторичного ареала уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus* Blandford) на территории Российской Федерации // Российский журнал биологических инвазий. 2024. Т. 17, №1. С. 49–69. DOI: 10.35885/1996-1499-17-1-49-69.

Крылов Г.В., *Марадудин И.И.*, *Михеев Н.И.*, *Козакова Н.Ф.* Пихта. М.: Агропромиздат, 1986. 239 с.

Кудрявцев П.П., *Потапкин А.Б.*, *Баева А.А.*, *Гилев А.В.* Новые находки уссурийского полиграфа *Polygraphus proximus* Blandf. в Челябинской области // Дендробионтные беспозвоночные животные и грибы и их роль в лесных экосистемах: XIII чтения памяти О.А. Катаева. СПб., 2024. С. 62–63.

Леса северной и средней тайги Европейской части СССР / под ред. А.Б. Жукова. М.: Наука, 1966. 458 с.

Леса Урала, Сибири и Дальнего Востока / под ред. А.Б. Жукова. М.: Наука, 1969. 768 с.

Лямцев Н.И. Динамика очагов уссурийского полиграфа в лесах России // Фитосанитария. Карантин растений. 2024. №S4-2 (20). С. 59–60.

Орлова-Беньковская М.Я. Европейский ареал жука *Agrilus planipennis* (Coleoptera: Buprestidae) расширяется: зона массовой гибели ясеня охватила Северо-Западное Подмосковье и часть Тверской области // Российский журнал биологических инвазий. 2013. Т. 6, №4. С. 49–58.

Пономарев В.И., *Толкач О.В.*, *Терехов Г.Г.*, *Клобуков Г.И.*, *Сушенцов О.Е.*, *Корлыханова Т.В.* Распространение уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus* Blandford) в лесных насаждениях Свердловской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 254. С. 99–111. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.254.99-111.

Столбовая М.В., *Колпак Е.П.*, *Селицкая Е.А.*, *Ефремова Е.А.* Математическая модель распространения уссурийского полиграфа // Молодой учёный. 2017. Т. 135, №1. С. 124–129.

Aukema J.E., *McCullough D.G.*, *Von Holle B.*, *Liebhold A.M.*, *Britton K.*, *Frankel S.J.* Historical Accumulation of Nonindigenous Forest Pests in the Continental United States // BioScience. 2010. Vol. 60, no. 11. P. 886–897. DOI: 10.1525/bio.2010.60.11.5.

Aukema J.E., *Leung B.*, *Kovacs K.*, *Chivers C.*, *Britton K.O.*, *Englin J.*, *Frankel S.J.*, *Haight R.G.*, *Holmes T.P.*, *Liebhold A.M.*, *McCullough D.G.*, *Von Holle B.* Economic Impacts of Non-Native Forest Insects in the Continental United States // PLoS ONE. 2011. Vol. 6, no. 9. Art. no. e24587. DOI: 10.1371/journal.pone.0024587.

Bradshaw C.J.A. Leroy B., *Bellard C.*, *Roiz D.*, *Albert C.*, *Fournier A.*, *Barbet-Massin M.*, *Salles J.M.*, *Simard F.*, *Courchamp F.* Massive yet grossly underestimated global costs of invasive insects // Nat. Commun. 2016. Vol. 7, no. 1. Art. no. 12986. DOI: 10.1038/ncomms12986.

Brockerhoff E.G., *Liebhold A.M.* Ecology of forest insect invasions // Biol. Invasions. 2017. Vol. 19, no. 11. P. 3141–3159. DOI: 10.1007/s10530-017-1514-1.

Bunn A.A. Dendrochronology program library in R (dplR) // Dendrochronologia. 2008. Vol. 26. P. 115–124. DOI: 10.1016/j.dendro.2008.01.002.

Caccianiga M., *Payette S.*, *Filion L.* Biotic disturbance in expanding subarctic forests along the eastern coast of Hudson Bay // New Phytologist. 2008. Vol. 178, no. 4. P. 823–834. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2008.02408.x.

Crooks J.A., *Soulé M.E.* Lag Times in Population Explosions of Invasive Species: Causes and Implications // Invasive Species and Biodiversity Management. Dordrecht, 1999. P. 103–125.

Cybis.se: Technical writing, software development, dendrochronology. URL: https://cybis.se/ (дата обращения: 01.07.2024).

Eisenhart K.S., *Veblen T.T.* Dendroecological detection of spruce bark beetle outbreaks in northwestern Colorado // Can. J. For. Res. 2000. Vol. 30, no. 11. P. 1788–1798. DOI: 10.1139/x00-104.

Efremenko A.A., *Demidko D.A.*, *Kirichenko N.I.*, *Shilonosov A.O.*, *Baranchikov Yu.N.* Dating of the invasion start of the four-eyed fir bark beetle in the Perm Krai // Siberian Journal of Forest Science. 2025. No. 4. P. 97–104. DOI: 10.15372/SJFS20250410.

Faccoli M., *Gatto P.* Analysis of costs and benefits of Asian longhorned beetle eradication in Italy // Forestry. 2016. Vol. 89, no. 3. P. 301–309. DOI: 10.1093/forestry/cpv041.

Jones K.L., *Shegelski V.A.*, *Marculis N.G.*, *Wijerathna A.N.*, *Evenden M.L.* Factors influencing dispersal by flight in bark beetles (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae): from genes to landscapes // Canadian Journal of Forest Research. 2019. Vol. 49, no. 9. P. 1024–1041. DOI: 10.1139/cjfr-2018-0304.

Kareiva P.M. Local movement in herbivorous insects: applying a passive diffusion model to mark-recapture field experiments // Oecologia. 1983. Vol. 57, no. 3. P. 322–327. DOI: 10.1007/BF00377175.

Leung B., *Cacho O.J.*, *Spring D.* Searching for non-indigenous species: rapidly delimiting the invasion boundary // Diversity and Distributions. 2010. Vol. 16, no. 3. P. 451–460. DOI: 10.1111/j.1472-4642.2010.00653.x.

Liebhold A.M., *Tobin P.C.* Growth of newly established alien populations: comparison of North American gypsy moth colonies with invasion theory // Popul. Ecol. 2006. Vol. 48, no. 4. P. 253–262. DOI: 10.1007/s10144-006-0014-4.

López D.N., *Fuentes-Contreras E.*, *Ruiz C.*, *Ide S.*, *Estay S.A.* A bug's tale: revealing the history, biogeography and ecological patterns of 500 years of insect invasions // Neobiota. 2023. Vol. 81. P. 183–197. DOI: 10.3897/neobiota.81.87362.

Lyttek E., *Lal P.*, *Nieddu G.*, *Forgoston E.*, *Wieczerak T.* Modeling *Agrilus planipennis* F. (Coleoptera: Buprestidae) Spread in New Jersey // Journal of Economic Entomology. 2019. Vol. 112, no. 5. P. 2482–2488. DOI: 10.1093/jee/toz122.

Methods of Dendrochronology / eds. E.R. Cook, L.A. Kairiukstis. Dordrecht: Springer Netherlands, 1990. 394 p.

Negrón J.F., *Huckaby L.* Reconstructing historical outbreaks of mountain pine beetle in lodgepole pine forests in the Colorado Front Range // Forest Ecology and Management. 2020. Vol. 473. Art. no. 118270. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118270.

Orlova-Bienkowskaja M.J., *Bieńkowski A.O.* Modeling long-distance dispersal of emerald ash borer in European Russia and prognosis of spread of this pest to neighboring countries within next 5 years // Ecology and Evolution. 2018. Vol. 8, no. 18. P. 9295–9304. DOI: 10.1002/ece3.4437.

Pitt J.P.W. Modelling the spread of invasive species across heteroheneous landscapes: doctoral thesis. Lincoln, New Zealand: Lincoln University, 2008. 228 p.

Ponomarev V.I., *Tolkach O.V.*, *Klobukov G.I.*, *Efremenko A.A.*, *Pashenova N.V.*, *Demidko D.A.*, *Kirichenko N.I.*, *Baranchikov Y.N.* The potential threats posed by the invasive bark beetle *Polygraphus proximus* (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) to a natural park in the Middle Urals (Russia) // Acta Biologica Sibirica. 2024. No. 10. P. 661–675.

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2021.

Roques A., *Shi J.*, *Auger-Rozenberg M-A.*, *Ren L.*, *Augustin S.*, *Luo Y-q.* Are Invasive Patterns of Non-native Insects Related to Woody Plants Differing Between Europe and China? // Front. For. Glob. Change. 2020. Vol. 2. Art.no. 91. DOI: 10.3389/ffgc.2019.00091.

Sakai A.K., *Allendorf F.W.*, *Holt J.S.*, *Lodge D.M.*, *Molofsky J.*, *With K.A.*, *Baughman S.*, *Cabin R.J.*, *Cohen J.E.*, *Ellstrand N.C.*, *McCauley D.E.*, *O'Neil P.*, *Parker I.M.*, *Thompson J.N.*, *Weller S.G.* The Population Biology of Invasive Species // Annu. Rev. Ecol. Syst. 2001. Vol. 32, no. 1. P. 305–332. DOI: 10.1146/annurev.ecolsys.32.081501.114037.

Schiefer F., *Schmidtlein S.*, *Hartmann H.*, *Schnabel F.*, *Kattenborn T.* Large-scale remote sensing reveals that tree mortality in Germany appears to be greater than previously expected // Forestry. 2024. Vol. 98, no. 4. P. 535-549. DOI: 10.1093/forestry/cpae062.

Siegert N.W. McCullough D.G., *Liebhold A.M.*, *Telewski F.W.* Dendrochronological reconstruction of the epicentre and early spread of emerald ash borer in North America // Diversity and Distributions. 2014. Vol. 20, no. 7. P. 847–858. DOI: 10.1111/ddi.12212.

Smith J.M., *Hart S.J.*, *Chapman T.B.*, *Veblen T.T.*, *Schoennagel T.* Dendroecological reconstruction of 1980s mountain pine beetle outbreak in lodgepole pine forests in northwestern Colorado // Écoscience. 2012. Vol. 19, no. 2. P. 113–126. DOI: 10.2980/19-2-3487.

Soto I., *Balzani P.*, *Carneiro L.*, *Cuthbert R.N.*, *Macêdo R.*, *Serhan Tarkan A.*, *Ahmed D.A.*, *Bang A.*, *Bacela-Spychalska K.*, *Bailey S.A.*, *Baudry T.*, *Ballesteros-Mejia L.*, *Bortolus A.*, *Briski E.*, *Britton J.R.*, *Buřič M.*, *Camacho-Cervantes M.*, *Cano-Barbacil C.*, *Copilaș-Ciocianu D.*, *Coughlan N.E.*, *Courtois P.*, *Csabai Z.*, *Dalu T.*, *De Santis V.*, *Dickey J.W.E.*, *Dimarco R.D.*, *Falk-Andersson J.*, *Fernandez R.D.*, *Florencio M.*, *Franco A.C.S.*, *García-Berthou E.*, *Giannetto D.*, *Glavendekic M.M.*, *Grabowski M.*, *Heringer G.*, *Herrera I.*, *Huang W.*, *Kamelamela K.L.*, *Kirichenko N.I.*, *Kouba A.*, *Kourantidou M.*, *Kurtul I.*, *Laufer G.*, *Lipták B.*, *Liu C.*, *López-López E.*, *Lozano V.*, *Mammola S.*, *Marchini A.*, *Meshkova V.*, *Milardi M.*, *Musolin D.L.*, *Nuñez M.A.*,

Oficialdegui F.J., *Patoka J.*, *Pattison Z.*, *Pincheira-Donoso D.*, *Piria M.*, *Probert A.F.*, *Rasmussen J.J.*, *Renault D.*, *Ribeiro F.*, *Rilov G.*, *Robinson T.B.*, *Sanchez A.E.*, *Schwindt E.*, *South J.*, *Stoett P.*, *Verreycken H.*, *Vilizzi L.*, *Wang Y.J.*, *Watari Y.*, *Wehi P.M.*, *Weiperth A.*, *Wiberg-Larsen P.*, *Yapıcı S.*, *Yoğurtçuoğlu B.*, *Zenni R.D.*, *Galil B.S.*, *Dick J.T.A.*, *Russell J.C.*, *Ricciardi A.*, *Simberloff D.*, *Bradshaw C.J.A.*, *Haubrock P.J.* Taming the terminological tempest in invasion science // Biological Reviews. 2024. Vol. 99, no. 4. P. 1357–1390.

Taylor R.A.J. The relationship between density and distance of dispersing insects // Ecological Entomology. 1978. Vol. 3, no. 1. P. 63–70. DOI: 10.1111/j.1365-2311.1978.tb00903.x.

Yemshanov D., *Haight R.G.*, *Koch F.H.*, *Lu B.*, *Venette R.T*, *Lyons D.B.*, *Scarr T.*, *Ryall K.*, *Leung B.* Optimal allocation of invasive species surveillance with the maximum expected coverage concept // Diversity and Distributions. 2015. Vol. 21, no. 11. P. 1349–1359. DOI: 10.1111/ddi.12358.

References

Agafonov L.I., *Gurskaya M.A.*, *Kudryavtsev P.P.* Dendrochronological analysis of damage to tree stands involving *Abies sibirica* Ledeb. by the invasive species *Polygraphus proximus* Blandford in the Taganay National Park. *Monitoring and biological methods of control of pests and pathogens of woody plants: from theory to practice*: proc. of the Fourth All-Russ. conf. with int. part. Moscow-Krasnoyarsk, 2025, pp. 15–16. (In Russ.)

Alekseev V.A., *Zimnitsky P.V.* Statistical data on the biodiversity of wood resources of Russia at the beginning of the 21st century. St. Petersburg: SPbNIILH, 2006. 161 p. (In Russ.)

Aukema J.E., *McCullough D.G.*, *Von Holle B.*, *Liebhold A.M.*, *Britton K.*, *Frankel S.J.* Historical Accumulation of Nonindigenous Forest Pests in the Continental United States. *BioScience*, 2010, vol. 60, no. 11, pp. 886–897. DOI: 10.1525/bio.2010.60.11.5.

Aukema J.E., *Leung B.*, *Kovacs K.*, *Chivers C.*, *Britton K.O.*, *Englin J.*, *Frankel S.J.*, *Haight R.G.*, *Holmes T.P.*, *Liebhold A.M.*, *McCullough D.G.*, *Von Holle B.* Economic Impacts of Non-Native Forest Insects in the Continental United States. *PLoS ONE*, 2011, vol. 6, no. 9, art. no. e24587. DOI: 10.1371/journal.pone.0024587.

Baranchikov Yu.N., *Petko V.M.*, *Astapenko S.A.*, *Akulov E.N.*, *Krivets S.A.* The four-eyed fir bark beetle is a new aggressive pest of fir in Siberia. *Bulletin of the Moscow State Forest University*, 2011, no. 4, pp. 78–81. (In Russ.)

Baranchikov Yu.N., *Demidko D.A.*, *Laptev A.V.*, *Petko V.M.* Dynamics of dying off of Siberian fir trees in the foci of the four-eyed fir bark beetle. *Forest Bulletin*, 2014, no. 6, pp. 132–138. (In Russ.)

Baranchikov Yu.N., *Efremenko A.A.*, *Demidko D.A.*, *Titova V.V.* The four-eyed fir bark beetle *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae)

in the Urals: where, from where and when? *Dendrobiont invertebrates and fungi and their role in forest ecosystems: XI readings in memory of O.A. Kataev*. St. Petersburg, 2020, pp. 74–75. (In Russ.)

Bradshaw C.J.A. Leroy B., *Bellard C*., *Roiz D*., *Albert C*., *Fournier A*., *Barbet-Massin M*., *Salles J.M*., *Simard F*., *Courchamp F.* Massive yet grossly underestimated global costs of invasive insects. *Nat. Commun*., 2016, vol. 7, no. 1, art. no. 12986. DOI: 10.1038/ncomms12986.

Brockerhoff E.G., *Liebhold A.M.* Ecology of forest insect invasions. *Biol. Invasions*, 2017, vol. 19, no. 11, pp. 3141–3159. DOI: 10.1007/s10530-017-1514-1.

Bunn A.A. Dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, 2008, vol. 26, pp. 115–124. DOI: 10.1016/j.dendro.2008.01.002.

Caccianiga M., *Payette S*., *Filion L.* Biotic disturbance in expanding subarctic forests along the eastern coast of Hudson Bay. *New Phytologist*, 2008, vol. 178, no. 4, pp. 823–834. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2008.02408.x.

Crooks J.A., *Soulé M.E.* Lag Times in Population Explosions of Invasive Species: Causes and Implications. *Invasive Species and Biodiversity Management*. Dordrecht, 1999, pp. 103–125.

Cybis.se: Technical writing, software development, dendrochronology. URL: https://cybis.se/ (accessed July 01, 2024).

Dedyukhin S.V., *Titova V.V.* Discovery of the the four-eyed fir bark beetle (*Polygraphus proximus* Blandford, 1894) (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) in Udmurtia. *Russian Journal of Biological Invasions*, 2021, vol. 14, no. 2, pp. 32–39. DOI: 10.35885/1996-1499-2021-14-2-32-39. (In Russ.)

Demidko D.A. Dating of the invasion of the four-eyed fir bark beetle *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera, Curculionidae, Scolytinae) on the territory of the Tomsk region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2014, no. 207, pp. 225–234. (In Russ.)

Eisenhart K.S., *Veblen T.T.* Dendroecological detection of spruce bark beetle outbreaks in northwestern Colorado. *Can. J. For. Res*., 2000, vol. 30, no. 11, pp. 1788–1798. DOI: 10.1139/x00-104.

Efremenko A.A., *Demidko D.A*., *Kudryavtsev P.P*., *Kirichenko N.I*., *Baranchikov Yu.N.* Dendrochronological dating of the invasion of *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) in the Taganay National Park (Chelyabinsk Region). *Readings in memory of Alexey Ivanovich Kurentsov*, 2024, no. 35, pp. 76-86. DOI: 10.25221/kurentzov.35.5. (In Russ.)

Efremenko A.A., *Demidko D.A*., *Kirichenko N.I*., *Shilonosov A.O*., *Baranchikov Yu.N.* Dating of the invasion start of the four-eyed fir bark beetle in the Perm Krai. *Siberian Journal of Forest Science*, 2025, no. 4, pp. 97–104. DOI: 10.15372/SJFS20250410.

Faccoli M., *Gatto P.* Analysis of costs and benefits of Asian longhorned beetle eradication in Italy. *Forestry*, 2016, vol. 89, no. 3, pp. 301–309. DOI: 10.1093/forestry/cpv041.

Forests of the northern and middle taiga of the European part of the USSR / ed. by A.B. Zhukov. Moscow: Nauka, 1966. 458 p. (In Russ.)

Forests of the Urals, Siberia and the Far East / ed. by A.B. Zhukov. Moscow: Nauka, 1969. 768 p. (In Russ.)

Ivanchina L.A., *Rotermel E.E.*, *Bolshakov E.G.*, *Shilonosov A.O.* Influence of forest type on the resistance of fir stands in the southern taiga subzone of Perm Krai to colonization by the four-eyed fir bark beetle. *Geographical Bulletin*, 2025, no. 2 (73), pp. 130–140. DOI: 10.17072/2079-7877-2025-2-130-140. (In Russ.)

Jones K.L., *Shegelski V.A.*, *Marculis N.G.*, *Wijerathna A.N.*, *Evenden M.L.* Factors influencing dispersal by flight in bark beetles (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae): from genes to landscapes. *Canadian Journal of Forest Research*, 2019, vol. 49, no. 9, pp. 1024–1041. DOI: 10.1139/cjfr-2018-0304.

Kareiva P.M. Local movement in herbivorous insects: applying a passive diffusion model to mark-recapture field experiments. *Oecologia*, 1983, vol. 57, no. 3, pp. 322–327. DOI: 10.1007/BF00377175.

Kobzar V.F., *Kolesova N.I.*, *Petrik A.A.* The four-eyed fir bark beetle (*Polygraphus proximus* Blandford, 1894) in fir forests of the "Ozera na Snezhnoy" Ecopark (Irkutsk Region). *Phytosanitary. Plant Quarantine*, 2023, no. 1 (13), pp. 59–71. (In Russ.)

Krivets S.A., *Bisirova E.M.*, *Kerchev I.A.*, *Pats E.N.*, *Chernova N.A.* Transformation of taiga ecosystems in the foci of invasion of the four-eyed fir bark beetle *Polygraphus proximus* Bland. (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) in Western Siberia. *Russian Journal of Biological Invasions*, 2015a, vol. 8, no. 1, pp. 41–63. (In Russ.)

Krivets S.A., *Kerchev I.A.*, *Bisirova E.M.*, *Demidko D.A.*, *Pet'ko V.M.*, *Baranchikov Yu.N.* Distribution of the four-eyed fir bark beetle *Polygraphus proximus* Blandf. (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) in Siberia. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2015b, no. 211, pp. 33–45. DOI: 10.1603/ICE.2016.92728. (In Russ.)

Krivets S.A., *Kerchev I.A.*, *Bisirova E.M.*, *Pashenova N.V.*, *Demidko D.A.*, *Petko V.M.*, *Baranchikov Yu.N.* The bark beetle *Polygraphus proximus* (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) in the forests of Siberia (distribution, biology, ecology, identification and inspection of damaged plantings): methodical manual. Tomsk; Krasnoyarsk: UMIUM, 2015c. 48 p. (In Russ.)

Krivets S.A., *Bisirova E.M.*, *Debkov N.M.*, *Kerchev I.A.* Organization and results of monitoring the condition of Siberian fir in the zone of invasion of the four-eyed fir bark beetle in the Tomsk region. *Forest ecosystems of the boreal zone: biodiversity*, *bioeconomics*, *environmental risks*. Krasnoyarsk, 2019, pp. 214–216. (In Russ.)

Krivets S.A., *Kerchev I.A.*, *Bisirova E.M.*, *Volkova E.S.*, *Astapenko S.A.*, *Efremenko A.A.*, *Kosilov A.Yu.*, *Kudryavtsev P.P.*, *Kuznetsova Yu.R.*, *Ponomarev V.I.*, *Potapkin A.B.*, *Taraskin E.G.*, *Titova V.V.*, *Shilonosov A.O.*, *Baranchikov Yu.N.*

Review of the modern secondary range of the four-eyed fir bark beetle (*Polygraphus proximus* Blandford) in the territory of the Russian Federation. *Russian Journal of Biological Invasions*, 2024, vol. 17, no. 1, pp. 49–69. DOI: 10.35885/1996-1499-17-1-49-69. (In Russ.)

Krylov G.V., *Maradudin I.I.*, *Mikheev N.I.*, *Kozakova N.F.* Fir. Moscow: Agropromizdat, 1986. 239 p. (In Russ.)

Kudryavtsev P.P., *Potapkin A.B.*, *Baeva A.A.*, *Gilev A.V.* New finds of the four-eyed fir bark beetle *Polygraphus proximus* Blandf. in the Chelyabinsk Region. *Dendrobiont invertebrates and fungi and their role in forest ecosystems*: XIII Readings in memory of O.A. Kataev. St. Petersburg, 2024, pp. 62–63. (In Russ.)

Leung B., *Cacho O.J.*, *Spring D.* Searching for non-indigenous species: rapidly delimiting the invasion boundary. *Diversity and Distributions*, 2010, vol. 16, no. 3, pp. 451–460. DOI: 10.1111/j.1472-4642.2010.00653.x.

Liebhold A.M., *Tobin P.C.* Growth of newly established alien populations: comparison of North American gypsy moth colonies with invasion theory. *Popul. Ecol.*, 2006, vol. 48, no. 4, pp. 253–262. DOI: 10.1007/s10144-006-0014-4.

López D.N., *Fuentes-Contreras E.*, *Ruiz C.*, *Ide S.*, *Estay S.A.* A bug's tale: revealing the history, biogeography and ecological patterns of 500 years of insect invasions. *Neobita*, 2023, vol. 81, pp. 183–197. DOI: 10.3897/neobiota.81.87362.

Lyamtsev N.I. Dynamics of four-eyed fir bark beetle foci in Russian forests. *Plant Health and Quarantine*, 2024, no. S4-2 (20), pp. 59–60. (In Russ.)

Lyttek E., *Lal P.*, *Nieddu G.*, *Forgoston E.*, *Wieczerak T.* Modeling *Agrilus planipennis* F. (Coleoptera: Buprestidae) Spread in New Jersey. *Journal of Economic Entomology*, 2019, vol. 112, no. 5, pp. 2482–2488. DOI: 10.1093/jee/toz122.

Methods of Dendrochronology / eds. E.R. Cook, L.A. Kairiukstis. Dordrecht: Springer Netherlands, 1990. 394 p.

Negrón J.F., *Huckaby L.* Reconstructing historical outbreaks of mountain pine beetle in lodgepole pine forests in the Colorado Front Range. *Forest Ecology and Management*, 2020, vol. 473, art. no. 118270. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118270.

Orlova-Bienkowskaja M.J., *Bieńkowski A.O.* Modeling long-distance dispersal of emerald ash borer in European Russia and prognosis of spread of this pest to neighboring countries within next 5 years. *Ecology and Evolution*, 2018, vol. 8, no. 18, pp. 9295–9304. DOI: 10.1002/ece3.4437.

Orlova-Benkovskaya M.J. The European range of the beetle *Agrilus planipennis* (Coleoptera: Buprestidae) is expanding: the zone of mass ash tree mortality has covered the northwestern Moscow region and part of the Tver region. *Russian Journal of Biological Invasions*, 2013, vol. 6, no. 4, pp. 49–58. (In Russ.)

Pitt J.P.W. Modelling the spread of invasive species across heteroheneous landscapes: doctoral thesis. Lincoln, New Zealand: Lincoln University, 2008. 228 p.

Ponomarev V.I., *Tolkach O.V.*, *Klobukov G.I.*, *Efremenko A.A.*, *Pashenova N.V.*, *Demidko D.A.*, *Kirichenko N.I.*, *Baranchikov Y.N.* The potential threats posed by the

invasive bark beetle *Polygraphus proximus* (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) to a natural park in the Middle Urals (Russia). *Acta Biologica Sibirica*, 2024, no. 10, pp. 661–675.

Ponomarev V.I., *Tolkach O.V.*, *Terekhov G.G.*, *Klobukov G.I.*, *Sushentsov O.E.*, *Korlykhanova T.V.* Distribution of the four-eyed fir bark beetle (*Polygraphus proximus* Blandford) in forest plantations of the Sverdlovsk region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 254, pp. 99–111. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.254.99-111. (In Russ.)

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2021.

Roques A., *Shi J.*, *Auger-Rozenberg M-A.*, *Ren L.*, *Augustin S.*, *Luo Y-q.* Are Invasive Patterns of Non-native Insects Related to Woody Plants Differing Between Europe and China? *Front. For. Glob. Change*, 2020, vol. 2, art. no. 91. DOI: 10.3389/ffgc.2019.00091.

Sakai A.K., *Allendorf F.W.*, *Holt J.S.*, *Lodge D.M.*, *Molofsky J.*, *With K.A.*, *Baughman S.*, *Cabin R.J.*, *Cohen J.E.*, *Ellstrand N.C.*, *McCauley D.E.*, *O'Neil P.*, *Parker I.M.*, *Thompson J.N.*, *Weller S.G.* The Population Biology of Invasive Species. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 2001, vol. 32, no. 1, pp. 305–332. DOI: 10.1146/annurev.ecolsys.32.081501.114037.

Schiefer F., *Schmidtlein S.*, *Hartmann H.*, *Schnabel F.*, *Kattenborn T.* Large-scale remote sensing reveals that tree mortality in Germany appears to be greater than previously expected. *Forestry*, 2024, vol. 98, no. 4, pp. 535–549. DOI: 10.1093/forestry/cpae062.

Siegert N.W., *McCullough D.G.*, *Liebhold A.M.*, *Telewski F.W.* Dendrochronological reconstruction of the epicentre and early spread of emerald ash borer in North America. *Diversity and Distributions*, 2014, vol. 20, no. 7, pp. 847–858. DOI: 10.1111/ddi.12212.

Smith J.M., *Hart S.J.*, *Chapman T.B.*, *Veblen T.T.*, *Schoennagel T.* Dendroecological reconstruction of 1980s mountain pine beetle outbreak in lodgepole pine forests in northwestern Colorado. *Écoscience*, 2012, vol. 19, no. 2, pp. 113–126. DOI: 10.2980/19-2-3487.

Soto I., *Balzani P.*, *Carneiro L.*, *Cuthbert R.N.*, *Macêdo R.*, *Serhan Tarkan A.*, *Ahmed D.A.*, *Bang A.*, *Bacela-Spychalska K.*, *Bailey S.A.*, *Baudry T.*, *Ballesteros-Mejia L.*, *Bortolus A.*, *Briski E.*, *Britton J.R.*, *Buřič M.*, *Camacho-Cervantes M.*, *Cano-Barbacil C.*, *Copilaș-Ciocianu D.*, *Coughlan N.E.*, *Courtois P.*, *Csabai Z.*, *Dalu T.*, *De Santis V.*, *Dickey J.W.E.*, *Dimarco R.D.*, *Falk-Andersson J.*, *Fernandez R.D.*, *Florencio M.*, *Franco A.C.S.*, *García-Berthou E.*, *Giannetto D.*, *Glavendekic M.M.*, *Grabowski M.*, *Heringer G.*, *Herrera I.*, *Huang W.*, *Kamelamela K.L.*, *Kirichenko N.I.*, *Kouba A.*, *Kourantidou M.*, *Kurtul I.*, *Laufer G.*, *Lipták B.*, *Liu C.*, *López-López E.*, *Lozano V.*, *Mammola S.*, *Marchini A.*, *Meshkova V.*, *Milardi M.*, *Musolin D.L.*, *Nuñez M.A.*, *Oficialdegui F.J.*, *Patoka J.*, *Pattison Z.*, *Pincheira-Donoso D.*, *Piria M.*, *Probert A.F.*, *Rasmussen J.J.*, *Renault D.*, *Ribeiro F.*, *Rilov G.*, *Robinson T.B.*, *Sanchez A.E.*, *Schwindt E.*, *South J.*, *Stoett P.*, *Verreycken H.*, *Vilizzi L.*, *Wang Y.J.*, *Watari Y.*, *Wehi P.M.*, *Weiperth A.*,

Wiberg-Larsen P., *Yapıcı S.*, *Yoğurtçuoğlu B.*, *Zenni R.D.*, *Galil B.S.*, *Dick J.T.A.*, *Russell J.C.*, *Ricciardi A.*, *Simberloff D.*, *Bradshaw C.J.A.*, *Haubrock P.J.* Taming the terminological tempest in invasion science. *Biological Reviews*, 2024, vol. 99, no. 4, pp. 1357–1390.

Stolbovaya M.V., *Kolpak E.P.*, *Selickaya E.A.*, *Efremova E.A.* Mathematical model of the distribution of the four-eyed fir bark beetle. *Molodoy ucheny*, 2017, no. 1(135), pp. 124–129. (In Russ.)

Taylor R.A.J. The relationship between density and distance of dispersing insects. *Ecological Entomology*, 1978, vol. 3, no. 1, pp. 63–70. DOI: 10.1111/j.1365-2311.1978.tb00903.x.

Yemshanov D., *Haight R.G.*, *Koch F.H.*, *Lu B.*, *Venette R.T*, *Lyons D.B.*, *Scarr T.*, *Ryall K.*, *Leung B.* Optimal allocation of invasive species surveillance with the maximum expected coverage concept. *Diversity and Distributions*, 2015, vol. 21, no. 11, pp. 1349–1359. DOI: 10.1111/ddi.12358.

Материал поступил в редакцию 23.03.2026

Ефременко А.А., Демидко Д.А., Кириченко Н.И., Пономарев В.И., Баранчиков Ю.Н. Инвазия полиграфа уссурийского *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) на Урале // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2026. Вып. 259. С. 73–96. DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.73-96

Первые находки инвайдера на Урале, в Приуралье и Поволжье отмечены с конца 2010-х гг. В республике Удмуртия *P. proximus* был впервые обнаружен в 2019 г., в Пермском крае и Челябинской области – в 2022 г., а в Свердловской области – в 2023 г. По последним данным, в результате маршрутного обследования в июле 2024 г. уссурийский полиграф был обнаружен в лесных насаждениях вдоль автомобильных трасс «Екатеринбург–Серов» и «Екатеринбург–Пермь». В Челябинской области инвайдер выявлен на территории всех лесничеств, имеющих в составе древостоев пихту сибирскую, а также в ряде городских лесов и парков, региональных и федеральных ООПТ. Инвазия в эти регионы почти наверняка произошла значительно раньше. В рамках данной работы нами выполнено датирование инвазии полиграфа уссурийского в сравнительно близко расположенных регионах Урала и Приуралья. В сумме объем материала был получен от 253 максимально давно отмерших из-за короеда деревьев и 90 живых деревьев, необходимых для построения мастер-хронологии. Датировка отпада первых заселенных инвайдером деревьев дала представление о времени, когда произошло внедрение уссурийского полиграфа на обследованную территорию. Скорее всего, инвазия *P. proximus* началась в Удмуртии в 2000-х гг. Самая ранняя гибель деревьев отмечена в Челябинской и Свердловской областях в 2007 г. В Пермском крае гибель деревьев ранее всего отмечена на двух участках

Добрянского лесничества (2011 и 2014 гг.). В Пермь инвайдер пришел существенно позднее: в городских лесах отмирания пихт начались в 2018, 2021 и 2022 гг. Так как от года появления полиграфа на новой территории до гибели от него первого дерева пихты проходит минимум 2-3 года, то следует учитывать этот срок при определении времени инвазии.

Ключевые слова: *Polygraphus proximus*, инвазия, дендрохронологическая датировка.

Efremenko A.A., Demidko D.A., Kirichenko N.I., Ponomarev V.I., Baranchikov Yu.N. Invasion of the four-eyed fir bark beetle (*Polygraphus proximus* Blandford) (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) in the Urals. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2026, iss. 259, pp. 73–96 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.73-96

The first discoveries of the invader in the Urals, the Cis-Urals, and the Volga region were made in the late 2010s. In the Udmurt Republic, *P. proximus* was first detected in 2019, in Perm Krai and Chelyabinsk Oblast in 2022, and in Sverdlovsk Oblast in 2023. According to the latest data, during a route survey in July 2024, *P. proximus* was discovered in forest stands along the Yekaterinburg-Serov and Yekaterinburg-Perm highways. In the Chelyabinsk Oblast, the invader was detected in all forestry sites with Siberian fir stands, as well as in a number of urban forests and parks, and regional and federal protected areas. These regions were almost certainly invided much earlier. As part of this study, we dated the invasion of *P. proximus* the Urals and Cis-Urals. In earliest total, data were obtained for 253 trees killed by the bark beetle, and 90 living trees, which were necessary for constructing a master chronology. Dating the mortality of the first trees colonized by the invader provided an idea of the time when *P. proximus* entered the surveyed area. The invasion of *P. proximus* most likely began in Udmurtia in the 2000s. The earliest tree mortality was recorded in the Chelyabinsk and Sverdlovsk Oblast in 2007. In Perm Krai, tree mortality was earliest recorded in two sites of the Dobryanskoye forestry (2011 and 2014). The invader arrived in Perm significantly later: fir dieback in urban forests began in 2018, 2021, and 2022. Since at least 2-3 years usually passe between the *Polygraphus proximus* arrival in a new area and the death of the first fir tree, this period should be taken into account when determining the date of invasion.

Keywords: *Polygraphus proximus*, invasion, dendrochronological dating.

ЕФРЕМЕНКО Антон Андреевич – научный сотрудник лаборатории лесной зоологии Института леса им. В.Н. Сукачева ФИЦ КНЦ СОРАН. SPIN-код: 9008-1794. ORCID: 0000-0002-9715-8546. Scopus AuthorID: 57950105900. WoS ResearcherID: GPP-2658-2022.

660036, Академгородок, д. 50/28, г. Красноярск, Россия. E-mail: efremenko2@mail.ru

EFREMENKO Anton A. – Researcher, Department of Forest Zoology, V.N. Sukachev Institute of Forest of the Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS. SPIN-code: 9008-1794. ORCID: 0000-0002-9715-8546. Scopus AuthorID: 57950105900. WoS ResearcherID: GPP-2658-2022.

660036. Akademgorodok 50/28. Krasnoyarsk. Russia. E-mail: efremenko2@mail.ru

ДЕМИДКО Денис Александрович – научный сотрудник лаборатории лесной зоологии Института леса им. В.Н. Сукачева ФИЦ КНЦ СО РАН, кандидат биологических наук. SPIN-код: 1579-0843. ORCID: 0000-0001-6538-9828. Scopus AuthorID: 14622168900. WoS ResearcherID: FIF-6936-2021.

660036, Академгородок, д. 50/28, г. Красноярск, Россия. E-mail: sawer_beetle@mail.ru

DEMIDKO Denis A. – PhD (Biological), Researcher, Department of Forest Zoology, V.N. Sukachev Institute of Forest of the Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS. SPIN-code: 1579-0843. ORCID: 0000-0001-6538-9828. Scopus AuthorID: 14622168900. WoS ResearcherID: FIF-6936-2021.

660036. Akademgorodok 50/28. Krasnoyarsk. Russia. E-mail: sawer_beetle@mail.ru

КИРИЧЕНКО Наталья Ивановна – ведущий научный сотрудник лаборатории лесной зоологии Института леса им. В.Н. Сукачева ФИЦ КНЦ СО РАН, доктор биологических наук. SPIN-код: 8657-5169. ORCID: 0000-0002-7362-6464. Scopus AuthorID: 7005900658. WoS ResearcherID: K-1387-2018.

660036, Академгородок, д. 50/28, г. Красноярск, Россия. E-mail: nkirichenko@yahoo.com

KIRICHENKO Natalia I.– DSc (Biological), Leading Researcher, Department of Forest Zoology, V.N. Sukachev Institute of Forest of the Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS. SPIN-code: 8657-5169. ORCID: 0000-0002-7362-6464. Scopus AuthorID: 7005900658. WoS ResearcherID: K-1387-2018.

660036. Akademgorodok 50/28. Krasnoyarsk. Russia. E-mail: nkirichenko@yahoo.com

ПОНОМАРЕВ Василий Иванович – заведующий лабораторией лесовосстановления, защиты леса и лесопользования Ботанического сада УрО РАН, доктор биологических наук. ORCID: 0000-0002-2901-2764. Scopus AuthorID: 55435087900.

620134, ул. 8 Марта, д. 202а, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: v_i_ponomarev@mail.ru

PONOMAREV Vasily I. – DSc (Biological), Department Head, Department of Reforestation, Forest Protection and Forest Management, Botanical Garden of the Urals Branch of the RAS. ORCID: 0000-0002-2901-2764. Scopus AuthorID: 55435087900.

620134. 8 Marta str. 202a. Yekaterinburg. Russia. E-mail: v_i_ponomarev@mail.ru

БАРАНЧИКОВ Юрий Николаевич – заведующий лабораторией лесной зоологии Института леса им. В.Н. Сукачева ФИЦ КНЦ СО РАН, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник. SPIN-код: 4317-7018. ORCID: 0000-0002-2472-7242. Scopus AuthorID: 6505865279. WoS ResearcherID: K-1112-2018.

660036, Академгородок, д. 50/28, г. Красноярск, Россия. E-mail: ynbar@bk.ru

BARANCHIKOV Yuriy N. – PhD (Biological), Head of the Department of Forest Zoology, V.N. Sukachev Institute of Forest of the Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS, Senior Researcher. SPIN-code: 4317-7018. ORCID: 0000-0002-2472-7242. Scopus AuthorID: 6505865279. WoS ResearcherID: K-1112-2018.

660036. Akademgorodok 50/28. Krasnoyarsk. Russia. E-mail: ynbar@bk.ru

УДК 504.064.36.574

В.Т. Ярмишко, О.В. Игнатьева

ВИТАЛИТЕТНАЯ СТРУКТУРА ВТОРИЧНЫХ СОСНЯКОВ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА

Введение. Лес никогда не бывает стабильным. Структура ценопопуляций древесных растений формируется под влиянием экологических, ценотических и антропогенных воздействий. Под влиянием внешних сил меняются условия местообитания, и, как следствие, возникает измененная модель биотической сукцессии, имеющей устойчивое состояние. Оно не является конечным в том смысле, что не будет изменяться по составу и структуре [Спурр, Барнес, 1984]. Устойчивость отдельных деревьев, в свою очередь, тесно связана с площадью питания и освещенностью крон. Биологическое значение густоты для самого насаждения определило появление понятия биологического оптимума, при котором древостой наиболее полно использует ресурсы и приспосабливается к условиям окружающей среды [Рябоконь, 1997]. Так, по данным автора, дифференциация деревьев в лесу является приоритетной из форм взаимодействия между деревьями. В густых насаждениях этот процесс начинается раньше и проходит интенсивнее, чем в разреженных, что приводит к быстрому переходу части деревьев из верхнего полога в ярус деревьев, отстающих в развитии.

Задача настоящих исследований вторичных сосняков лишайниковых и зеленомошно-лишайниковых III-IV классов возраста на Кольском полуострове состояла в оценке их виталитетной структуры в условиях изменяющейся окружающей среды под воздействием природных и антропогенных факторов. Одним из важных вопросов была оценка реакций сосны обыкновенной на существенное снижение выбросов в окружающую среду SO_2 и полиметаллической пыли промышленными предприятиями в центральной части Кольского полуострова.

Материалы и методика исследования. Исследования проводились в лишайниковых и зеленомошно-лишайниковых вторичных сосновых лесах III-IV классов возраста, расположенных на различном расстоянии от источников эмиссии в пределах трех зон: фоновой, буферной и импактной (названия зон приведены в соответствии с номенклатурой ЮНЕП) [Global…1973].

В каждой зоне были заложены серии постоянных пробных площадей (ППП) (рис. 1). Особое внимание уделялось исследованиям древостоев сообществ сосны обыкновенной в фоновых районах, где практически отсутствует влияние антропогенных факторов, в частности промышленного загрязнения.

В центральной части Кольского полуострова с 1939 г. осуществляется производство цветных металлов комбинатом «Североникель» (г. Мончегорск). Наибольшее количество выбросов промышленных отходов в окружающую среду было зафиксировано в период с 1973 по 1992 гг. – 230 тыс. т/год SO_2 и 16 тыс. т/год мелкодисперсной полиметаллической пыли, содержащей смесь сульфидов и оксидов Cu, Ni, Co и др. [Позняков, 1999]. С конца 1990-х гг. на комбинате осуществлялась модернизация очистных сооружений, что привело к устойчивому снижению промышленных отходов.

Рис. 1. Схема размещения пробных площадей в сосновых лесах в центральной части Кольского полуострова (Мурманская область)

Fig 1. Layout of test areas in pine forests in the central part of the Kola Peninsula (Murmansk region)

В результате к началу XXI века отмечено 3–6-кратное сокращение объемов загрязняющих веществ по сравнению с их максимальными величинами. При этом ежегодный объем выбросов оставался относительно стабильным и составлял в среднем 40 тыс. т SO_2 и 5,2 тыс. т твердых веществ [Ярмишко и др., 2009; Кольская..., 2023].

Методика подбора, закладки ППП и детальных исследований древесной растительности описана нами в более ранних работах [Ярмишко, 1997; Методы..., 2002; Ярмишко и др., 2009; Евдокимов, Ярмишко, 2023]. Краткая характеристика древесного яруса исследованных сообществ *Pinus sylvestris* L. на основных ключевых участках приведена ниже, в табл. 1.

Таблица 1

Краткая таксационная характеристика древесного яруса исследуемых вторичных сосняков на ключевых пробных площадях на Кольском полуострове

Brief taxational characteristics of the tree tier of the studied secondary pine forests in key trial areas on the Kola Peninsula

№№ п/п	Место расположения ППП, координаты	Высота над уровнем моря, м; экспозиция и уклон, °	Расстояние до источника загрязнения, км	Состав древостоя	Средние таксационные характеристики древостоев					Класс бонитета
					Высота, м	Диаметр, см	Возраст, лет	Количество деревьев, шт./га	Запас древесины, $м^3$/га	
Фоновая зона										
1	N:67°33.227' E:31°04.751'	180; ЮЗ, 3°	70	10 С	8,5	10,1	50	1750	22,3	V
2	N:67°35.356' E:31°39.159'	161; ЮЗ, 2-3°	60	10 С	8,0	8,3	60	5273	47,5	V
Буферная зона										
3	N:67°38.168' E:32°42.234'	177; ЮЗ, 5°	35	10 С	8,1	7,9	70	1852	32,0	V
Импактная зона										
4	N:67°49.216' E:32.46.447'	175; ЮЗ, 4°	8	10 С	3,2	3,4	60	5300	10,1	V-a
5	N:68°00.384' E:32°55.540'	198; ЮЗ, 10°	10	10 С, ед. Б	4,3	5,1	70	5450	21,8	V-a

В напочвенном покрове исследованных сосняков доминирующими видами в травяно-кустарничковом ярусе являются *Vaccinium myrtillus* L., *V. vitis-idaea* L., *Empetrum hermaphroditum* Hagerup. Мохово-лишайниковый ярус формируют лишайники рода *Cladonia* (*Cl. stellaris* (Opiz.) Brodo; *Cl. rangiferina* (L.) Nyl., *Cl. mitis* (Sandst.) Hustich), а среди мхов чаще всего встречаются *Pohlia nutans* (Hedw.) Lindb. и *Hepaticae* spp.

На каждой ППП выполнен сплошной перечет деревьев; измерены и детально описаны кроны, оценено их состояние; установлен возраст хвои и степень возможных повреждений; определено жизненное состояние всех особей *Pinus sylvestris*, входящих в состав древесного яруса [Методы…,

2002]. Для определения возраста и анализа радиального прироста древесины у модельных деревьев отбирали образцы древесины (керны) буравом Пресслера или спилы стволов. Керны древесины обрабатывали на полуавтоматическом приборе LINTAB-6.

Продолжительность жизни хвои *P. sylvestris* определялась у 100–120 особей в верхней (8-10 мутовка) и нижней (18–20 мутовка) частях кроны с южной стороны на 3-5 побегах II порядка ветвления. Оценка площади повреждения хвои хлорозами и некрозами выполнена с помощью бинокулярной лупы МБС-9 на основе анализа 100 пар хвоинок, отобранных с побегов II порядка ветвления у 5-7 деревьев (смешанный образец) на каждой пробной площади [Методы…, 2002].

Статистическую обработку данных проводили методами дисперсионного и регрессионного анализов [Зайцев, 1984].

Результаты исследования. Исследованные производные сосняки лишайниковые и зеленомошно-лишайниковые III–IV классов возраста в фоновых районах на вырубках характеризуются хорошим ростом и развитием, деревья равномерно распределены по площади, их количество достигает в среднем 4–4,5 тыс. шт./га. Анализ данных по росту и развитию сосны обыкновенной показывает, что в первые 12–15 лет жизни она характеризуется достаточно интенсивным приростом в высоту и по диаметру. В дальнейшем, по мере развития молодых сообществ, интенсивность прироста сосны обыкновенной заметно снижается [Ярмишко, Игнатьева, 2021]. Анализ многочисленных данных свидетельствуют о том, что исследуемые сосняки в фоновых районах обладают свойствами самовозобновления, активным накоплением фитомассы, относительно хорошим плодоношением и устойчивостью к внешним факторам окружающей среды [Ярмишко, Игнатьева, 2021; Евдокимов, Ярмишко, 2023].

В этих условиях визуальные признаки повреждения хвои и крон деревьев практически отсутствуют, поэтому в виталитетных спектрах сосновых древостоев абсолютно доминировали здоровые особи на протяжении всего периода наблюдений (70-80%). Доля ослабленных особей варьировала от 13 до 17%, а сильно ослабленных – не превышала 5-6% (рис. 2, 3). Едва заметное ухудшение состояния сосновых древостоев в последние годы можно объяснить некоторым изменением погодных условий, усугублением фитоценотических взаимоотношений видов в ценозах с возрастом и другими причинами. Отпад в древостоях формируется из угнетенных, отставших в росте тонкомерных особей сосны (рис. 2, 3).

Рис. 2. Распределение древостоев сосны IV класса возраста по ступеням толщины и категориям жизненного состояния в фоновом Ено-Ковдорском районе на Кольском полуострове

Fig. 2. Distribution of stands of pine of about IV age class according to thickness levels and categories of living condition in the background area of Kovdorsky district on the Kola Peninsula

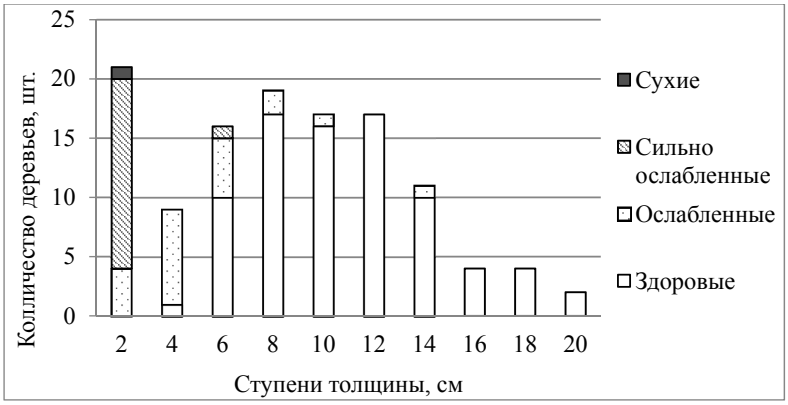


Рис. 3. Распределение древостоев сосны III класса возраста по ступеням толщины и категориям жизненного состояния в фоновом Уполокшском районе на Кольском полуострове

Fig. 3. Distribution of stands of pine of about III class of age by thickness levels and categories of living condition in the background Upolokshsky district on the Kola Peninsula

Таким образом, весь комплекс наблюдаемых в фоновых условиях изменений жизненного состояния деревьев и древостоев в исследуемых зеленомошно-лишайниковых средневозрастных сосновых лесах отражает естественные сукцессионные процессы при восстановлении сообществ на нарушенных территориях (вырубки, пожары).

В районе среднего уровня техногенного загрязнения (в буферной зоне, расположенной в 35 км от основного источника эмиссии) содержание кислот растворимых форм Ni и Cu в верхних горизонтах почвы до 1997 г. превышало фоновые значения в 4–8 раз [Ярмишко и др., 2009], а суммарное содержание этих металлов в хвое *P. sylvestris* было в 5–10 раз больше, чем в фоновых сообществах. По данным исследований, в 2008 г. их содержание снизилось в 3 раза по отношению к максимальным значениям, зарегистрированным в 1984–1988 гг. [Ярмишко и др., 2011]. Между суммарной концентрацией Ni и Cu в хвое *P. sylvestris* и объемом выбросов твердых веществ комбината «Североникель» существовала линейная связь: $r = 0{,}93$, $n = 6$, $P < 0{,}05$, где r – коэффициент корреляции; n – число наблюдений; P – уровень значимости.

Продолжительность жизни хвои *P. sylvestris* в рассматриваемом районе в 1982–1990 гг. была достоверно ниже, чем в фоновых условиях, и составляла в среднем 4 года. При этом преобладание неповрежденной хвои (64%) зарегистрировано только для 1–2-летнего возраста. У большей части трехлетней хвои (56%) площадь повреждения составляла 1–5%. С увеличением возраста хвои уменьшается доля здоровой хвои и возрастает площадь повреждений: 50% четырехлетней хвои было покрыто хлорозами и некрозами, занимающими 6-10% всей поверхности; незначительная часть хвои (2–3%) имела некрозы красно-коричневого цвета, а здоровая хвоя отсутствовала. Исследования, проведенные в 2014–2021 гг., показали, что в пределах буферной зоны основная часть хвои *P. sylvestris* однолетнего возраста (93–98%) не имела следов повреждения. Пятнистые хлорозы и точечные некрозы микроскопических размеров, занимающие 1–5% поверхности, встречались только у незначительной части (около 6%) хвои 2–3-летнего возраста. В 2014–2021 гг. состояние хвои как по продолжительности жизни, так и по степени повреждения практически достигло фоновых значений. Между продолжительностью жизни хвои *P. sylveslris* и ежегодным объемом атмосферных выбросов сернистого ангидрида и твердых веществ отмечается отрицательная связь: ($r = -1$ и $-0{,}97$, $n = 4$, $P < 0{,}05$). Взаимосвязь между содержанием тяжелых металлов в хвое *P. sylvestris* и продолжительностью ее жизни не установлена.

Результаты исследований виталитетной структуры сообществ сосны обыкновенной в буферной зоне свидетельствуют о том, что в 1981–1982 гг. доля здоровых особей не превышала 50%, ослабленных – 31%, сильно ослабленных и усыхающих – 19%. К началу 1990-х гг. состояние древостоев сосны заметно ухудшилось: доля здоровых особей составляла 10–12%, ослабленных – ~ 50%, а сильно ослабленных и усыхающих деревьев – 20–25%. При этом доля сухих деревьев возросла в 10 раз по сравнению с таковой в 1982 г. [Ярмишко, 1997].

Рис. 4. Распределение древостоев сосны IV класса возраста по ступеням толщины и категориям жизненного состояния в буферной зоне (средний уровень загрязнения) в Чунозерском районе на Кольском полуострове

Fig. 4. Distribution of stands of pine of about IV age class according to thickness levels and categories of living condition in the buffer zone (average pollution level) in the Chunozersky district on the Kola Peninsula

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что в зоне средних уровней техногенного загрязнения ослабление деревьев сосны обыкновенной еще не достигло того критического значения, за которым эдификаторная роль древесного яруса теряет свое значение в сообществе. Ранее отмечалось, что в случае существенного снижения или прекращения загрязнения окружающей среды в рассматриваемом районе возможно восстановление сосновых лесов естественным путем. Результаты исследований, проводимых в последние годы, подтвердили наши предположения. Так, на фоне 4–6-кратного снижения среднегодовых объемов выбросов загрязняющих веществ «Североникелем» с начала 2000-х гг. значения продолжительности жизни хвои приблизились к фоновым показателям [Евдокимов, Ярмишко, 2023],

интенсивность ее повреждения также заметно уменьшилась [Yarmishko, Ignateva, 2024]. Снижение пресса на лесные сообщества и, как следствие, улучшение состояния ассимиляционных органов привели к увеличению доли здоровых особей в виталитетном спектре, которая в 2014–2021 гг. стала достигать 60% (рис. 4). Возрастание доли здоровых деревьев произошло за счет перехода части ослабленных и сильно ослабленных особей в категорию здоровых. В результате доля ослабленных деревьев на ППП снизилась по сравнению с таковой в 1990 г. и составила около 18%, а число сильно ослабленных особей уменьшилось почти до 13,7% вследствие перехода части деревьев в более высокие категории жизненного состояния.

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что в буферной зоне динамика состояния древесного яруса определяется синергичным воздействием атмосферных выбросов комбината «Североникель», внутрипопуляционными взаимоотношениями в ценозе с возрастом и климатическими изменениями.

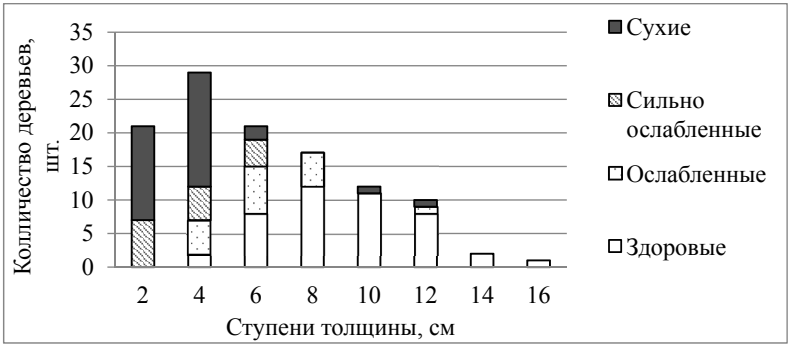


Рис. 5. Виталитетная структура древостоев сосны IV класса возраста в импактной зоне (Мончегорский р-он) на Кольском полуострове

Fig. 5. Vital structure of stands of pine of about IV class of age in the impact zone (Monchegorsky district) on the Kola Peninsula

В районах сильного загрязнения (импактная зона) для динамики содержания кислот растворимых форм тяжелых металлов в органогенном горизонте почв в период исследований были характерны независимые от режима атмосферных выбросов флуктуации [Лянгузова, 2010]. Максимальные концентрации тяжелых металлов в хвое *P. sylvestris*, в 20-40 раз превышающие фоновые значения, были зарегистрированы в 1984–1988 гг., а минимальные

(в 10–20 раз выше, чем фоновые) отмечались в 2005–2008 гг. [Ярмишко и др., 2009]. Коэффициент корреляции между содержанием Ni и Cu в хвое P. sylvestris и ежегодным объемом выбросов твердых веществ составлял $r = 0,95$ ($n = 6$, $P < 0,05$). Снижение суммарной концентрации Ni и Cu в ассимиляционных органах *P. sylvestris* обусловлено уменьшением доли их воздушного поступления, так как уровень загрязнения верхнего горизонта почвы остается достаточно высоким. Следует отметить, что установленная связь гораздо теснее в районе сильного загрязнения, чем в условиях умеренного промышленного загрязнения. Здесь рост и развитие отдельных деревьев и древостоев сосны обыкновенной в большей степени зависят от интенсивности загрязнения окружающей среды диоксидом серы и окислами тяжелых металлов, чем от других природных и антропогенных факторов в регионе.

Продолжительность жизни хвои *P. sylvestris* в импактной зоне за период наблюдений варьировала от 1,4 до 4,6 года. Минимальные значения были зарегистрированы в 1987 г., максимальные – в 2014–2021 гг. Динамика продолжительности жизни хвои характеризуется отрицательной связью с объемом выбросов сернистого ангидрида и твердых веществ (в обоих случаях $r = -1$, $n = 4$, $P < 0, 05$).

В 1988 г. неповрежденной была только однолетняя хвоя *P. sylvestris*, доля которой составляла 25%. Двух- и трехлетняя хвоя по степени поврежденности практически не различались между собой (повреждения составляли 20-40%). В 2008 г. доля неповрежденной хвои *P. sylvestris* последовательно снижалась с увеличением возраста и составляла 74%, 55% и 12% для 1–3-летней хвои соответственно. При этом у поврежденной хвои площадь хлорозов и некрозов не превышала 10%. В целом, несмотря на значительное улучшение состояния ассимиляционного аппарата *P. sylvestris* к концу периода исследований (2014–2021 гг.), продолжительность ее жизни была ниже фоновых значений, а степень повреждения – выше.

В течение всего периода наблюдений в импактной зоне древесный ярус характеризовался высокой степенью угнетенности. Как и в буферной зоне, наихудшее состояние эдифицирующей синузии исследуемых лесных сообществ было отмечено через 15 лет после достижения объемами ежегодных выбросов максимальных значений, наблюдавшихся с 1973 по 1992 гг. На фоне последующего снижения аэротехногенной нагрузки состояние древесного яруса сосновых лесов стало постепенно улучшаться. Важно отметить, что в 2005 г. впервые в импактной зоне было зарегистрировано появление в древесном ярусе условно здоровых особей *P. sylvestris*, доля которых составляла 20–25%.

Результаты анализа виталитетной структуры сообществ сосны обыкновенной в импактной зоне свидетельствуют о том, что в начале наших исследований и до конца 1980-х гг. здоровых особей сосны в составе древостоя обнаружено не было, ослабленные составляли 6–8%, сильно ослабленные – 42-43%. Затем на фоне снижения аэротехногенного загрязнения с 1990 до 2005 гг. состояние древостоев сосны стало заметно улучшаться, и к 2014 г. число условно здоровых особей составляло уже около 40%, а на долю ослабленных и сильно ослабленных экземпляров приходилось 16% и 14% соответственно (рис. 5). При этом сухие особи в древостое доминировали (~31%). Исследования последних лет не обнаружили существенного улучшения санитарного состояния сообществ *P. sylvestris*. Наблюдались переходы особей одних категорий в более высокие, что в конечном итоге оказывало положительное влияние на общее состояние исследуемых сообществ сосны обыкновенной в импактной зоне.

Заключение. В силу особенностей лесообразовательных процессов на вырубках для молодняков сосны обыкновенной характерна высокая однородность пространственной структуры и одновозрастность деревьев. К моменту формирования древесного полога молодняки различались густотой, сомкнутостью и состоянием. Именно в молодняках была наиболее выражена диспропорция между густотой, полнотой и сомкнутостью. Это явление объяснимо равномерностью размещения деревьев и узкокронностью сосны на Кольском Севере. Еще одной особенностью густых молодых древостоев является замедленность в них процессов естественного отпада. Исследованиями установлено, что в фоновых районах виталитетная структура древесного яруса в зеленомошно-лишайниковых вторичных сосновых лесах отражает естественные сукцессионные процессы при восстановлении сообществ на вырубках. В этих условиях визуальные признаки повреждения деревьев практически отсутствуют, поэтому в виталитетных спектрах сосновых древостоев на протяжении всего периода наблюдений доминировали здоровые особи.

В районе средних уровней техногенного загрязнения (буферная зона) наблюдается заметное ослабление жизненного состояния деревьев сосны обыкновенной. Однако оно еще не достигло того критического значения, за которым эдификаторная роль древесного яруса теряет свое значение в сообществе. Ранее отмечалось [Ярмишко и др., 2011], что в случае существенного снижения или прекращения загрязнения окружающей среды в рассматриваемом районе возможно восстановление сосновых лесов естественным путем. Результаты исследований, проводимых в последние годы,

подтвердили наши предположения. Снижение пресса на лесные сообщества и, как следствие, улучшение состояния надземных органов древесных растений привели к увеличению доли здоровых особей в виталитетном спектре, которая в 2014–2021 гг. достигла 60%.

В районах сильного загрязнения окружающей среды (импактная зона) древесный ярус исследованных сосняков характеризовался высокой степенью угнетенности. Исследования последних лет не обнаружили существенного улучшения санитарного состояния сообществ *P. sylvestris*. Наблюдались переходы особей одних категорий в более высокие, что в конечном итоге оказывало положительное влияние на общее состояние исследуемых сообществ в импактной зоне.

В заключение можно отметить, что на фоне наблюдаемых естественных флуктуаций жизненного состояния древесного яруса сосны обыкновенной на Кольском Севере отмечены его существенные изменения под воздействием атмосферных загрязнителей. Динамика эдифицирующей синузии вторичных лесов *P. sylvestris* в фоновых условиях центральной части Кольского полуострова обусловлена естественными сукцессионными процессами, в буферной и импактной зонах – режимом промышленных атмосферных выбросов.

Сведения о финансировании исследования. Работа выполнена по государственному заданию отдела Ботанический сад Петра Великого по плановой теме «История создания, состояние, потенциал развития живых коллекций растений Ботанического сада Петра Великого БИН РАН», регистрационный номер: 124020100075-2.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Зайцев Г.И. Математическая статистика в экспериментальной ботанике. М.: Наука, 1984. 424 с.

Евдокимов А.С., *Ярмишко В.Т.* Структура древесного яруса лесных сообществ центральной части Кольского полуострова, формируемая при снижении аэротехногенной эмиссии // Вестник Российского университета дружбы народов. Сер.: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2023. Т. 31, №1. С. 115–126. DOI: 10.22363/2313-2310-31-1-116-126.

Кольская ГМК: официальный сайт. URL: http://www.kolagmk.ru/ (дата обращения: 15.12.2023).

Лянгузова И.В. Толерантность компонентов лесных экосистем Севера России к аэротехногенному загрязнению: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. СПб., 2010. 43 с.

Методы изучения лесных сообществ. СПб.: СПбГУ, 2002. 240 с.

Позняков В.Я. Североникель. М.: Руда и металлы, 1999. 432 с.

Рябоконь А.П. Структурно-функциональная организация и антропогенная динамика сосняков различного целевого назначения на Восточной Украине // Лесной журнал. 1997. №3. С. 36-44.

Спурр С. Г., *Барнес Б.В.* Лесная экология. Пер. с 3-го англ. изд. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 479 с.

Ярмишко В.Т. Сосна обыкновенная и атмосферное загрязнение на Европейском Севере. СПб.: Изд-во НИИ химии СПбГУ, 1997. 210 с.

Ярмишко В.Т., *Игнатьева О.В.* Сообщества *Pinus sylvestris* L. в техногенной среде на Европейском Севере России: структура, особенности роста и состояние // Сибирский лесной журнал. 2021. №3. С. 44–55. DOI: 10.15372/SJFS20210305.

Ярмишко В.Т., *Баккал И.Ю.*, *Борисова О.В.*, *Горшков В.В.*, *Катютин П.Н.*, *Лянгузова И.В.*, *Мазная Е.А.*, *Ставрова Н.И.*, *Ярмишко М.А.* Динамика лесных сообществ Северо-Запада России. СПб.: ВВМ, 2009. 276 с.

Ярмишко В.Т., *Горшков В.В.*, *Лянгузова И.В.*, *Баккал И.Ю.* Экологический мониторинг лесных экосистем Кольского полуострова в условиях аэротехногенного загрязнения // Региональная экология. 2011. №1-2 (31). С. 21-29.

Global Environmental Monitoring Systems (GEMS). SCOPE Report 3. Toronto, 1973. 74 p.

Yarmishko V.T., *Ignateva O.V.* Scots pine (*Pinus sylvestris* L) in a changing environment in the Kola North // Scientific research of the SCO countries: synergy and integration: mat. of sci. conf. Bejing, 2024. P. 87-93.

References

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 Peoples' Friendship University of Russia. Ser.: Ecology and life safety*, 2023, vol. 31, no. 1, pp. 115-126. DOI: 10.22363/2313-2310-31-1-116-126. (In Russ.)

Global Environmental Monitoring Systems (GEMS). SCOPE Report 3. Toronto, 1973. 74 p.

Kola MMC: official website. URL: http://www.kolagmk.ru / (accessed December 15, 2023).

Lyanguzova I.V. Tolerance of components of forest ecosystems of the North of Russia to aerotechnogenic pollution: author's abstract. Diss. … Dr. Biol. Sci. St. Petersburg, 2010. 43 p. (In Russ.)

Methods of studying forest communities. St. Petersburg: St. Petersburg State University, 2002. 240 p. (In Russ.)

Poznyakov V.Ya. Severonickel (pages of the history of the Severonickel Combine). Moscow: Ore and Metals, 1999. 432 p. (In Russ.)

Ryabokon A.P. Structural and functional organization and anthropogenic dynamics of pine forests for various purposes in Eastern Ukraine. *Lesnoy zhurnal*, 1997, no. 3, pp. 36–44. (In Russ.)

Spurr S.G., *Barnes B.V.* Forest ecology. Transl. from the 3rd English ed. Moscow: Lesn. prom-st', 1984. 479 p. (In Russ.)

Yarmishko V.T. Scots pine and atmospheric pollution in the European North. St. Petersburg: Publ. House of the St. Petersburg State University Institute of Chemistry, 1997. 210 p. (In Russ.)

Yarmishko V.T., *Ignatieva O.V.* Communities of *Pinus sylvestris* L. in the anthropogenic environment in the European North of Russia: structure, features of growth and condition. *Siberian Forest Journal*, 2021, no. 3, pp. 44–55. DOI: 10.15372/SJFS20210305. (In Russ.)

Yarmishko V.T., *Ignateva O.V.* Scots pine (*Pinus sylvestris* L) in a changing environment in the Kola North. *Scientific research of the SCO countries: synergy and integration*: mat. of sci. conf. Bejing, 2024, pp. 87-93.

Yarmishko V.T., *Bakkal I.Yu.*, *Borisova O.V.*, *Gorshkov V.V.*, *Katyutin P.N.*, *Lyanguzova I.V.*, *Maznaya E.A.*, *Stavrova N.I.*, *Yarmishko M.A.* Dynamics of forest communities in the North-West of Russia. St. Petersburg: VVM, 2009. 276 p. (In Russ.)

Yarmishko V.T., *Gorshkov V.V.*, *Lyanguzova I.V.*, *Bakkal I.Yu.* Ecological monitoring of forest ecosystems of the Kola Peninsula under conditions of aerotechnogenic pollution. *Regional ecology*, 2011, no. 1-2 (31), pp. 21-29. (In Russ.)

Zaitsev G.I. Mathematical statistics in experimental botany. Moscow: Nauka, 1984. 424 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 24.06.2025

Ярмишко В.Т., Игнатьева О.В. Виталитетная структура вторичных сосняков в центральной части Кольского полуострова // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2026. Вып. 259. С. 97–110. DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.97-110

Исследована виталитетная структура эдифицирующей синузии вторичных сосняков лишайниковых и зеленомошно-лишайниковых III-IV классов возраста в центральной части Кольского полуострова (Мурманская обл.). Установлено, что в фоновых районах виталитетная структура древесного яруса отражает естественные сукцессионные процессы при восстановлении сообществ после внешних нарушений (рубки, пожары). На фоне наблюдаемых естественных флуктуаций жизненного состояния древесного яруса сообществ *P. sylvestris* отмечены существенные изменения его под воздействием атмосферных загрязнителей – от угнетения роста и развития деревьев до их гибели.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, виталитетная структура, древостой, промышленное загрязнение, Кольский полуостров.

Yarmishko V.T., Ignatieva O.V. Vital structure of secondary pine forests in the central part of the Kola Peninsula. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2026, iss. 259, pp. 97–110 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.97-110

The vital structure of the edifying synusion of secondary lichen and moss-lichen pine forests of III-IV age classes in the central part of the Kola Peninsula (Murmansk region) has been studied. It has been established that in background areas the vital structure of the tree layer reflects natural successional processes during the restoration of communities after external disturbances (logging, fires). Against the background of the observed natural fluctuations in the vital state of the tree layer of *P. sylvestris* communities, significant changes in it were noted under the influence of atmospheric pollutants, from inhibition of tree growth and development to their death.

K e y w o r d s : common pine, vital structure, stand of trees, industrial pollution, Kola Peninsula.

ЯРМИШКО Василий Трофимович – профессор кафедры ботаники и дендрологии Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

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

заведующий отделом «Ботанический сад Петра Великого» Ботанического института им В.Л. Комарова РАН, доктор биологических наук. SPIN-код: 4483-9930. ORCID: 0000-0001-6893-4748.

197022, ул. Профессора Попова, д. 2, лит. В, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: vasiliyarmishko@yandex.ru

YARMISHKO Vasily T. – DSc (Biological), Professor, Department of Botany and Dendrology, St.Petersburg State Forest Technical University;

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

Head of the Peter the Great Botanical Garden Department, V.L. Komarov Botanical Institute of the RAS. SPIN-code: 4483-9930. ORCID: 0000-0001-6893-4748.

197022. Professora Popova str. 2. Let. V. St. Petersburg. Russia. E-mail: vasiliyarmishko@yandex.ru

ИГНАТЬЕВА Оксана Васильевна – заведующий кафедрой ботаники и дендрологии Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат биологических наук, доцент. SPIN-код: 8410-9354. ORCID: 0009-0004-1082-5222

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

IGNATIEVA Oksana V. – PhD (Biological), Head of the Department of Botany and Dendrology, St.Petersburg State Forest Technical University, Associate Professor. SPIN-code: 8410-9354. ORCID: 0009-0004-1082-5222.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: ignateva_oksana@inbox.ru

УДК 630*181:519.237

В.К. Хлюстов, С.Г. Кокорин, А.М. Ганихин

КОМПЛЕКСНОЕ РЕСУРСНО-ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ЛЕСОВ НА ОСНОВЕ МНОГОМЕРНОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Введение. Действующая методология лесного районирования, регламентированная ст. 15 Лесного кодекса РФ, ограничивается общими формулировками о необходимости учета природно-климатических условий. При этом игнорируется богатейший массив данных государственного лесного реестра, содержащий детальную информацию о структуре лесного фонда. Предлагаемая методика восполняет этот пробел путем интеграции данных ГЛР в процесс комплексного ресурсно-экологического районирования.

Современные вызовы в области лесного хозяйства, связанные с необходимостью балансирования ресурсных, экологических и социальных функций лесов, обуславливают потребность в совершенствовании инструментов территориального планирования [Курнаев, 1973]. Традиционные подходы к лесорастительному и лесохозяйственному районированию зачастую носят экспертный характер и не в полной мере учитывают комплексную многомерную природу лесных экосистем. Методологической основой настоящего исследования выступают принципы комплексности [Шейнгауз, 1975; Генсирук 1981], иерархичности [Крылов, 1960; Швиденко и др., 2008] и статистической однородности [Шейнгауз и др., 1980; Хлюстов и др., 2020], достигаемой за счёт применения методов многомерного анализа. В связи с этим применение объективных методов многомерной статистики представляется перспективным направлением для выявления латентной пространственной структуры лесного фонда и выделения гомогенных таксонов [Ким и др., 1989].

Ресурсно-экологическое районирование является основой для организации и ведения лесного хозяйства с приоритетом реализации принципов многоцелевого и устойчивого лесопользования, поскольку позволяет дифференцировать режимы лесопользования в соответствии с природно-хозяйственными особенностями территорий [Хлюстов и др., 2018].

Материалы и методика исследования. Объектом исследования выступил лесной фонд Ленинградской области, представленный 19 лесничествами. Источниковую базу составили данные государственного лесного

реестра (формы №№ 1-ГЛР, 2-ГЛР, 3-ГЛР, 4-ГЛР, 7-ГЛР, 8-ГЛР) за 2025 год, а также общедоступные климатические и почвенные показатели [Материалы…, 1962; Архив…, 2025].

Для каждого лесничества климатические параметры (X7-X13) определялись по ближайшей репрезентативной метеостанции с последующей категориальной градацией (например, продолжительность зимы, степень увлажнения летнего периода). Почвенные показатели (X3-X6) использовались в виде классов продуктивности почв (1 – наивысший, 4 – низший), что представляет собой устоявшуюся качественную характеристику, не зависящую от абсолютных значений даты измерений. Такой подход нивелирует возможные погрешности, связанные с временной изменчивостью количественных климатических показателей.

Для анализа был сформирован массив из 66 переменных, отражающих породно-возрастную структуру, продуктивность, целевое назначение лесов, степень хозяйственной освоенности и природно-климатические условия.

Структура данных включала переменные, систематизированные по следующим тематическим блокам:

1. Географические координаты (X1-X2): широта и долгота расположения лесничеств, обеспечивающие учёт пространственного градиента изменчивости условий;

2. Почвенно-производительный потенциал (X3-X6), включающий распределение площадей по классам продуктивности почв (1 – наивысший, 4 – низший), характеризующее природное плодородие типов и подтипов почв;

3. Климатические параметры (X7-X13), представляющие комплекс показателей, включающий континентальность климата, продолжительность и снежность зимы, продолжительность лета, увлажнение летнего периода, температуры наиболее теплого и холодного месяцев;

4.Характеристики лесного покрова из ГЛР Ф-1(X14-X27) в виде данных о распределении земель лесного фонда по категориям (покрытые лесной растительностью, естественные насаждения, лесные культуры, несомкнувшиеся лесные культуры, питомники, фонд лесовосстановления), а также структура нелесных земель (сельскохозяйственные угодья, дороги, воды, болота, пески, прочие земли);

5.Возрастная структура и породный состав из ГЛР Ф-2 (X28-X52) представлены распределением площадей и запасов древостоев по преобладающим породам (хвойные, мягколиственные, твердолиственные) и возрастным группам (молодняки, средневозрастные, приспевающие, спелые и перестойные);

6.Целевое назначение лесов ГЛР Ф-3 (X53-X59), включающее состав земель лесного фонда и земель иных категорий, на которых расположены

леса, в виде соотношения защитных и эксплуатационных лесов, всех площадей, покрытых лесом, структуру площадей занятых типами лесов (хвойные, мягколиственные, твердолиственные), лесистость;

7.Пространственная организация территории ГЛР Ф-4 (Х60-Х62), включающая характеристику лесничеств (площадь, количество лесных кварталов, количество лесотаксационных выделов), ГЛР Ф-7 (Х63-Х64), включающая сведения о лесных участках (количество лесных участков, площадь лесных участков);

8.Лесохозяйственный потенциал ГЛР Ф-8 (Х65-Х66), включающий сведения о эксплуатационной возможности лесничеств в виде расчётной лесосеки по запасу хвойных и мягколиственных пород.

Методика исследования включала последовательное применение трех методов:

1. Факторный анализ по методу главных компонент с последующим Varimax-вращением для снижения размерности данных и выявления латентных факторов;

2. Кластерный анализ по методу k-средних на основе факторных весов для группировки лесничеств в типы;

3. Дискриминантный анализ для верификации устойчивости кластерной структуры и построения классификационных функций. Все расчеты проводились в среде SPSS Statistics 26.0.

Результаты исследования. Для установления взаимосвязей между переменными и обоснования применимости факторного анализа была рассчитана парная корреляционная матрица размерностью 66×66 на основе данных по 19 лесничествам Ленинградской области. Матрица содержит коэффициенты корреляции Пирсона, отражающие степень линейной связи между всеми парами переменных. Для оценки статистической значимости коэффициентов корреляции на 5-процентном уровне значимости (α=0,05) при объёме выборки n=19 лесничеств было определено критическое значение коэффициента корреляции (r_{05}), равное 0,456 (для числа степеней свободы df = n-2 = 17).

Общее количество парных коэффициентов корреляции (без учёта диагональных элементов) составляет 2145. Анализ матрицы показал, что значимыми являются 500 коэффициентов корреляции, что составляет около 23% от их общего числа. Данный результат свидетельствует о наличии многочисленных и существенных линейных взаимосвязей между переменными, характеризующими лесной фонд.

Наличие значительного количества статистически существенных корреляций между переменными является необходимым условием для применения факторного анализа. Выявленная структура взаимосвязей подтверждает, что

исходные данные содержат скрытые закономерности, которые могут быть выявлены и интерпретированы с помощью метода главных компонент. Это позволяет перейти к следующему этапу – снижению размерности данных и выделению латентных факторов, определяющих основные градиенты изменчивости лесного фонда Ленинградской области.

Результаты факторного анализа. Для определения оптимального количества главных компонент, подлежащих интерпретации, был проведён анализ собственных значений и вклада компонент в общую дисперсию, представленный в табл. 1. В результате факторного анализа выделено 4 главных компоненты с собственными значениями >1, совокупно объясняющих 64,3% дисперсии (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1

Объясненная дисперсия главных компонент после вращения

Explained variance of the principal components after rotation

№ главной компоненты	Собственное значение фактора	Дисперсия, %	
		фактора	суммарная
1	14,285	21,64	21,64
2	13,492	20,44	42,08
3	8,795	13,33	55,41
4	5,865	8,89	64,30

Содержательная интерпретация компонент на основе анализа факторных нагрузок (> |0,7|) позволила идентифицировать их как:

• ГК1 – «Потенциал лесопользования и продуктивность» – биполярный фактор, противопоставляющий дренированные высокопродуктивные земли со спелыми хвойными насаждениями заболоченным низкопродуктивным территориям с преобладанием мягколиственных пород;

• ГК2 – «Антропогенная освоенность» – градиент от западных, сильно фрагментированных и трансформированных территорий к восточным, слабоосвоенным лесным массивам;

• ГК3 – «Стадийность развития мягколиственных древостоев» – фактор, отражающий возрастную динамику мягколиственных лесов от приспевающих к спелым и перестойным;

• ГК4 – «Климатическая суровость и маргинальные леса» – фактор, связанный с распространением твердолиственных пород и молодняков мягколиственных в условиях повышенной континентальности климата.

Метод получения компонент – факторный анализ методом главных компонент с Varimax-вращением, стандартизация переменных, отбор компонент по критерию собственных значений >1.

Для оценки адекватности и полноты четырёхкомпонентной модели проведён анализ величин общности (h^2) и специфичности ($1 – h^2$) исходных переменных. Общность, представляющая собой долю дисперсии переменной, объясняемую выделенными главными компонентами, позволяет оценить, насколько полно исследуемая модель охватывает структуру исходных данных. Специфичность, в свою очередь, отражает долю дисперсии, обусловленную уникальными для каждой переменной факторами, не связанными с общей структурой, либо погрешностью измерений.

Полученная четырёхкомпонентная факторная модель обладает высокой объясняющей способностью для переменных, характеризующих продуктивность, возрастную структуру и освоенность лесов. Однако наличие широкого спектра переменных со средней и низкой общностью указывает на существование дополнительных, неучтённых факторов (например, истории землепользования, почвенно-грунтовых условий на локальном уровне), влияющих на структуру лесного фонда.

Таким образом, для дальнейшего анализа и построения схемы районирования были отобраны четыре главные компоненты, адекватно отражающие основную часть информации, заложенной в исходном массиве данных из 66 переменных.

Результаты кластерного анализа. Для перехода от выявления латентных структур данных к непосредственному районированию территории был применен комплексный подход, сочетающий иерархический и итерационный методы кластерного анализа. В качестве исходных данных использовались значения координат факторов 19 лесничеств по четырем главным компонентам (ГК1-ГК4), что обеспечивало работу в пространстве обобщенных и статистически независимых признаков.

Для этого был реализован двухэтапный алгоритм:

1. Иерархическая кластеризация методом Уорда с построением дендрограммы для определения оптимального числа кластеров;

2. Итерационный метод k-средних с фиксированным числом кластеров для получения устойчивого и статистически верифицированного решения.

Ключевые параметры анализа:

- метод объединения Уорда включает минимизацию внутрикластерной дисперсии;
- мерой расстояния является Евклидово расстояние;

• число кластеров равно 7, определено на основе анализа агломерации и содержательной интерпретации;

• критерий сходимости равен 0,000 (полная сходимость достигнута за 2 итерации).

Анализ процесса агломерации выявил четкую структуру объединения лесничеств. На начальных этапах объединялись наиболее близкие пары объектов с коэффициентами расстояния менее 2,0 (этапы 1-6). Критический скачок расстояния объединения наблюдался на этапах 16-18, где коэффициент увеличился с 42,847 до 72,000, что подтвердило оптимальность выделения 7 кластеров.

Статистическая значимость кластеров подтверждается результатами дисперсионного анализа (ANOVA), показавшего высокую значимость различий между кластерами по всем четырем факторным осям ($p<0,004$). Наибольший вклад в дифференциацию вносит ГК1 («Продуктивность», $F = 24,144$), затем ГК2 («Освоенность», $F = 16,050$) и ГК4 («Климатическая суровость», $F = 15,842$).

На основе координат факторов произведена кластеризация, позволившая выделить 7 групп лесничеств (табл. 2, рис. 2).

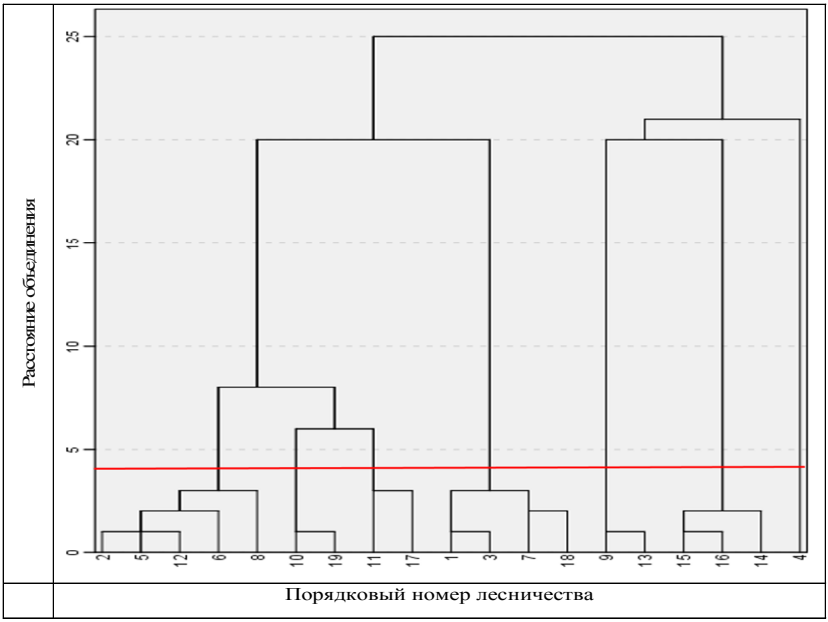


Рис. 2. Дендрограмма Уорда кластеризации лесничеств Ленинградской области.
Fig. 2. Ward dendrogram of forestry clusters in the Leningrad Region.

Таблица 2

Характеристика выделенных кластеров лесничеств

Characteristics of the selected clusters of forestry

Кластер	Лесничества	Характеристика
1	Лодейнопольское, Подпорожское	Восточные высокопродуктивные лесничества с минимальной антропогенной трансформацией и наиболее суровыми климатическими условиями
2	Лужское, Сланцевское	Юго-западные лесничества, заболоченные, с ограниченным продуктивным потенциалом и средней освоенностью
3	Приозерское, Рощинское, Северо-Западное	Северо-западные высокопродуктивные лесничества с преобладанием хвойных спелых насаждений
4	Всеволожское	Уникальный тип – пригородное высокоосвоенное лесничество с интенсивными лесовосстановительными процессами
5	Бокситогорское, Волховское, Киришское, Тихвинское	Восточные малопродуктивные лесничества с слабой освоенностью и активными процессами возобновления
6	Волосовское, Гатчинское, Кингисеппское, Кировское, Любанское	Центральные и юго-западные лесничества со средними показателями по всем осям
7	Ломоносовское, Учебно-опытное	Западные высокоосвоенные лесничества с преобладанием зрелых насаждений

Распределение кластеров лесничеств на карте Ленинградской области показано на рис. 3.

Таким образом, кластерный анализ позволил выделить 7 статистически значимых и содержательно интерпретируемых типов лесничеств, которые легли в основу итоговой схемы комплексного ресурсно-экологического районирования Ленинградской области.

Результаты дискриминантного анализа. Для проверки устойчивости и статистической достоверности выделенных методом кластерного анализа типов лесничеств был применен дискриминантный анализ, основными целями которого являлись:

1. Верификация правильности принадлежности лесничеств к кластерам;

2. Определение разделяющей способности дискриминантных функций в разделении кластеров;

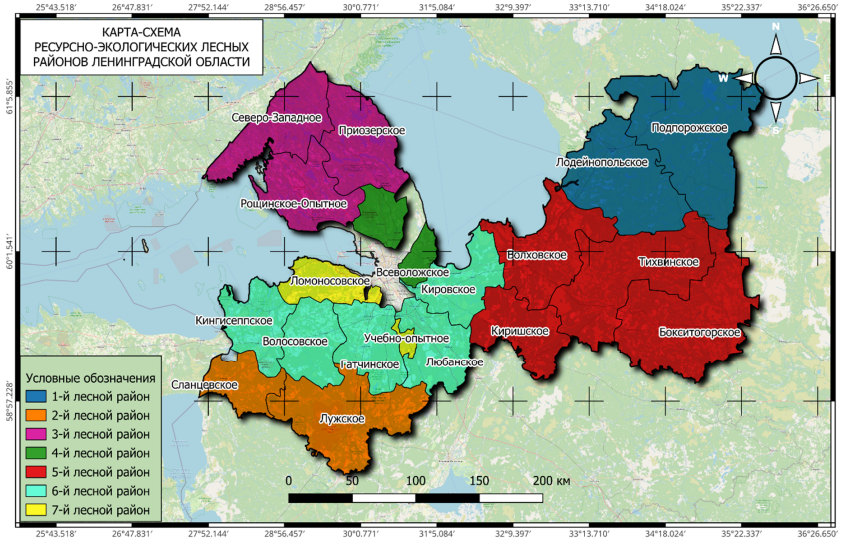


Рис. 3. Карта-схема ресурсно-экологических лесных районов Ленинградской области

Fig. 3. Map of resource-ecological forest regions of Leningrad Oblast

3. Построение классификационных функций для последующего отнесения новых объектов к установленным типам.

Анализ проводился с использованием четырех главных компонент в качестве предикторов и семи кластеров, выделенных на предыдущем этапе, в качестве группирующей переменной.

Собственные значения и объясняемая дисперсия дискриминантных функций представлены в табл. 3.

Таблица 3

Собственные значения, дисперсия и каноническая корреляция дискриминантных функций

Eigenvalues, variance, and canonical correlation of discriminant functions

Функция	Собственное значение	Дисперсия, %		Каноническая корреляция
		функции	суммарная	
1	33,825	58,8	58,8	0,986
2	16,296	28,3	87,1	0,971
3	4,890	8,5	95,6	0,911
4	2,506	4,4	100,0	0,845

Первые две функции объясняют 87,1% общей дисперсии, что свидетельствует о их доминирующей роли в дискриминации кластеров. Построенные канонические дискриминантные функции показали высокую дискриминантную силу (собственные значения от 33,8 до 2,5; канонические корреляции от 0,986 до 0,845). Критерий Уилкса (λ = 0,000; χ^2 = 117,855; $p<0,001$) подтвердил высокую значимость разделения. Результаты классификации показали 100%-ную точность отнесения объектов к исходным кластерам, что верифицирует устойчивость кластерной структуры. Визуально распределение 7 кластеров лесничеств в пространстве трёх дискриминантных функций представлено на рис. 4.

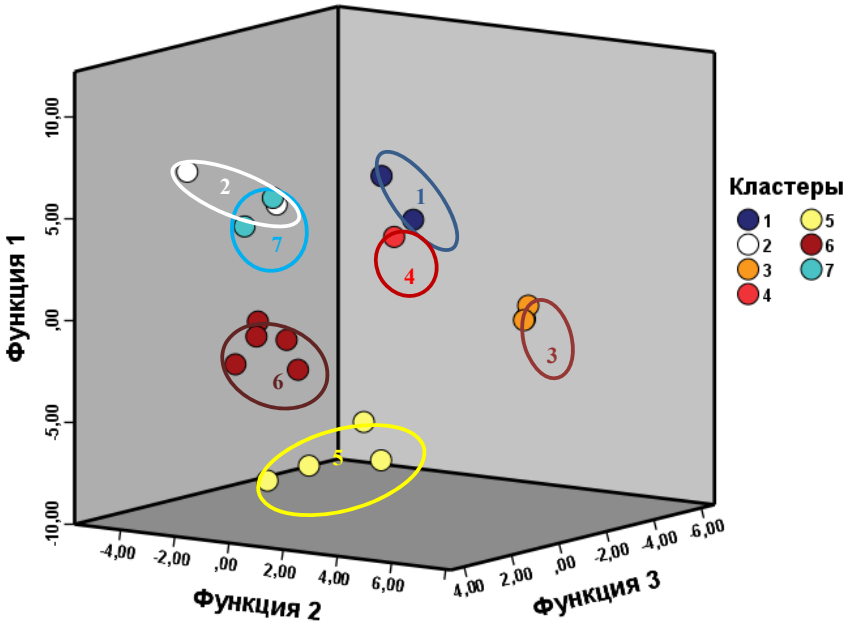


Рис. 4. Распределение лесничеств Ленинградской области по кластерам в пространстве дискриминантных функций

Fig. 4. Distribution of forestry areas in the Leningrad Region by clusters in the space of discriminant functions

Заключение. Разработанная методика и схема комплексного ресурсно-экологического районирования на основе последовательного применения факторного, кластерного и дискриминантного анализа доказала свою эффективность на примере Ленинградской области. Научная новизна работы

заключается в комплексном последовательном применении трёх методов многомерной статистики с верификацией результата через 100%-ную точность дискриминантной классификации, а также в использовании полного массива актуальных данных государственного лесного реестра.

Полученная схема районирования является основой для организации и ведения лесного хозяйства на территории Ленинградской области с приоритетом реализации принципов многоцелевого и устойчивого лесопользования. Выделенные 7 типов лесничеств представляют собой объективную основу для дифференциации режимов лесопользования, планирования лесохозяйственных мероприятий и оптимизации территориальной организации лесного хозяйства региона. Для каждого из выделенных кластеров могут быть разработаны конкретные лесохозяйственные рекомендации, адаптированные к их ресурсному потенциалу и экологическим ограничениям. Полученные результаты могут быть использованы органами государственной власти при разработке региональных программ развития лесного комплекса.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Архив климатических данных. URL: http://climatebase.ru/regions/Russia (дата обращения: 01.10.2025).

Генсирук С.А. Комплексное лесохозяйственное районирование Украины и Молдавии. Киев: Наукова думка, 1981. 360 с.

Ким Дж.-О., *Мьюллер Ч.У.*, *Клекка У.Р.*, *Олдендерфер М.С.*, *Блэшфилд Р.К.* Факторный, дискриминантный и кластерный анализ. М.: Финансы и статистика, 1989. 215 с.

Крылов Г.В. Леса Сибири и Дальнего Востока, их лесорастительное районирование. М.: Гослесбумиздат, 1960. 155 с.

Курнаев С.Ф. Лесорастительное районирование СССР. М.: Наука, 1973. 204 с.

Материалы по природно-экономической характеристике сельскохозяйственных микрорайонов СССР: (Опыт деления с.-х. территории СССР на микрорайоны в целях специализации и размещения сельского хозяйства). Т. 1. М.: Экономиздат, 1962. 1000 с.

Хлюстов В.К., *Ганихин А.М.*, *Хлюстов Д.В.* Ресурсно-экологическое районирование и государственная инвентаризация лесов. М.: Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2018. 185 с.

Хлюстов В.К., *Васенев И.И.*, *Ганихин А.М.* Районирование территории ЦФО по комплексу лесоводственно-климатических показателей // АгроЭкоИнфо. 2020. №2 (40).

Швиденко А.З., *Щепащенко Д.Г.*, *Нильссон С.*, *Булуй Ю.И.* Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии. М., 2008. 886 с.

Шейнгауз А.С. Опыт лесохозяйственного районирования на основе математико-статистической оценки классификационных признаков // Лесоведение. 1975. №1. С. 12-19.

Шейнгауз А.С., *Дорофеева А.А.*, *Ефремов Д.Ф.*, *Сапожников А.П.* Комплексное лесохозяйственное районирование. Владивосток: Дальневосточное книжное изд-во, 1980. 142 с.

References

Climate Data Archive. URL: http://climatebase.ru/regions/Russia (accessed October 01, 2025). (In Russ.)

Gensiruk S.A. Complex forestry zoning of Ukraine and Moldova. Kiev: Naukova dumka, 1981. 360 p. (In Russ.)

Khlyustov V.K., *Ganikhin A.M.*, *Khlyustov D.V.* Resource and Ecological Zoning and State Inventory of Forests. Moscow: Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, 2018. 185 p. (In Russ.)

Khlyustov V.K., *Vasenev I.I.*, *Ganikhin A.M.* Zoning of the Central Federal District Territory Based on a Complex of Forestry and Climate Indicators. *AgroEcoInfo*, 2020, no. 2(40). (In Russ.)

Kim J.-O., *Myuller Ch.U.*, *Klekka U.R.*, *Oldenderfer M.S.*, *Bleshfild R.K.* Factor, discriminant and cluster analysis. Moscow: Finance and statistics, 1989. 215 p. (In Russ.)

Krylov G.V. Forests of Siberia and the Far East, their forest-growing zoning. Moscow: Goslesbumizdat, 1960. 155 p. (In Russ.)

Kurnaev S.F. Forest-growing Zoning of the USSR. Moscow: Nauka, 1973. 204 p. (In Russ.)

Materials on the natural and economic characteristics of agricultural microdistricts of the USSR: (The experience of dividing the agricultural territory of the USSR into microdistricts for the purpose of specialization and location of agriculture). Vol. 1. Moscow: Ekonomizdat, 1962. 1000 p. (In Russ.)

Sheingauz A.S. Experience in forestry zoning based on mathematical and statistical evaluation of classification features. *Lesovedenie*, 1975, no. 1, pp. 12-19. (In Russ.)

Sheingauz A.S., *Dorofeeva A.A.*, *Efremov D.F.*, *Sapozhnikov A.P.* Complex forestry zoning. Vladivostok: Far Eastern Book Publishing House, 1980. 142 p. (In Russ.)

Shvidenko A.Z., *Shchepashchenko D.G.*, *Nilsson S.*, *Buluy Yu.I.* Tables and models of the growth and productivity of the main forest-forming species in Northern Eurasia. Moscow, 2008. 886 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 25.11.2025

Хлюстов В.К., Кокорин С.Г., Ганихин А.М. Комплексное ресурсно-экологическое районирование лесов на основе многомерного статистического анализа // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2026. Вып. 259. С. 111–124. DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.111-124

Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки научно обоснованных схем районирования, что является фундаментальной задачей для реализации принципов устойчивого управления лесами. В статье предложена авторская методика комплексного ресурсно-экологического районирования, интегрирующая последовательное применение факторного, кластерного и дискриминантного анализа. Методика апробирована на примере лесного фонда Ленинградской области по данным 19 лесничеств и 66 показателям, включая таксационные характеристики, данные государственного лесного реестра и климатические параметры. В результате факторного анализа выявлены и содержательно интерпретированы четыре ведущих латентных фактора, совокупно объясняющих 64,3% общей дисперсии: «Потенциал лесопользования и продуктивность лесных земель» (23,5%), «Антропогенная освоенность и трансформация лесных ландшафтов» (19,8%), «Стадийность развития мягколиственных древостоев» (13,0%), «Климатическая суровость и представленность маргинальных типов леса» (8,0%). На основе значений факторных весов методом k-средних произведена типизация территории, в результате чего выделено 7 статистически значимых и содержательно интерпретируемых кластеров лесничеств. Устойчивость кластерной структуры подтверждена дискриминантным анализом, показавшим 100%-ную точность классификации. Построены канонические дискриминантные функции, позволяющие осуществлять отнесение новых объектов к установленным типам. Предложенная методика позволяет перейти от континуального описания лесного фонда к его дискретной таксономии и служит основой для разработки дифференцированных моделей лесопользования, адаптированных к специфике выделенных районов.

Ключевые слова: районирование, факторный анализ, кластерный анализ, дискриминантный анализ, лесной фонд, Ленинградская область, устойчивое лесопользование, государственный лесной реестр.

Khlyustov V.K., Kokorin S.G., Ganikhin A.M. Complex Resource and Ecological Zoning of Forests Based on Multivariate Statistical Analysis. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2026, iss. 259, pp. 111–124 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.111-124

The relevance of the work is due to the need to develop scientifically sound zoning schemes, which is a fundamental task for implementing the principles of sustainable forest management. The article proposes the author's method of integrated resource-

ecological zoning, integrating the consistent application of factor, cluster and discriminant analysis. The methodology has been tested using the example of the Leningrad Region forest fund based on data from 19 forestry departments and 66 indicators, including taxation characteristics, data from the state forest register and climatic parameters. As a result of the factor analysis, four leading latent factors were identified and meaningfully interpreted, collectively explaining 64.3% of the total variance: "Forest management potential and productivity of forest lands" (23.5%), "Anthropogenic development and transformation of forest landscapes" (19.8%), "Stages of development of soft-leaved stands" (13.0%) and "Climatic severity and representation of marginal forest types" (8.0%). Based on the values of factor weights, the territory was typed using the k-means method, as a result of which 7 statistically significant and meaningfully interpreted clusters of forest areas were identified. The stability of the cluster structure was confirmed by discriminant analysis, which showed 100% classification accuracy. Canonical discriminant functions are constructed that allow assigning new objects to established types. The proposed methodology makes it possible to move from a continuous description of the forest fund to its discrete taxonomy and serves as the basis for the development of differentiated forest management models adapted to the specifics of the designated areas.

K e y w o r d s : zoning, factor analysis, cluster analysis, discriminant analysis, forest fund, Leningrad Region, sustainable forest management, state forest register.

ХЛЮСТОВ Виталий Константинович – профессор Российского государственного аграрного университета – МСХА им. К.А. Тимирязева, заслуженный лесовод России, академик РАЕ, МАНВШ, МАНИИПТ, доктор сельскохозяйственных наук.

127434, Тимирязевская ул., д. 49, г. Москва, Россия. E-mail: Vkhlyustov@rgau-msha.ru

KHLYUSTOV Vitaly K. – DSc (Agricultural), Professor, Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy, Honored Forester of Russia, Academician of the RAS, MANVSH, MANIIPT.

127434. Timiryazevskaya str. 49. Moscow. Russia. E-mail: Vkhlyustov@rgau-msha.ru

КОКОРИН Сергей Геннадьевич – аспирант **к**афедры землеустройства и лесоводства Российского государственного аграрного университета – МСХА им. К.А. Тимирязева;

127434, Тимирязевская ул., д. 49, г. Москва, Россия;

заместитель директора филиала ФГБУ «Рослесинфорг» «Севзаплеспроект».

196084, ул. Коли Томчака, д. 16, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: Kokorins82@mail.ru

KOKORIN Sergey G. – PhD student, Department of Land Management and Forestry, Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy;

127434. Timiryazevskaya str. 49. Moscow. Russia;

Deputy Director of the branch of FGBU "Roslesinforg" "Sevzaplesproekt".

196084. Koli Tomchaka str. 16. St. Petersburg. Russia. E-mail: Kokorins82@mail.ru

ГАНИХИН Александр Максимович – ведущий инженер отделения планирования и выполнения лесохозяйственных работ отдела организации внебюджетной деятельности «Оборонлес» Минобороны России, кандидат сельскохозяйственных наук.

119435, ул. Большая Пироговская, д. 21, стр. 1, г. Москва, Россия. E-mail: Ganikhin.alexander@mail.ru

GANIKHIN Aleksandr M. – PhD (Agricultural), Leading Engineer, Department of Planning and Execution of Forestry Works, Department of Organization of Extra-budgetary Activities, "Oboronles", Ministry of Defense of the Russian Federation.

119435. Bolshaya Pirogovskaya str. 21, build. 1. Moscow. Russia. E-mail: Ganikhin.alexander@mail.ru

УДК 630*165.51+630.44+632.4+630.2

В.А. Брынцев, А.А. Коженкова, С.Э. Некляев, С. Л. Рысин

СОСТОЯНИЕ УНИКАЛЬНОГО НАСАЖДЕНИЯ ТСУГИ КАНАДСКОЙ И ЕГО МИКОБИОТЫ В ДЕНДРАРИИ ГБС РАН

Введение. Виды рода тсуга (*Tsuga* (Endl.) Carrière) семейства Сосновые (*Pinaceae* Lindl.) представляют собой лесообразующие хвойные породы, типичные для субальпийских и равнинных лесных сообществ Северной Америки и Азии. Для тсуг характерны медленный рост, значительная продолжительность жизни, высокая теневыносливость и повышенные требования к влажности воздуха и почвы. В хозяйственном отношении эти деревья ценятся как источник древесины и древесного волокна, а в озеленении – благодаря красивой кроне [Burns, Honkala, 1990].

Согласно A. Farjon [1990], род *Tsuga* включает девять видов: три из них распространены в Китае и Гималаях, два – в Японии, по два – на западе и востоке Северной Америки. Филогенетический анализ, проведённый Havill et al. [2008], позволил выделить две ключевые клады; одна из них объединяет западные североамериканские виды (*T. heterophylla* (Raf.) Sarg. и *T. mertensiana* (Bong.) Carrière), вторая включает азиатские виды, а также один из восточных североамериканских видов – *T. caroliniana* Engelm. При этом другой восточный североамериканский вид – *T. canadensis* (L.) Carrière – является сестринским таксоном по отношению к азиатской кладе.

На территории современной России тсуги естественно не произрастают, однако палеонтологические данные свидетельствуют о широком распространении рода *Tsuga* в Северной Америке и Евразии, начиная с позднего мела и вплоть до плиоцена-плейстоцена. Исследования пространственно-временного распределения ископаемых остатков позволили установить пути миграций. Обмен видами между Северной Америкой и Европой осуществлялся через североатлантические сухопутные мосты, существовавшие до конца эоцена. Связь между Северной Америкой и Азией поддерживалась на протяжении всего кайнозоя через Берингию [LePage, 2003].

Анализ ископаемых материалов дал важные сведения об эволюционной истории рода; выявлено, что наиболее ранние представители тсуги морфологически близки к *T. mertensiana*. Основная дивергенция видов произошла

преимущественно в миоцене и плиоцене. Ключевыми факторами, обусловившими видообразование, стали похолодание климата, формирование новых местообитаний и крупные тектонические события [LePage, 2003].

С учётом палеонтологической истории и эколого-биологических особенностей рода *Tsuga* его представители весьма интересны для интродукционных экспериментов в центре Европейской России. Данный регион отличается относительно низким видовым разнообразием хвойных пород, что делает актуальным поиск устойчивых видов интродуцентов для озеленения населённых пунктов, обогащения лесопарковых насаждений и создания коллекционных экспозиций в ботанических садах и дендрариях. В отечественной научной литературе отсутствуют публикации, посвящённые исследованиям по интродукции видов рода *Tsuga* на территории России, что является существенным пробелом в знаниях о потенциальной адаптивности данных таксонов к местным климатическим, почвенным и биотическим условиям.

Начало опытов по интродукции тсуги привело к формированию нового патогенного и сапротрофного микокомплекса, однако работы, рассматривающие его, до настоящего времени отсутствуют. Разрозненные данные наблюдений на территории ГБС РАН и города Москвы представлены в работах, опубликованных в 2006-2018 гг. [Соколова и др., 2006; Мухина, Александрова, 2013; Мухина и др., 2013, 2014, 2015; Ткаченко и др., 2018].

Данное исследование направлено на комплексную оценку результатов интродукции тсуги канадской в дендрарии Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина Российской академии наук (далее – ГБС РАН, Сад), включая анализ дендробионтного микокомплекса и оценку перспектив культивирования вида в Московском регионе.

Объекты и методика исследований. Объектом исследования выступает коллекционное насаждение тсуги канадской в дендрарии ГБС РАН. Исходный материал – семена, полученные из дендропарка Тростянец (Украина), которые были высеяны в питомнике Сада в 1952 г. [Древесные…, 2005]. В апреле 1956 г. четырёхлетние сеянцы переместили в дендрарий, а летом 1957 г. пересадили на постоянное место. Всего было высажено 518 экземпляров *T. canadensis*.

В первые три года после посадки отмечено отмирание 78 растений, что соответствует приживаемости на уровне 85%. Существенное ухудшение состояния насаждения зафиксировано в 1974 г.: по невыясненным причинам погибло 86 экз., что составило 21% от общего числа сохранившихся к тому моменту деревьев.

В настоящее время насаждение представляет собой сомкнутое сообщество с мёртвым напочвенным покровом. В его составе присутствуют также дуб черешчатый (*Quercus robur* L.), берёза пушистая (*Betula pubescens* Ehrh.) и ель европейская (*Picea abies* (L.) H. Karst.), которые оказывают угнетающее действие на произрастающие рядом экземпляры тсуги, конкурируя с ними за свет, влагу и питательные вещества.

В возрасте 73 лет (2025 г.) у деревьев были проведены замеры высот с использованием оптического высотомера Silva Clino Master 1015/2025 с точностью до 0,1 м. Диаметр стволов определяли на высоте груди (1,3 м): для этого измеряли длину окружности ствола с точностью до 1 см, после чего по полученному значению рассчитывали диаметр.

Оценка качества крон и стволов тсуги канадской проводилась по трёхбалльной шкале (0–2) согласно методике ГБС РАН [Рысин и др., 2009]. Для крон были установлены следующие критерии оценки: 2 балла присваивались при наличии характерной для вида, полной, нормально развитой кроны; 1 балл – при атипичной, непропорциональной или частично изреженной кроне; 0 баллов – при короткой или сильно изреженной кроне.

При оценке стволов 2 балла соответствовали нормально развитому стволу без наклона и видимых повреждений; 1 балл – нормальному стволу с незначительными дефектами или повреждениями, при отклонении от вертикали не более 30°; 0 баллов – стволу с существенными дефектами (искривлённому, дуплистому и др.) и значительными повреждениями, при отклонении более 30°.

Оценка жизненного состояния древесных растений проводилась в соответствии с производственной методикой ГБС РАН, предусматривающей разделение деревьев на три категории: «хорошие», «удовлетворительные» и «сомнительные». Данная методика позволила провести мониторинг динамики состояния интродуцированных видов в коллекционных насаждениях на протяжении длительного периода.

Текущее санитарное состояние деревьев (на 2025 г.) устанавливали в соответствии с шестибалльной шкалой категорий состояния хвойных пород, регламентированной «Правилами санитарной безопасности в лесах» (утверждены постановлением Правительства Российской Федерации от 9 декабря 2020 г. №2047). Категории 5 – свежий сухостой – и 6 – старый сухостой – не учитывались, поскольку засохшие деревья удаляют из коллекции сразу после их усыхания.

Для получения данных о видовом разнообразии ксилобионтного микокомплекса тсуги канадской в 2023-2025 гг. на четырёх пробных площадях было проведено обследование 40 модельных деревьев (рис. 1).

Рис. 1. Место произрастания коллекционного насаждения тсуги канадской в дендрарии ГБС РАН и места размещения пробных площадей

Fig. 1. The location of the collection planting of Canadian hemlock in the arboretum of the Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences and the location of sample plots

В ходе полевых работ отбирали образцы базидиом дендротрофных грибов, а также древесины и вегетативных органов (корни, ветви, части ствола) с признаками поселения ксилобионтных видов [Бондарцев, Зингер, 1950; Методы…, 1982; Исиков, Конопля, 2004; Ивойлов и др., 2017; Кураков, Кокаева, 2023; Ryvarden, Gilbertson, 1993; Hanlin, 2000; Gupta et al., 2013]. Дополнительно проводился осмотр хвойных насаждений в радиусе до 1 км от пробных площадей с целью выявления общего состава микобиоты хвойных пород.

Образцы плодовых тел гербаризировали в соответствии с методическими рекомендациями [Бондарцев, Зингер, 1950; Методы…, 1982; Исиков, Конопля, 2004; Ивойлов и др., 2017; Кураков, Кокаева, 2023; Ryvarden, Gilbertson, 1993; Gupta et al., 2013].

С помощью специализированной литературы и справочников-определителей идентифицировали видовую принадлежность [Давыдкина, 1980; Бондарцева, Пармасто, 1986; Бондарцева, 1998; Ниемеля, 2001; Стороженко

и др., 2014; Переведенцева, 2015; Ryvarden, Gilbertson, 1993; Ellis, Ellis, 1997; Hanlin, 2000, 2001a, b; Niemelä, 2005, 2016], а также стадии развития базидиом и возраст для многолетних плодовых тел [Niemelä, 2005].

Исследования морфологического строения спор, мицеллярных нитей, интенсивности развития мицелия в древесине проводили методом прямого микроскопирования с применением оптического микроскопа Nikon E200 (объективы 4× – 100×, окуляры 10×, 15×) и бинокулярного стереоскопического МБС-9 (увеличение 3,33-100 крат.) [Исиков, Конопля, 2004; Ивойлов и др., 2017; Камзолкина, Богданова, 2017; Благовещенская, 2021; Некляев и др., 2023; Gupta et al., 2013].

Современное таксономическое положение видов приведено по базам данных Index Fungorum [2025], MycoBank Fungal databases [2025].

Результаты исследований и обсуждение. По результатам обследования насаждения тсуги канадской получены количественные характеристики основных биометрических показателей деревьев и проведена оценка категории их санитарного состояния (табл. 1).

Таблица 1

Показатели роста и категория санитарного состояния тсуги канадской в 73-летнем возрасте

Growth rates and condition category of Canadian hemlock at 73 years of age

Характеристики деревьев	Биометрические показатели		
	M±m	S	V,%
Высота, м	19,8±0,6	2,6	13
Диаметр, см	25,6±0,75	8,1	31
Категория санитарного состояния	2,6±0,21	0,9	35

Примечание: M – среднее арифметическое, m – ошибка среднего, S – среднеквадратическое отклонение, V – коэффициент вариации

Приведённые в табл. 1 данные свидетельствуют о сравнительно низком варьировании деревьев по высоте (коэффициент вариации – 13%), а также о существенно более высокой изменчивости по диаметру ствола (31%) и показателю категории санитарного состояния (35%). Такая картина характерна для сомкнутого насаждения и отражает процесс дифференциации деревьев в условиях конкурентного взаимодействия: при сходном линейном росте в высоту наблюдается значительная неоднородность по развитию стволов и жизненному состоянию особей.

Динамика жизненного состояния деревьев тсуги канадской за последние 15 лет представлена на рис. 2.

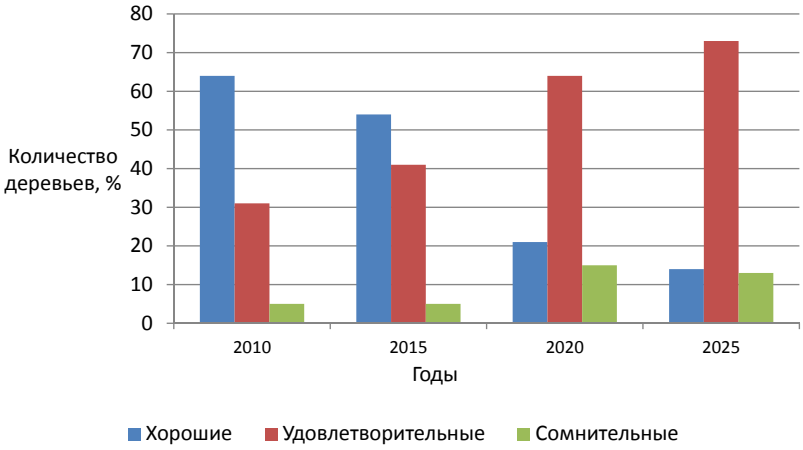


Рис. 2. Динамика изменения жизненного состояния деревьев тсуги канадской за 15-летний период наблюдений (2010-2025 гг.)

Fig. 2. Dynamics of changes in the vital condition of Canadian hemlock trees over a 15-year observation period (2010-2025)

Анализ динамики состояния деревьев в насаждении за 15-летний период демонстрирует существенную трансформацию структуры популяции: доля деревьев категории «хорошие» сократилась с 64 до 14%, тогда как удельный вес экземпляров категории «удовлетворительные» увеличился с 31 до 73%. Подобная тенденция свидетельствует об усилении конкурентных взаимодействий внутри насаждения. В условиях высокой сомкнутости происходит дифференциация особей: часть деревьев сохраняет относительно благополучное состояние, однако значительная доля популяции испытывает угнетение, что отражается в переходе в более низкую категорию жизненного состояния.

На рис. 3 представлена характеристика качества ствола и кроны.

Анализ состояния крон показал, что 31% деревьев получили 0 баллов, 47% – 1 балл, а 22% – 2 балла. Таким образом, 78% деревьев демонстрируют отклонения в развитии кроны, что указывает на воздействие неблагоприятных факторов среды или неоптимальные условия культивирования.

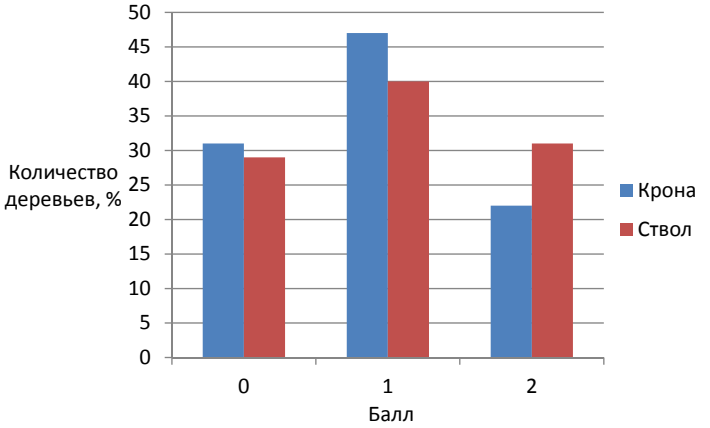


Рис. 3. Характеристика качества ствола и кроны деревьев тсуги канадской в насаждении (по состоянию на 2025 г.)

Fig. 3. Characteristics of the quality of the trunk and crown of Canadian hemlock trees in the stand (in 2025)

При оценке состояния стволов выявлено, что 29% деревьев получили 0 баллов, 40% – 1 балл, а 31% – 2 балла. Почти 70% имеют отклонения в состоянии ствола, вероятно, вызванные конкуренцией за свет, механическими повреждениями или воздействием патогенов.

Комплексный анализ свидетельствует о неоднородности состояния деревьев в насаждении. Преобладание экземпляров с низкими показателями подтверждает наличие стрессовых факторов, влияющих на рост, развитие и жизнеспособность тсуги канадской.

В 2025 г. выполнено углублённое обследование санитарного состояния деревьев тсуги канадской. Полученные данные визуализированы на рис. 4.

Анализ данных, представленных на рис. 4, показывает, что значительная часть популяции находится в удовлетворительном состоянии: 41% деревьев относятся к 1-й и 2-й категориям санитарного состояния. Вместе с тем в насаждении большое количество деревьев (46%) были 3-й категории санитарного состояния, т. е. имели явные признаки ослабления. С учётом текущей динамики можно прогнозировать, что значительная часть этих деревьев со временем перейдёт в 4-ю категорию, а в дальнейшем – в отпад. В целях поддержания устойчивости насаждения целесообразно провести селекционные рубки до наступления указанной стадии деградации.

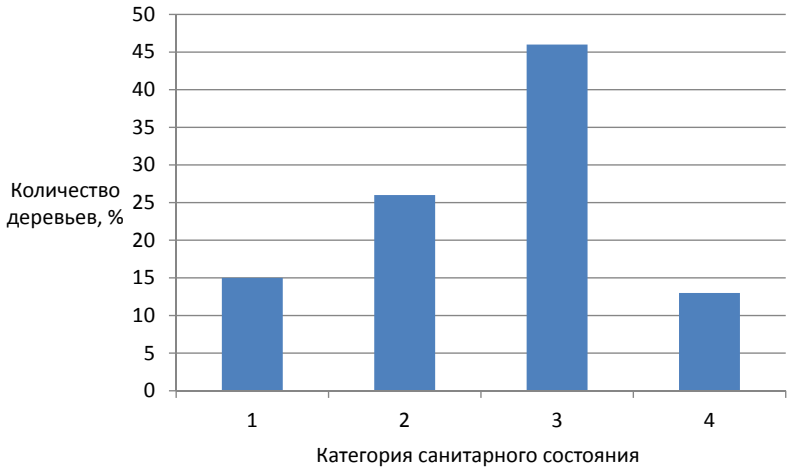


Рис. 4. Распределение деревьев по категориям санитарного состояния в 2025 г.

Fig. 4. Distribution of trees by sanitary condition categories in 2025

Существенную роль в деградации насаждения играют патогенные грибы. Установлено, что виды, повреждающие хвою, представлены преимущественно аскомицетами, тогда как основными возбудителями болезней древесины – ствола, ветвей и корней – являются базидиомицеты. Результаты исследований 2006-2018 гг. [Соколова и др., 2006; Мухина, Александрова, 2013; Мухина и др., 2013, 2014, 2015; Ткаченко и др., 2018] позволили сформировать исходный перечень видов ксилобионтного микокомплекса. В ходе последующих наблюдений он был существенно дополнен (табл. 2): выявлено 27 новых видов дендробионтных грибов, среди них 4 вида сумчатых грибов родов *Gremmenia*, *Hypoxylon*, *Rhizina* и 23 вида базидиомицетов родов *Antrodia*, *Climacocystis*, *Coniophora*, *Fomitiporia*, *Ganoderma*, *Hapalopilus*, *Heterobasidion*, *Hypholoma*, *Ischnoderma*, *Leptoporus*, *Leucogyrophana*, *Mycena*, *Neoantrodia*, *Onnia*, *Phaeolus*, *Phellinus*, *Skeletocutis*, *Xerocomus.*

Анализ трофической специализации грибов выявил четыре рода аскомицетов (*Cytospora*, *Diaporthe*, *Hypoxylon*, *Thyronectria*), регулярно проявляющих высокую патогенную активность по отношению к хвойным растениям.

Таблица 2

Состав дендробионтного микокомплекса тсуги канадской за периоды 2006- 2018 и 2023-2025 гг.

The structure of the Canadian hemlock dendrobiont mycocomplex for the periods 2006-2018 and 2023-2025

Название	2006–2018	2023–2025
Ascomycota		
Botrytis cinerea Pers.	+	+
Cytospora pinastri Fr.	+	+
Diaporthe decorticans (Lév.) Sacc. & Roum.	+	–
Gremmenia abietis (Dearn.) Crous	–	+
Herpotrichia pinetorum (Fuckel) G. Winter	+	+
Hypoxylon fragiforme (Pers.) J.Kickx	–	+
Hypoxylon fuscum (Pers.) Fr.	–	+
Lirula macrospora (R. Hartig) Darker	+	+
Rhizina undulata Fr.	–	+
Rhizosphaera pini (Corda) Maubl.	+	+
Thyronectria cucurbitula (Tode) Jaklitsch & Voglmayr	+	+
Tryblidiopsis pinastri (Pers.) P. Karst.	+	+
Basidiomycota		
Antrodia sinuosa (Fr.) P. Karst.	–	+
Armillaria mellea (Vahl) P. Kumm.	+	+
Chrysomyxa abietis (Wallr.) Unger	+	+
Chrysomyxa ledi (Alb. & Schwein.) de Bary	+	+
Climacocystis borealis (Fr.) Kotl. & Pouzar	–	+
Coniophora olivacea (Fr.) P. Karst.	+	+
Coniophora puteana (Schumach.) P. Karst.	–	+
Coprinellus disseminatus (Pers.) J.E. Lange	+	+
Coprinellus micaceus (Bull.) Vilgalys, Hopple & Jacq. Johnson	+	+
Cyanosporus caesius (Schrad.) McGinty	+	+
Exidia nigricans (With.) P. Roberts	+	+
Exidia saccharina Fr.	+	+
Fomitiporia punctata (P. Karst.) Murrill	+	+
Fomitopsis pinicola (Sw.) P. Karst.	+	+
Ganoderma applanatum (Pers.) Pat.	–	+
Hapalopilus nidulans (Fr.) P. Karst.	–	+

Окончание табл. 3

Название	2006–2018	2023–2025
Heterobasidion annosum (Fr.) Bref.	+	+
Heterobasidion parviporum Niemelä & Korhonen	–	+
Hypholoma capnoides (Fr.) P. Kumm.	+	+
Hypholoma fasciculare (Huds.) P. Kumm.	+	+
Hypholoma lateritium (Schaeff.) P. Kumm.	–	+
Ischnoderma resinosum (Fr.) Karst.	–	+
Leptoporus mollis (Pers.: Fr.) Pilat	–	+
Leucogyrophana mollusca (Fr.: Fr.) Pouzar	–	+
Melampsora populnea (Pers.) P. Karst.	+	+
Melampsora salicina (Pers. ex DC.) Lév.	+	+
Mycena galericulata (Scop.) Gray	–	+
Mycena galopus (Pers.) P. Kumm.	–	+
Mycena haematopus (Pers.) P. Kumm.	–	+
Neoantrodia serialis (Fr.) Audet	–	+
Onnia tomentosa (Fr.) P. Karst.	–	+
Onnia triqueter (Lenz) Imazeki	–	+
Phaeolus schweinitzii (Fr.) Pat.	–	+
Phellinus chrysoloma (Fr.) Donk	+	+
Phellinus nigrolimitatus (Romell) Bourdot & Galzin	–	+
Phellinus viticola (Schwein. in Fr.) Donk.	–	+
Phlebia rufa (Pers.) M.P. Christ.	+	+
Pholiota adiposa (Batsch) P. Kumm.	+	+
Pholiota squarrosa (Vahl) P. Kumm.	+	+
Porodaedalea pini (Brot.) Murrill	+	+
Schizophyllum commune Fr.	+	+
Sirococcus conigenus (Pers.) P. F. Cannon & Minter	+	+
Skeletocutis amorpha (Fr.: Fr.) Kotl. et Pouzar	–	+
Skeletocutis brevispora Niemela	–	+
Skeletocutis odora (Sacc.) Ginns	–	+
Stereum sanguinolentum (Alb. & Schwein.) Fr.	+	+
Trichaptum abietinum (Pers. ex J.F. Gmel.) Ryvarden	+	+
Xerocomus subtomentosus (L.) Quél.	–	+

При этом базидиомицеты более широко представлены в стволовом и корневом микокомплексах, включая сапротрофные и патогенные виды, в том числе представителей следующих родов: *Antrodia*, *Climacocystis*, *Coniophora*, *Cyanosporus*, *Exidia*, *Fomitiporia*, *Fomitopsis*, *Hapalopilus*, *Ischnoderma*, *Leptoporus*, *Neoantrodia*, *Onnia*, *Phellinus*, *Phlebia*, *Porodaedalea*, *Schizophyllum*, *Skeletocutis*, *Stereum*, *Trichaptum*. Такая структура микобиоты свидетельствует о формировании устойчивого комплекса грибов, ассоциированного с древесиной хвойных пород.

Заключение. Проведённое исследование 73-летних посадок тсуги канадской в дендрарии ГБС РАН показывает, что сформировавшееся насаждение представляет собой уникальный для европейской части России опыт интродукции данного вида, прежде всего благодаря возрасту, размерам и стабильности существования интродукционной популяции. Достигнутые деревьями биометрические показатели (средняя высота 19,8 м и средний диаметр 25,6 см) подтверждают способность вида формировать высокорослые древостои в местных условиях. Хотя эти значения ниже максимальных показателей природного ареала, они находятся в пределах видовой нормы реакции и свидетельствуют об успешной адаптации интродуцента.

Отставание в росте могло быть обусловлено комплексом факторов: укороченным вегетационным периодом и более низкими среднегодовыми температурами в европейской части России, отличиями почвенных условий (реакция среды, гранулометрический состав, влагоёмкость), высокой плотностью посадки и конкуренцией с местными видами, а также воздействием вредителей и патогенов.

Оценка санитарного состояния насаждения показывает, что 41% деревьев относятся к 1-й и 2-й категориям, что говорит о сохранении значительной части популяции в удовлетворительном состоянии. При этом лишь 22% деревьев имеют нормально развитую крону, а 31% – нормально развитый ствол. Преобладание деревьев 3-й и 4-й категорий санитарного состояния связано с характерной для сомкнутых насаждений внутривидовой и межвидовой конкуренцией, приводящей к угнетению отдельных особей, замедлению их роста и снижению жизнеспособности.

Для улучшения состояния насаждения и стимулирования роста целесообразно провести целевое разреживание, что позволит снизить конкуренцию за свет, влагу и питательные вещества. При планировании рубок следует учитывать категорию санитарного состояния каждого дерева, его диаметр, степень изреженности кроны, а также наличие и характер дефектов ствола. Важен также регулярный мониторинг фитопатологического состояния, особенно в отношении грибных инфекций и инвазивных вредителей.

В перспективе для углублённой оценки адаптационного потенциала тсуги канадской в регионе целесообразно сопоставить динамику прироста с данными других интродукционных пунктов в схожих климатических зонах, изучить морфологию и микоризные ассоциации корневых систем, играющие ключевую роль в усвоении ресурсов, а также проанализировать многолетние ряды данных по приросту для выявления долгосрочных трендов.

73-летний опыт культивирования тсуги канадской в ГБС РАН наглядно демонстрирует принципиальную возможность её выращивания в европейской части России. Несмотря на некоторое отставание от природных аналогов по темпам роста, насаждение сохраняет жизнеспособность и представляет существенную ценность как объект научного изучения и декоративного озеленения. При проведении агротехнических и селекционных мероприятий можно ожидать повышения устойчивости и эстетической ценности интродуцированной популяции.

В результате проведённого исследования дендробионтного микокомплекса установлено, что в 2023-2025 гг. по сравнению с периодом 2006-2018 гг. количество видов ксилотрофных базидиомицетов, развивающихся на древесине и корнях тсуги канадской, увеличилось на 75%. Этот факт свидетельствует о глубокой интеграции насаждения в микобиом ГБС РАН: грибное сообщество становится более разнообразным и функционально зрелым.

Вместе с тем увеличение видового богатства ксилотрофов сопряжено с ростом риска поражения коллекции корневыми и стволовыми гнилями. Расширение спектра грибов-деструкторов, включая потенциально патогенные виды, усиливает инфекционную нагрузку на насаждение. Это требует регулярного мониторинга фитопатологического состояния деревьев, особенно в отношении агрессивных возбудителей гнилей, способных снижать жизнеспособность и декоративность коллекции.

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

Сведения о финансировании исследования. Работа выполнена в рамках государственного задания ГБС РАН по теме № 126020916823-0.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Благовещенская Е.Ю. Микологические исследования: Основы лабораторной техники. М.: ЛЕНАНД, 2021. 90 с.

Бондарцев А.С., *Зингер Р.А.* Руководство по сбору высших базидиальных грибов для научного их изучения // Труды Ботан. ин-та АН СССР. Сер. 2. Спор. раст. 1950. Вып. 6. С. 499–572.

Бондарцева М.А. Определитель грибов России. Порядок афиллофоровые. Вып. 2. СПб.: Наука, 1998. 391 с.

Бондарцева М.А., *Пармасто Э.Х.* Определитель грибов СССР: Порядок афиллофоровые. Вып. 1. Л.: Наука, 1986. 192 с.

Давыдкина Т.А. Стереумовые грибы Советского Союза. Л.: Наука, 1980. 143 с.

Древесные растения Главного ботанического сада им. Н. В. Цицина РАН. 60 лет интродукции. М.: Наука, 2005. 586 с.

Ивойлов А.В., *Большаков С.Ю.*, *Силаева Т.Б.* Изучение видового разнообразия макромицетов. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2017. 160 с.

Исиков В.П., *Конопля Н.И.* Дендромикология. Луганск: Альма-Матер, 2004. 347 с.

Камзолкина О.В. Богданова А.Г. Методические пособие по микроскопии в исследованиях грибов и водорослей. М: КМК, 2017. 115 с.

Кураков А.В., *Кокаева Л.Ю.* Методы изучения разнообразия грибов в наземных и водных экосистемах. М.: Издательство Национальной академии микологии, 2023. 128 с.

Методы экспериментальной микологии. Киев: Наукова думка, 1982. 552 с.

Мухина Л.Н., *Александрова М.С.* Состояние коллекции растений рода *Picea* A. Dietrich, в ГБС РАН // Древесные растения: фундаментальные и прикладные исследования. Кострома, 2013. Вып. 2. С. 59-66.

Мухина Л.Н., *Александрова М.С.*, *Каштанова О.А.* Комплексная оценка состояния растений рода *Abies* Mill. // Бюллетень Главного ботанического сада. 2013. Вып. 199, №2. С. 43-51.

Мухина Л.Н., *Александрова М.С.*, *Каштанова О.А.*, *Серая Л.Г.*, *Дымович А.В.* Состояние растений родов *Picea*, *Abies* и *Larix* в коллекции Главного ботанического сада РАН // Информационный бюллетень Совета ботанических садов стран СНГ при Международной ассоциации Академий наук. 2014. Вып. 2 (25). С. 44–50.

Мухина Л.Н., *Серая Л.Г.*, *Каштанова О.А.* Мониторинг энтомо-фитопатологического состояния древесных растений Главного ботанического сада РАН // Лесохозяйственная информация. 2015. №2. С. 57-64.

Некляев С.Э., *Ларина Г.Е.*, *Серая Л.Г.* Особенности активного микогенного ксилолиза на сосне обыкновенной в зоне хвойно-широколиственных лесов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. Вып. 244. С. 164–183. DOI: 10.21266/2079–4304.2023.244.164–183.

Ниемеля Т. Трутовые грибы Финляндии и прилегающих территорий России // Norrlinia. 2001. Т. 8. С. 1-120.

Переведенцева Л.Г. Определитель грибов (агарикоидные базидиомицеты). М.: КМК, 2015. 119 с.

Рысин С.Л., *Плотникова Л.С.*, *Немова Е.М.*, *Гринаш М.Н.* Мониторинг интродуцированных древесных растений на урбанизированных территориях // Мониторинг природного наследия: сб. ст. М., 2009. С. 132–168.

Соколова Э.С., *Колганихина Г.Б.*, *Галасьева Т.В.*, *Стрепенюк Л.П.*, *Семенова М.А.* Видовой состав и распространение дендротрофных грибов в разных категориях зеленых насаждений Москвы // Лесной вестник. 2006. №2. С. 98-116.

Стороженко В.Г., *Крутов В.И.*, *Руоколайнен А.В.*, *Коткова В.М.*, *Бондарцева М.А.* Атлас-определитель дереворазрушающих грибов Русской равнины. М.: КМК, 2014. 198 с.

Ткаченко О.Б., *Келдыш М.А.*, *Каштанова О.А.*, *Мухина Л.Н.*, *Серая Л.Г.*, *Червякова О.Н.*, *Трейвас Л.Ю.*, *Козаржевская Э.Ф.* Защита древесных растений от возбудителей болезней и вредителей. М.: РАН, 2018. 336 с.

Burns R.M., *Honkala B.H.* Silvics of North America. Vol. 1: Conifers. Washington, 1990. 683 p.

Ellis M.B., *Ellis J.P.* Microfungi on land plants. Richmond, England: The Richmond Publishing Co. Ltd., 1997. 892 p.

Farjon A. Pinaceae: drawings and descriptions of the genera *Abies*, *Cedrus*, *Pseudolarix*, *Keteleeria*, *Nothotsuga*, *Tsuga*, *Cathaya*, *Pseudotsuga*, *Larix* and *Picea*. Königstein: Koeltz Scientific Books, 1990. 330 p.

Gupta V.K., *Tuohy M.G.*, *Ayyachami M.*, *Turner K.M.*, *O'Donovan A.* Laboratory Protocols in Fungal Biology Current Methods in Fungal Biology. London: Springer Science+Business Media LLC, 2013. 606 p. DOI: 10.1007/978-1-4614-2356-0

Hanlin R.T. Illustrated Genera of Ascomycetes. Vol. 1. St. Paul, Minnesota: APS PRESS, 2000. 262 p.

Hanlin R.T. Illustrated Genera of Ascomycetes. Vol. 2. St. Paul, Minnesota: APS PRESS, 2001a. 258 p.

Hanlin R.T. Combined keys to illustrated Genera of Ascomycetes Vol. 1 and Vol. 2. St. Paul, Minnesota: APS PRESS, 2001b. 114 p.

Havill N.P., *Campbell C.S.*, *Vining T.F.*, *LePage B.*, *Bayer R.J.*, *Donoghue M.J.* Phylogeny and Biogeography of *Tsuga* (Pinaceae) Inferred from Nuclear Ribosomal ITS and Chloroplast DNA Sequence Data // Systematic Botany. 2008. Vol. 33, no. 3. P. 478–489. DOI: 10.1600/036364408785679770.

Index Fungorum. URL: https://www.indexfungorum.org/ (дата обращения: 10.10.2025).

LePage B.A. A new species of *Tsuga* (Pinaceae) from the middle Eocene of Axel Heiberg Island, Canada, and an assessment of the evolution and biogeographical history of the genus // Botanical Journal of the Linnean Society. 2003. Vol. 141, no. 3. P. 257–296. DOI: 10.1046/j.1095-8339.2003.00131.x.

MycoBank fungal databases. URL: https://www.mycobank.org/ (дата обращения: 10.10.2025).

Niemelä T. Polypores, lignicolous fungi // Norrlinia. 2005. Vol. 13. P. 1–320.

Niemelä T. Suomen käävät – The polypores of Finland // Norrlinia. 2016. Vol. 31. P. 1–430.

Ryvarden L., *Gilbertson R.L.* European polypores. Part 1. *Abortiporus–Lindtneria* // Synopsis Fungorum. 1993. Vol. 6. P. 1–387.

References

Blagoveshchenskaya E.Yu. Mycological Research: Fundamentals of Laboratory Equipment. Moscow: LENAND, 2021. 90 p. (In Russ.)

Bondartsev A.S., *Zinger R.A.* Guide to Collecting Higher Basidiomycetes for Their Scientific Study. *Proceedings of the Botanical Institute of the USSR Academy of Sciences. Ser. 2. Spore Plants*, 1950, iss. 6, pp. 499–572. (In Russ.)

Bondartseva M.A. Key to Fungi of Russia. Order Aphyllophoraceae. Iss. 2. St. Petersburg: Nauka, 1998. 391 p. (In Russ.)

Bondartseva M.A., *Parmasto E.Kh.* Key to Fungi of the USSR: Order Aphyllophoraceae. Iss. 1. Leningrad: Nauka, 1986. 192 p. (In Russ.)

Burns R.M., *Honkala B.H.* Silvics of North America. Vol. 1: Conifers. Washington, 1990. 683 p.

Davydkina T.A. Stereum fungi of the Soviet Union. Leningrad: Nauka, 1980. 143 p. (In Russ.)

Ellis M.B., *Ellis J.P.* Microfungi on land plants. Richmond, England: The Richmond Publishing Co. Ltd., 1997. 892 p.

Farjon A. Pinaceae: drawings and descriptions of the genera *Abies*, *Cedrus*, *Pseudolarix*, *Keteleeria*, *Nothotsuga*, *Tsuga*, *Cathaya*, *Pseudotsuga*, *Larix* and *Picea*. Königstein: Koeltz Scientific Books, 1990. 330 p.

Gupta V.K., *Tuohy M.G.*, *Ayyachami M.*, *Turner K.M.*, *O'Donovan A.* Laboratory Protocols in Fungal Biology Current Methods in Fungal Biology. London: Springer Science+Business Media LLC, 2013. 606 p. DOI: 10.1007/978-1-4614-2356-0

Hanlin R.T. Illustrated Genera of Ascomycetes. Vol. 1. St. Paul, Minnesota: APS PRESS, 2000. 262 p.

Hanlin R.T. Illustrated Genera of Ascomycetes. Vol. 2. St. Paul, Minnesota: APS PRESS, 2001a. 258 p.

Hanlin R.T. Combined keys to illustrated Genera of Ascomycetes Vol. 1 and Vol. 2. St. Paul, Minnesota: APS PRESS, 2001b. 114 p.

Havill N.P., *Campbell C.S.*, *Vining T.F.*, *LePage B.*, *Bayer R.J.*, *Donoghue M.J.* Phylogeny and Biogeography of *Tsuga* (Pinaceae) Inferred from Nuclear Ribosomal ITS and Chloroplast DNA Sequence Data. *Systematic Botany*, 2008, vol. 33, no. 3, pp. 478–489. DOI: 10.1600/036364408785679770.

Index Fungorum. URL: https://www.indexfungorum.org/ (accessed October 10, 2025).

Isikov V.P., *Konoplya N.I.* Dendromycology. Lugansk: Alma-Mater, 2004. 347 p. (In Russ.)

Ivoylov A.V., *Bolshakov S.Yu.*, *Silaeva T.B.* Study of the species diversity of macromycetes. Saransk: Publishing House of the Mordoviya University, 2017. 160 p. (In Russ.)

Kamzolkina O.V., *Bogdanova A.G.* Methodological manual on microscopy in the study of fungi and algae. Moscow: KMK, 2017. 115 p. (In Russ.)

Kurakov A.V., *Kokaeva L.Yu.* Methods for studying the diversity of fungi in terrestrial and aquatic ecosystems. Moscow: Publishing House of the National Academy of Mycology, 2023. 128 p. (In Russ.)

LePage B.A. A new species of *Tsuga* (Pinaceae) from the middle Eocene of Axel Heiberg Island, Canada, and an assessment of the evolution and biogeographical history of the genus. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 2003, vol. 141, no. 3, pp. 257–296. DOI: 10.1046/j.1095-8339.2003.00131.x.

Methods of experimental mycology. Kyiv: Naukova Dumka, 1982. 552 p. (In Russ.)

Mukhina L.N., *Aleksandrova M.S.* State of the plant collection of the genus *Picea* A. Dietrich in the Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences. *Woody plants: fundamental and applied research*. Kostroma, 2013, iss. 2, pp. 59-66. (In Russ.)

Mukhina L.N., *Aleksandrova M.S.*, *Kashtanova O.A.* Comprehensive assessment of the state of plants of the genus *Abies* Mill. *Bulletin of the Main Botanical Garden*, 2013, iss. 199, no. 2, pp. 43-51. (In Russ.)

Mukhina L.N., *Aleksandrova M.S.*, *Kashtanova O.A.*, *Seraya L.G.*, *Dymovich A.V.* The state of plants of the genera *Picea*, *Abies* and *Larix* in the collection of the Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences. *Information Bulletin of the Council of Botanical Gardens of the CIS Countries under the International Association of Academies of Sciences*, 2014, iss. 2 (25), pp. 44–50. (In Russ.)

Mukhina L.N., *Seraya L.G.*, *Kashtanova O.A.* Monitoring of the entomo-phytopathological state of woody plants of the Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences. *Forestry information*, 2015, no. 2, pp. 57-64 (In Russ.)

MycoBank fungal databases. URL: https://www.mycobank.org/ (accessed October 10, 2025).

Neklyaev S.E., *Larina G.E.*, *Seraya L.G.* Features of active mycogenic xylolysis on Scots pine in the zone of coniferous-broadleaf forests. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2023, iss. 244, pp. 164–183. DOI: 10.21266/2079–4304.2023.244.164–183. (In Russ.)

Niemelä T. Polypore fungi of Finland and adjacent territories of Russia. *Norrlinia*, 2001, vol. 8, pp. 1-120. (In Russ.)

Niemelä T. Polypores, lignicolous fungi. *Norrlinia*, 2005, vol. 13, pp. 1–320.

Niemelä T. Suomen käävät – The polypores of Finland. *Norrlinia*, 2016, vol. 31, pp. 1–430.

Perevedentseva L.G. Key to fungi (agaricoid basidiomycetes). M.: KMK, 2015. 119 p. (In Russ.)

Rysin S.L., *Plotnikova L.S.*, *Nemova E.M.*, *Grinash M.N.* Monitoring Introduced Woody Plants in Urbanized Areas. *Monitoring of Natural Heritage: collection of art.* Moscow, 2009, pp. 132–168. (In Russ.)

Ryvarden L., *Gilbertson R.L.* European polypores. Part 1. *Abortiporus–Lindtneria*. *Synopsis Fungorum*, 1993, vol. 6, pp. 1–387.

Sokolova E.S., *Kolganikhina G.B.*, *Galasyeva T.V.*, *Strepenyuk L.P.*, *Semenova M.A.* Species composition and distribution of dendrotrophic fungi in different categories of green spaces of Moscow. *Lesnoy Vestnik*, 2006, no. 2, pp. 98-116. (In Russ.)

Storozhenko V.G., *Krutov V.I.*, *Ruokolainen A.V.*, *Kotkova V.M.*, *Bondartseva M.A.* Atlas and identification guide to wood-destroying fungi of the Russian Plain. Moscow: KMK, 2014. 198 p. (In Russ.)

Tkachenko O.B., *Keldysh M.A.*, *Kashtanova O.A.*, *Mukhina L.N.*, *Seraya L.G.*, *Chervyakova O.N.*, *Treyvas L.Yu.*, *Kozarzhevskaya E.F.* Protection of woody plants from pathogens and pests. Moscow: RAS, 2018. 336 p. (In Russ.)

Woody plants of the N.V. Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences. 60 years of introduction. Moscow: Nauka, 2005. 586 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 26.01.2026

Брынцев В.А., Коженкова А.А., Некляев С.Э., Рысин С.Л. Состояние уникального насаждения тсуги канадской и его микобиоты в дендрарии ГБС РАН // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2026. Вып. 259. С. 125–143. DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.125-143

В статье представлены результаты комплексного исследования уникального 73-летнего насаждения тсуги канадской (*Tsuga canadensis*) в дендрарии ГБС РАН. Исследование включало оценку биометрических показателей, жизненного состояния деревьев и анализ микобиоты насаждения. Установлено, что деревья достигли средних показателей: высота – 19,8 м, диаметр – 25,6 см, что подтверждает способность вида формировать высокорослые древостои в условиях центра Европейской России. При этом 41% деревьев относится к 1-й и 2-й категориям санитарного состояния, однако лишь 22% имеют нормально развитую крону, а 31% – нормально развитый ствол. Исследование микобиоты выявило формирование специфического комплекса грибов, включающего как патогенные, так и сапротрофные виды. За период наблюдений 2023-2025 гг. по сравнению с периодом 2006-2018 гг. количество видов дендробиотных грибов, развивающихся на древесине и корнях тсуги канадской, увеличилось на 75%. Это свидетельствует о глубокой интеграции насаждения в местный микобиом: грибное сообщество становится более разнообразным и функционально зрелым. Предполагается, что ухудшение состояния насаждения обусловлено высокой плотностью посадки, конкуренцией с местными видами и воздействием грибных патогенов. Обоснована необходимость проведения разреживания для улучшения условий роста и повышения жизнеспособности растений. Исследование демонстрирует возможность успешного культивирования тсуги канадской в условиях центра Европейской России и имеет важное значение для развития интродукции редких древесных пород, а также для понимания процессов формирования микобиоты в искусственных насаждениях.

Ключевые слова: тсуга канадская (*Tsuga canadensis*), ГБС РАН, интродукция, дендрарий, микобиота, фитопатология, санитарное состояние, грибы, базидиомицеты, аскомицеты.

Bryntsev V.A., Kozhenkova A.A., Nekliaev S.E., Rysin S.L. The state of the unique stand of Canadian hemlock and its mycobiota in the arboretum of the MBG RAS. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2026, iss. 259, pp. 125–143 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.125-143

This article presents the results of a comprehensive study of a unique 73-year-old stand of Canadian hemlock (*Tsuga canadensis*) in the arboretum of the Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences. The study included an assessment of biometric indicators, tree vitality, and mycobiota. It was established that the trees have reached average heights: 19.8 m and a diameter of 25.6 cm, confirming the species' ability to form tall stands in the conditions of Central European Russia. While 41% of the trees belong to categories 1 and 2 of health status, only 22% have a normally developed crown, and 31% have a normally developed trunk. Mycobiota analysis revealed the formation of a specific fungal complex, including both pathogenic and saprotrophic species. Over the observation period of 2023-2025, compared with the period 2006-2018, the number of dendrobiont fungi developing on the wood and roots of Canadian hemlock increased by 75%. This demonstrates the deep integration of the stand into the local mycobiome: the fungal community is becoming more diverse and functionally mature. It was assumed that the deterioration of the stand is due to high planting density, competition with native species, and the impact of fungal pathogens. The need for thinning to improve growing conditions and increase plant viability is substantiated. This study demonstrates the feasibility of successfully cultivating Canadian hemlock in the conditions of Central European Russia and has important implications for the introduction of rare tree species, as well as for understanding the processes of mycobiota formation in artificial stands.

Keywords: Canadian hemlock (*Tsuga canadensis*), Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences, introduction, arboretum, mycobiota, phytopathology, sanitary condition, fungi, basidiomycetes, ascomycetes.

БРЫНЦЕВ Владимир Альбертович – главный научный сотрудник Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина РАН, доктор сельскохозяйственных наук, доцент. SPIN-код: 7075-2696. ORCID: 0000-0002-6271-1444.

127276, ул. Ботаническая, д. 4, г. Москва, Россия. E-mail: bryntsev@mail.ru

BRYNTSEV Vladimir A. – DSc (Agricultural), Chief Researcher, N.V. Tsitsin Main Botanical Garden of the RAS, Associate Professor. SPIN-code: 7075-2696. ORCID: 0000-0002-6271-1444.

127276. Botanicheskaya str. 4. Moscow. Russia. E-mail: bryntsev@mail.ru

КОЖЕНКОВА Анна Альбертовна – научный сотрудник Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина РАН, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент. SPIN-код: 3103-8525. ORCID: 0000-0001-6267-5386.

127276, ул. Ботаническая, д. 4, г. Москва, Россия. E-mail: kozhenkova_anna@mail.ru

KOZHENKOVA Anna A. – PhD (Agricultural), Researcher, N.V. Tsitsin Main Botanical Garden of the RAS, Associate Professor. SPIN-code: 3103-8525. ORCID: 0000-0001-6267-5386.

127276. Botanicheskaya str. 4. Moscow. Russia. E-mail: kozhenkova_anna@mail.ru

НЕКЛЯЕВ Святослав Эдуардович – старший научный сотрудник Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина РАН, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 1940-6377. ORCID: 0000-0002-4050-3564.

127276, ул. Ботаническая, д. 4., г. Москва, Россия. E-mail: slava9167748107@yandex.ru

NEKLIAEV Svyatoslav E. – PhD (Agricultural), Senior Researcher, N.V. Tsitsin Main Botanical Garden of the RAS. SPIN-code: 1940-6377. ORCID: 0000-0002-4050-3564.

127276. Botanicheskaya str. 4. Moscow. Russia. E-mail: slava9167748107@yandex.ru

РЫСИН Сергей Львович – ведущий научный сотрудник Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина РАН, кандидат биологических наук, доцент. SPIN-код: 8528-0744. ORCID: 0009-0000-6635-3114.

127276, ул. Ботаническая, д. 4, г. Москва, Россия. E-mail: ser-rysin@yandex.ru

RYSIN Sergey L. – PhD (Biological), Leading Researcher, N.V. Tsitsin Main Botanical Garden of the RAS, Associate Professor. SPIN-code: 8528-0744. ORCID: 0009-0000-6635-3114.

127276. Botanicheskaya str. 4. Moscow. Russia. E-mail: ser-rysin@yandex.ru

УДК 630*2*5

Д.А. Зайцев, Д.А. Данилов, С.В. Навалихин, Д.С. Тюрин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ СТРУКТУРНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ НАДЗЕМНОЙ ФИТОМАССЫ СОСНЫ И ЕЛИ ПРИ ИНТЕНСИВНОМ ВЫРАЩИВАНИИ

Введение. Продуктивность насаждения может быть объективно оценена по массовым показателям всех частей деревьев, в нём произрастающих [Уткин и др., 1996; Усольцев, 2007; Тарасов и др., 2018; Пристова, 2020; Усольцев, Цепордей, 2020; Януш и др., 2023; Zianis et al., 2005]. При ускоренном выращивании древесины хвойных пород необходимо проводить комплексную оценку наземной фитомассы для её рационального использования в хозяйственных целях [Плантационное..., 2007; Штукин и др., 2013; Данилов и др., 2014; Пеккоев, 2016; Данилов, Тюрин, 2017; Данилов, 2019]. Плантационное лесовыращивание предполагает использование всех частей выращиваемых деревьев для максимальной экономической отдачи вложенных затрат в процесс выращивания насаждений [Тюрин и др., 2024]. Для этого необходимо знать прогнозный объём наземной фитомассы плантаций ели и сосны при различных режимах выращивания [Припутина и др., 2016; Тюрин и др., 2024]. Целью проводимого исследования являлось выявление закономерностей зависимости различных частей надземной фитомассы деревьев сосны и ели от густоты культур и агротехнических мероприятий в насаждениях, выращиваемых по интенсивной технологии к возрасту 40 лет.

Объекты и методика исследования. Опытные объекты ускоренного выращивания сосны и ели расположены на территории Северо-Западного региона России в Ленинградской области в Гатчинском районном лесничестве: ели – в Орлинском участковом лесничестве, кв. 93, сосны – в Дружносельском участковом лесничестве, кв. 81. Участок под заложенными насаждениями сосны и ели сравнительно ровный, интенсивно осушенный. Это бывший сенокос низкого качества с возобновлением ольхи и кустарниковых пород.

Задача опыта состояла в изучении влияния комплекса различной густоты культур и агротехнических мероприятий на продуктивность ели и сосны в посадках плантационного типа для получения балансовой древесины по короткой ротации выращивания к возрасту насаждения 40 лет [Плантационное..., 2007].

Варианты опыта по густоте насаждений – 1000, 2000 и 4000 шт./га 3-летних сеянцев ели европейской (*Picea abies* (L.) H. Karst.) и 4000 шт./га 2-летних сеянцев сосны обыкновенной (*Pinus silvestris* L.) [Маркова и др., 2008].

В вариантах опыта с обработкой почвы плугами ПЛ-2-50 и ПЛО-400 заложены секции с разными режимами ухода: «удобрения», «удобрения+гербициды», «контроль».

В насаждениях ели в возрасте 16 лет было проведено разреживание на половине вариантов насаждений на опытных объектах. Снижена густота деревьев до 2000 шт./га на вариантах с первоначальной густотой 4000 шт./га, на вариантах с первоначальной густотой 2000 шт./га – до 1500 шт./га и до 1000 шт./га (табл. 1). В 1991 г. на всех пробных площадях в насаждениях сосны, за исключением контроля, проведено разреживание сосны до густоты 1500 шт./га (табл. 2). Описание опытных объектов более подробно приведено в других опубликованных работах [Плантационное..., 2007; Маркова и др., 2008].

Для определения показателей фитомассы ствола использовалась методика отбора модельных деревьев по ГОСТ 16483.6-80 (СТ СЭВ 1141-78) «Метод отбора модельных деревьев и кряжей для определения физико-механических свойств древесины насаждений».

Таблица 1

Таксационные характеристики плантационных насаждений ели в возрасте 40 лет

Taxation characteristics of plantation spruce stands at the age of 40 years

Густота на начало опыта, шт./га	Густота на конец опыта, шт./га	$D_{1.3}$, см	H, м	Запас, м³/га
1000	950	23,7	19,7	424
2000	1300	19,7	19,0	384
4000	1600	18,1	19,5	407
2000 (проведена рубка)	1065	23,3	20,3	468
4000 (проведена рубка)	1050	19,7	20,0	336

Для исследования наземной фитомассы отбирали модельные деревья в каждом варианте опыта [Уткин и др., 1996; Усольцев, Цепордей, 2020; Тюрин и др., 2024]. Измерение образцов с модельных деревьев для исследований наземной фитомассы деревьев сосны и ели проводили методом прямого взвешивания на площадных весах. Модельные деревья раскряжевывали на метровые отрезки, проводился отбор древесины в виде шайб для последующего определения плотности древесины на высечках. Кроновая часть деревьев взвешивалась на площадных аккумуляторных

электронных весах с точностью до 1 г. Далее отбирали модельные ветви из верхней, средней и нижней части кроны деревьев. Хвоя отбиралась с ветвей модельных деревьев и взвешивалась в сыром состоянии. Масса хвои и модельных ветвей определялась в абсолютно сухом состоянии после сушки образцов при температуре 105°С в сушильном шкафу. Далее общая масса ветвей и хвои пересчитывалась на всю кроновую часть модельного дерева [Тарасов и др., 2018; Пристова, 2020]. Определение плотности древесины проводилось по методу профессора Полубояринова [1976].

Таблица 2

Таксационные характеристики плантационных насаждений сосны в возрасте 40 лет

Taxation characteristics of plantation pine stands at the age of 40 years

Вариант опыта	$D_{1,3}$, см	H, м	Число стволов, шт./га	Запас, м^3
Пласты плуга ПЛ-2-50:				
Гербициды	21,8±0,29	19,2	1114	368
Удобрение	19,9±0,29	19,3	1517	421
Гербициды и удобрение	21,1±0,25	20,3	1155	401
Пласты плуга ПЛО-400:				
Контроль	20,3±0,29	19,2	1035	298
Гербициды и удобрения	20,5±0,28	19,3	1232	376
Удобрение	19,7±0,28	18,8	1012	275

По результатам измерений собранных образцов с 36 модельных деревьев ели и 34 деревьев сосны были получены данные по стволовой фитомассе, а также фитомассе ветвей и хвои [Тюрин и др., 2024]. Таким образом, имелась возможность смоделировать уравнения зависимости фитомассы ветвей и хвои от фитомассы ствола. Наблюдаемая корреляционная зависимость между этими показателями высокая (R>0,90).

Для статистической обработки использовался аппарат регрессионного анализа и определялась достоверность по критерию Фишера [Городничев и др., 2019].

Результаты исследования. В ходе исследования рассмотрены варианты возможных применяемых уравнений: линейная, полиноминальная, и степенная функции [Герасимов, Хлюстов, 2001; Бондаренко, Жигунов, 2016]. Были рассчитаны уравнения зависимости фитомассы веток от ствола при исходной густоте деревьев ели 1000 штук на га (рис. 1).

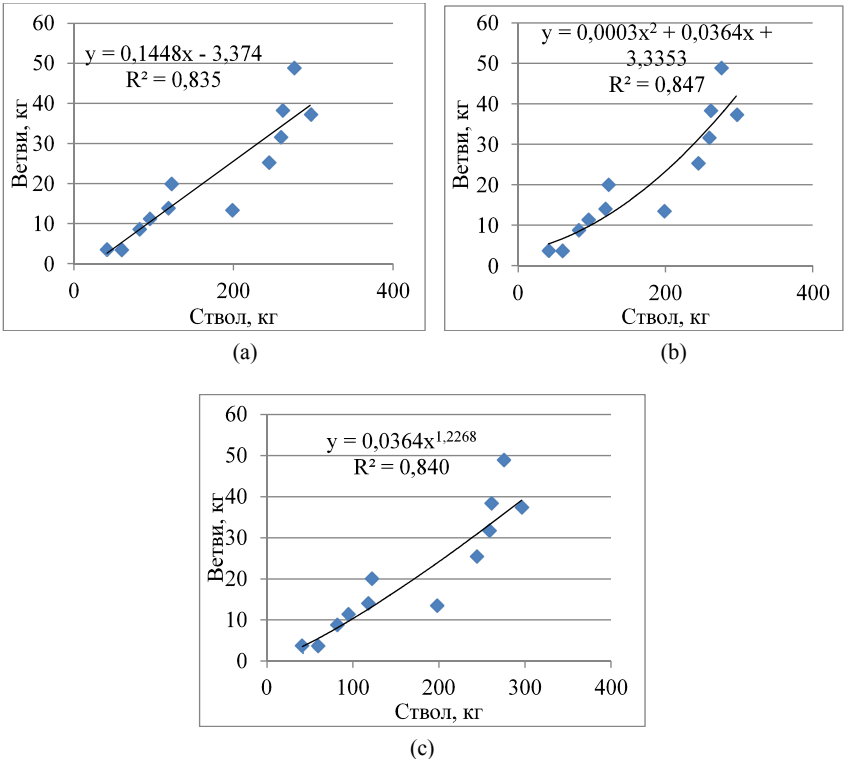


Рис. 1. Варианты моделей регрессии зависимости фитомассы ветвей от стволовой для варианта 1000 шт./га: (a) линейная; (b) полиноминальная; (c) степенная

Fig. 1. Variants of regression models for the dependence of branch phytomass on stem phytomass for the 1000 pcs./ha variant: (a) lineal; (b) polynominal; (c) power

Полиноминальная модель значительных преимуществ не имеет, R^2 в этом случае незначительно выше, а в других рассматриваемых случаях он одинаков с линейной функцией или даже ниже. Возник вопрос – есть ли смысл использовать усложненную степенную функцию, если линейная имеет сходный коэффициент детерминации? Рассчитаем формулу линейной зависимости фитомассы кроны и хвои от фитомассы ствола вида $ax+b$ и сравним её применимость и достоверность со степенной. И в том, и в другом случае уравнения значимы по F-критерию. Сравним полученные данные по ветвям при густоте 1000 шт./га с использованием линейной и степенной функций (табл. 3).

Таблица 3

Сравнение используемых функций зависимости фитомассы ветвей от фитомассы ствола при густоте 1000 шт./га

Comparison of the used functions of dependence of branch phytomass on trunk phytomass at a density of 1000 pcs./ha

Вид функции	Уравнение	R^2	MAPE, %	MSE
Линейная	$y = 0{,}145*x-3{,}374$	0,835	23,21	33,22
Степенная	$y = 0{,}036*x\text{^}1{,}227$	0,840	22,40	33,01

Примечание: здесь и в табл. 4 MAPE – средняя абсолютная ошибка аппроксимации; MSE – среднеквадратическая ошибка

И в том, и в другом случае средняя абсолютная ошибка аппроксимации превышает 20%, что является недостатком обоих вариантов моделей. Это связано с различной размерностью модельных деревьев по ступеням толщины и их положением в древостое, а, следовательно, необходимостью усреднения модели на ряд деревьев. Среднеквадратическая ошибка в целом сходная. Как видно из табл. 3, для линеаризованной модели коэффициент детерминации – 0,835 (он статистически значим при уровне надежности 0,95%), для степенной модели – 0,840, следовательно, не имеет практического смысла усложнять модель. В итоге 83,5% вариации результативного признака объясняется уравнением линейной регрессии (0,145**x*-3,374). Уравнение в целом признается значимым по критерию Фишера, ошибка аппроксимации – 23%.

Аналогичные вычисления для других вариантов опыта показали сходную картину: линейное уравнение является наиболее оптимальным и наглядным вариантом описания влияния стволовой фитомассы на фитомассу ветвей и хвои (табл. 4). Проведенные вычисления по линейной модели для других вариантов имели сходные значения коэффициента детерминации. Итоговые данные по трем вариантам опыта в графическом виде распределения представлены на рис. 2. Во всех случаях уравнения значимы по критерию Фишера.

В связи с тем, что густота насаждений на настоящий момент значительно отличается от исходной, и для большей применимости модели данные по трем вариантам опыта были объединены, т.к. анализ показателей фитомассы различных вариантов густоты на однородность по *t*-критерию на уровне 95% показал относительную однородность данных. Матрица парных корреляций представлена в табл. 5.

Таблица 4

Сравнение используемых уравнений зависимости показателей фитомассы частей кроны от стволовой деревьев ели по вариантам опыта

Comparison of the used equations for the dependence of the phytomass indicators of the crown parts on the stem of spruce trees according to the experimental variants

Вариант опыта и зависимая переменная	Уравнение	R^2	MAPE, %	MSE
1000 шт./га, ветви	$y = 0{,}145*x - 3{,}374$	0,835	23,21	33,22
1000 шт./га, хвоя	$y = 0{,}117*x - 1{,}543$	0,820	22,69	24,79
2000 шт./га, ветви	$y = 0{,}133*x + 1{,}161$	0,885	35,06	24,71
2000 шт./га, хвоя	$y = 0{,}102*x + 1{,}018$	0,846	28,54	20,30
4000 шт./га, ветви	$y = 0{,}150*x - 5{,}151$	0,833	46,63	20,01
4000 шт./га, хвоя	$y = 0{,}132*x - 5{,}852$	0,832	45,04	15,59

На основании моделирования для 30 модельных деревьев (были удалены экстремумы – деревья, находящиеся ближе к краю пробных площадей) формула зависимости фитомассы ветвей от фитомассы ствол приняла вид:

$$y = 0{,}141 * x - 1{,}323. \quad (1)$$

При $R^2 = 0{,}902$ (значим по *t*-критерию: $t_{расч} = 15{,}74$ при $t_{табл} = 1{,}70$) результаты являются статистически достоверными по критерию Фишера ($F_{расч} = 247{,}89$ при $F_{табл} = 4{,}21$). Средняя абсолютная ошибка составляет 18,52%, что по-прежнему является относительно высоким показателем (более 10%), но более оптимальным, чем в моделях, приведенных выше.

Для хвои уравнение принимает вид:

$$y = 0{,}114 * x - 1{,}179. \quad (2)$$

При $R^2 = 0{,}843$ (значим по t-критерию: $t_{расч} = 12{,}04$ при $t_{табл} = 1{,}70$) результаты являются статистически достоверными по критерию Фишера ($F_{расч} = 144{,}92$ при $F_{табл} = 4{,}21$). Средняя абсолютная ошибка модели по хвое составляет 23,56%

В целом модель может применяться для прогноза показателей фитомассы кроны. В графическом виде распределения отображены на рис. 3.

Имеет биологический смысл выразить стволовую фитомассу через фитомассу хвои. В таком случае уравнение регрессии примет вид:

$$y = 7{,}381 * x + 33{,}987. \quad (3)$$

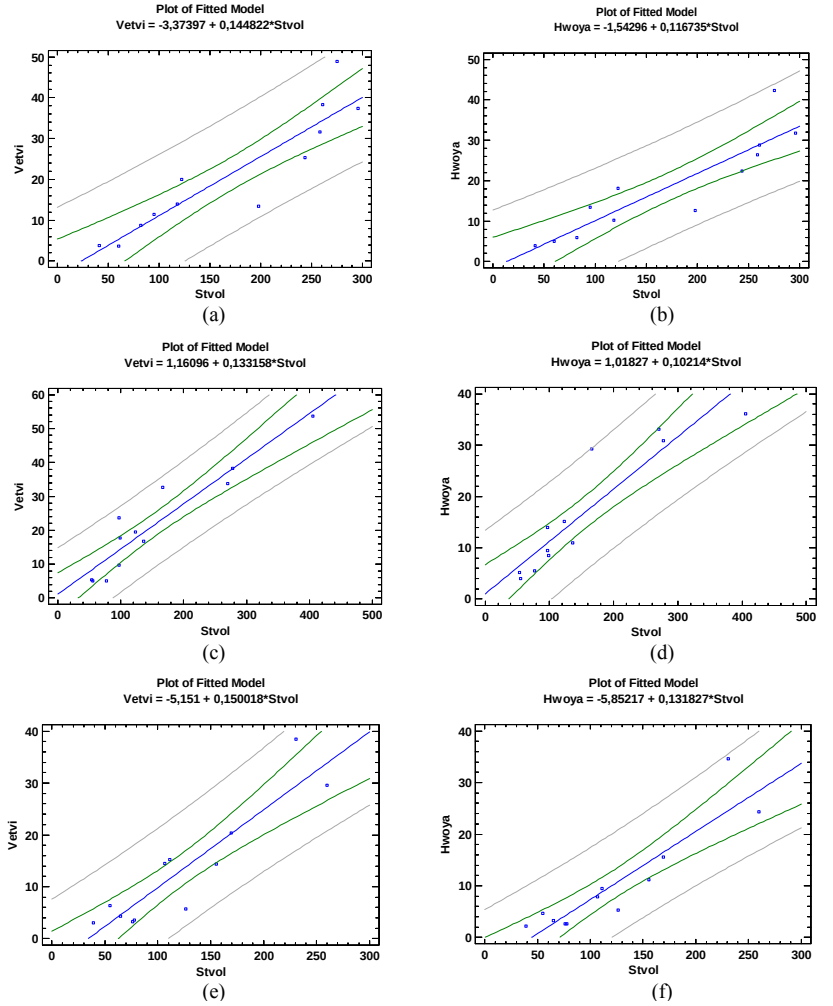


Рис. 2. Ожидаемое распределение и наблюдаемые значения фитомассы по вариантам опыта и частям кроны деревьев ели: (a) 1000 шт./га, ветви; (b) 1000 шт./га, хвоя; (c) 2000 шт./га, ветви; (d) 2000 шт./га, хвоя; (e) 4000 шт./га, ветви; (f) 4000 шт./га, хвоя

Fig. 2. Expected distribution and observed values of phytomass by experimental variants and parts of the spruce tree crown: (a) 1000 pcs./ha, branches; (b) 1000 pcs./ha, needles; (c) 2000 pcs./ha, branches; (d) 2000 pcs./ha, needles; (e) 4000 pcs./ha, branches; (f) 4000 pcs./ha, needles

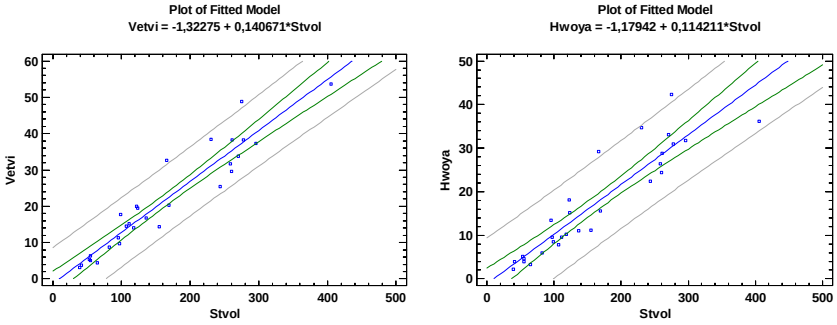
Таблица 5

Корреляции и средние показатели фитомассы дерева

Correlations and average values of tree phytomass

Показатели	Средние	Ст. откл.	Ствол	Ветви	Хвоя
Ствол	160,99	96,26	1,00	**0,95**	**0,92**
Ветви	21,32	14,26	**0,95**	1,00	**0,97**
Хвоя	17,21	11,97	**0,92**	**0,97**	1,00

Примечание: отмеченные полужирным шрифтом корреляции значимы на уровне достоверности 95%



(a) (b)

Рис. 3. Ожидаемое распределение и наблюдаемые значения надземной фитомассы по частям кроны ели: (a) ветви; (b) хвоя

Fig. 3. Expected distribution and observed values of aboveground phytomass in parts of the spruce crown: (a) branches; (b) needles

При R^2 = 0,843 (значим по *t*-критерию: $t_{расч}$ = 12,04 при $t_{табл}$ = 1,70) результаты являются статистически достоверными по критерию Фишера ($F_{расч}$ = 144,92 при $F_{табл}$ = 4,21). Средняя абсолютная ошибка модели составляет 19,18% (рис. 4).

По результатам измерений собранных образцов (34 модельных дерева) были получены данные по стволовой фитомассе, а также фитомассе ветвей и хвои сосны. Моделирование было проведено аналогичным ели образом с применением линейного моделирования как наиболее оптимального в данном случае метода.

Анализ показателей фитомассы сосны при различных густотах (950-1050, 1100-1200, 1300-1400 шт./га) по *t*-критерию на уровне 95% показал относительную однородность данных, поэтому их можно рассмотреть как одну совокупность. Матрица парных корреляций показателей представлена в табл. 6.

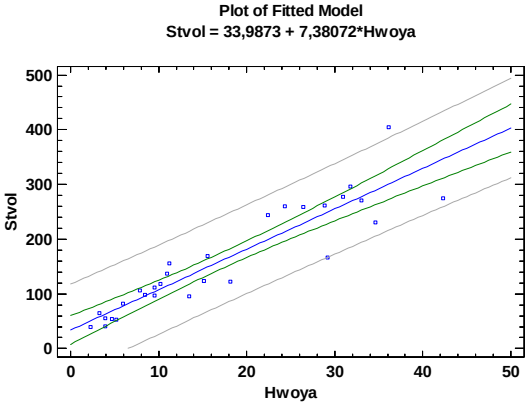


Рис. 4. Ожидаемое распределение и наблюдаемые значения фитомассы ствола ели

Fig. 4. Expected distribution and observed values of spruce trunk phytomass

Таблица 6

Корреляции и средние показатели фитомассы деревьев сосны

Correlations and average values of phytomass of pine trees

Показатели	Средние	Ст. откл.	Ствол	Ветви	Хвоя
Ствол	101,36	52,95	1,00	**0,90**	**0,77**
Ветви	9,16	8,11	**0,90**	1,00	**0,87**
Хвоя	4,23	3,04	**0,77**	**0,87**	1,00

Примечание: отмеченные полужирным шрифтом корреляции значимы на уровне достоверности 95%

На основании моделирования для 30 модельных деревьев (были удалены экстремумы – деревья, находящиеся ближе к краю пробных площадей). формула линейной зависимости фитомассы ветвей от фитомассы ствол имеет вид:

$$y = 0{,}138 * x - 4{,}820. \quad (4)$$

При $R^2 = 0{,}812$ (значим по t-критерию: $t_{расч}$=10,79 при $t_{табл}$= 1,70) результаты являются статистически достоверными по критерию Фишера ($F_{расч} = 116{,}57$; при $F_{табл} = 4{,}21$). Средняя абсолютная ошибка составляет 36,24%, что является достаточно высоким показателем, но модель может применяться для прогноза показателей фитомассы ветвей в зависимости от показателей ствола.

Для хвои уравнение имеет вид:

$$y = 0{,}443 * x - 0{,}257. \quad (5)$$

Уравнение обуславливает зависимость в меньшей степени, чем для ветвей. При $R^2 = 0{,}594$ (значим по t-критерию: $t_{расч} = 6{,}28$ при $t_{табл} = 1{,}70$) результаты являются статистически достоверными по критерию Фишера ($F_{расч} = 39{,}46$ при $F_{табл} = 4{,}21$). Средняя абсолютная ошибка модели по хвое составляет 97%. Низкая обусловленность модели для хвои не позволяет рекомендовать её применение для расчета показателей.

В случае выражения стволовой фитомассы через фитомассу хвои уравнение регрессии примет вид:

$$y = 13{,}408 * x + 44{,}615. \quad (6)$$

При $R^2 = 0{,}594$ (значим по t-критерию: $t_{расч} = 6{,}28$ при $t_{табл} = 1{,}70$) результаты являются статистически достоверными по критерию Фишера ($F_{расч} = 39{,}46$ при $F_{табл} = 4{,}21$). Средняя абсолютная ошибка модели составляет 28,82%.

В графическом виде распределения отображены на рис. 5.

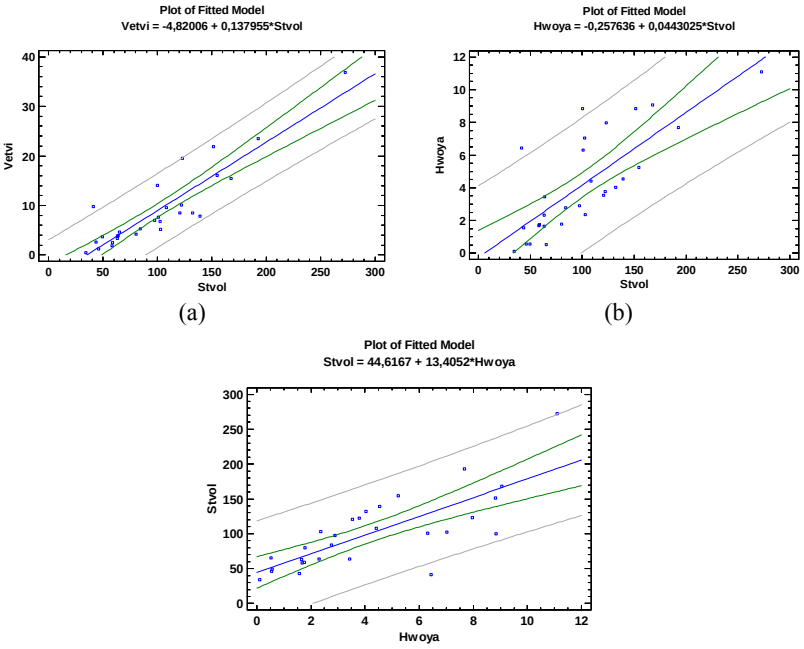


Рис. 5. Ожидаемое распределение и наблюдаемые значения надземной фитомассы сосны по вариантам опыта и частям кроны: (a) ветви; (b) хвоя; (c) ствол

Fig. 5. Expected distribution and observed values of aboveground pine biomass by experimental variants and crown parts: (a) branches; (b) needles; (c) stem

Заключение. Полученные регрессионные уравнения могут быть использованы для определения наземной фитомассы сосны и ели малоразрушающими методами на основе проведения таксационной оценки насаждения и с отбором образцов древесины для определения её плотности с последующим определением массы ствола. Также полученные зависимости частей наземной фитомассы деревьев сосны и ели могут быть использованы для определения общей продуктивности насаждений сосны и ели в сходных условиях выращивания малоразрушающими методами.

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

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Бондаренко А.С., *Жишунов А.В.* Статистическая обработка материалов лесоводственных исследований: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. 125 с.

Герасимов Ю.Ю., *Хлюстов В.К.* Математические методы и модели в расчётах на ЭВМ: применение в лесоуправлении и экологии: учебник для лесных вузов. М.: МГУЛ, 2001. 260 с.

Городничев Р.М., *Пестрякова Л.А.*, *Ушницкая Л.А.*, *Левина С.Н.*, *Давыдова П.В.* Методы экологических исследований. Основы статистической обработки данных: учеб.-метод. пособие. Якутск: Издательский дом СВФУ, 2019. 94 с.

Данилов Д.А. Качественные и количественные характеристики древесины ели и сосны при плантационном выращивании на Северо-Западе России // Сохранение лесных экосистем: проблемы и пути их решения: мат. II межд. науч.-практ. конф. Киров, 2019. С. 74-78.

Данилов Д.А., *Тюрин Д.С.* Строение и плотность древесины ели в плантационных культурах // Лесной вестник. 2017. №4. С. 25-29.

Данилов Д.А., *Навалихин С.В.*, *Тюрин Д.С.* Кроновая фитомасса в 40-летних плантационных культурах ели // Актуальные проблемы аграрной науки в XXI веке: мат. Всерос. заоч. науч.-практ. конф. Пермь, 2014. Ч. 1. С. 8–10.

Маркова И.А., *Шестакова Т.А.*, *Бутенко О.Ю.*, *Большакова Н.В.*, *Степанова О.П.* Лесосырьевые плантации сосны и ели. СПб.: СПбНИИЛХ, 2008. 158 с.

Пеккоев А.Н. Качество древесины культур ели при ускоренном лесовыращивании // ИВУЗ. Лесной журнал. 2016. №1. С. 89–99.

Плантационное лесоводство. СПб/: СПбГПУ, 2007. 366 с.

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

Пристова Т.А. Фитомасса древесных растений в лиственных фитоценозах послерубочного происхождения // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. 2020. №1. С. 5–13.

Припутина И.В., *Фролова Г.Г.*, *Быховец С.С.*, *Шанин В.Н.*, *Лебедев В.Г.*, *Шестибратов К.А.* Моделирование продуктивности лесных плантаций при разных

схемах пространственного размещения деревьев // Математическая биология и биоинформатика. 2016. №11 (2). С. 245–262. DOI: 10.17537/2016.11.245.

Тарасов С.И., *Пристова Т.А.*, *Бобкова К.С.* Динамика фитомассы древостоя лиственно-хвойного фитоценоза средней тайги Республики Коми // Сибирский лесной журнал. 2018. №1. С. 50-58.

Тюрин Д.С., *Зайцев Д.А.*, *Данилов Д.А.* Структура надземной фитомассы ели и сосны в плантационных насаждениях, выращиваемых по короткой ротации // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2024. №1. С. 4-18. DOI: 10.21178/2079-6080.2024.1.4.

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

Усольцев В.А., *Цепордей И.С.* Квалиметрия фитомассы лесных деревьев: плотность и содержание сухого вещества : монография. Екатеринбург: УГЛТУ, 2020. 178 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.

Штукин С.С., *Пауль Э.Э.*, *Волович П.И.* Изменение качества древесины на лесных плантациях сосны и ели // Труды БГТУ. 2013. №1. С. 129–131.

Януш С.Ю., *Зайцев Д.А.*, *Данилов Д.А.* Плотность древесины сосны и ели в насаждениях на старопахотных и лесных землях в Ленинградской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. Вып. 243. С. 46-67. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.243.46-67.

Zianis D., *Muukkonen P.*, *Mäkipää R.*, *Mencuccini M.* Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. Tampere, 2005. 63 p.

References

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.)

Danilov D.A. Qualitative and quantitative characteristics of spruce and pine wood in plantation cultivation in the North-West of Russia. *Conservation of forest ecosystems: problems and ways to solve them*: proc. of the II int. sci.-pract. conf. Kirov, 2019, pp. 74-78. (In Russ.)

Danilov D.A., *Tyurin D.S.* Structure and density of spruce wood in plantation cultures. *Forest Bulletin*, 2017, no. 4, pp. 25-29. (In Russ.)

Danilov D.A., *Navalikhin S.V.*, *Tyurin D.S.* Crown phytomass in 40-year-old spruce plantation crops. *Actual problems of agrarian science in the XXI century*: proc. of the All-Russ. extramur. sci.-pract. conf. Perm, 2014, part 1, pp. 8-10. (In Russ.)

Gerasimov Yu. Yu., *Khlyustov V.K.* Mathematical methods and models in computer calculations: application in forest management and ecology: textbook for forestry universities. Moscow: MSUL, 2001. 260 p. (In Russ.)

Gorodnichev R.M., *Pestryakova L.A.*, *Ushnitskaya L.A.*, *Levina S.A.*, *Davydova P.V.* Methods of ecological research. Fundamentals of statistical data processing: textbook. Yakutsk: Publishing House of SVFU, 2019. 94 p. (In Russ.)

Markova I.A., *Shestakova T.A.*, *Butenko O.Yu.*, *Bolshakova N.V.*, *Stepanova O.P.* Forestry plantations of pine and spruce. St. Petersburg: SPbNIILKh, 2008. 158 p. (In Russ.)

Pekkoev A.N. Wood quality of spruce cultures at accelerated forest-growing. *Russian forestry journal*, 2016, no. 1, pp. 89-99. (In Russ.)

Plantation forestry. St. Petersburg: SPbSPU, 2007. 366 p. (In Russ.)

Poluboyarinov O.I. Wood density. Moscow: Lesn. prom-st', 1976. 160 p. (In Russ.)

Priputina I.V., *Frolova G.G.*, *Bykhovets S.S.*, *Shanin V.N.*, *Lebedev V.G.*, *Shestibratov K.A.* Modeling the productivity of forest plantations under different schemes of spatial placement of trees. *Mathematical Biology and Bioinformatics*, 2016, no. 11 (2), pp. 245-262. DOI: 10.17537/2016.11.245. (In Russ.)

Pristova T.A. Phytomass of woody plants in deciduous phytocenoses of post-cutting origin. *Lesnoy Vestnik*, 2020, no. 1, pp. 5-13. (In Russ.)

Shtukin S.S., *Paul E.E.*, *Volovich P.I.* Changes in the quality of wood in forest plantations of pine and spruce. *Proceedings of the Belarusian State Technical University*, 2013, no. 1, pp. 129-131. (In Russ.)

Tarasov S.I., *Pristova T.A.*, *Bobkova K.S.* Dynamics of stand phytomass of a deciduous-coniferous phytocenosis of the middle taiga of the Komi Republic. *Siberian Forestry Journal*, 2018, no. 1, pp. 50-58. (In Russ.)

Tyurin D.S., *Zaitsev D.A.*, *Danilov D.A.* The structure of aboveground phytomass of spruce and pine in plantations grown in short rotation. *Proceedings of the St. Petersburg Research Institute of Forestry*, 2024, no. 1, pp. 4-18. DOI: 10.21178/2079-6080.2024.1.4. (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., *Tsepordey I.S.* Qualimetry of forest trees phytomass: density and dry matter content. Ekaterinburg: UGLTU, 2020. 178 p. (In Russ.)

Utkin A.I., *Zamolodchikov D.G.*, *Gulbe T.A.*, *Gulbe Ya.I.* Allometric equations for phytomass based on data of pine, spruce, birch and aspen trees in the European part of Russia. *Lesovedenie*, 1996, no. 6, pp. 36-46 (In Russ.)

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.)

Zianis D., *Muukkonen P.*, *Mäkipää R.*, *Mencuccini M.* Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. Tampere, 2005. 63 p.

Материал поступил в редакцию 27.12.2025

Зайцев Д.А., Данилов Д.А., Навалихин С.В., Тюрин Д.С. Определение зависимостей между структурными элементами надземной фитомассы сосны и ели при интенсивном выращивании // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2026. Вып. 259. С. 144–158. DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.144-158

Проведено исследование зависимости между элементами структуры надземной фитомассы деревьев сосны и ели, выращиваемых по интенсивной технологии к возрасту 40 лет в условиях Ленинградской области. На основе данных, полученных на модельных деревьях, смоделированы зависимости фитомассы между стволовой и кроновой частью деревьев сосны и ели. Определены уравнения линейной регрессии, позволяющие с высокой степенью обусловленности применять их для расчета наземной фитомассы в насаждениях, выращиваемых в сходных условиях.

Ключевые слова: надземная фитомасса, ускоренное выращивание, регрессионный анализ, уравнения зависимости, сосна, ель.

Zaitsev D.A., Danilov D.A., Navalikhin S.V., Tyurin D.S. Determination of dependencies between structural elements of aboveground phytomass of pine and spruce under intensive cultivation. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2026, iss. 259, pp. 144–158 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.144-158

The study of dependence between the elements of the structure of aboveground phytomass of pine and spruce trees grown under intensive technology by the age of 40 years in the conditions of the Leningrad region was carried out. On the basis of the data obtained on model trees the dependences of phytomass between trunk and crown parts of pine and spruce trees were modeled. Linear regression equations have been determined, which allow to apply them with a high degree of conditionality for calculation of ground phytomass in plantations grown in similar conditions.

Keywords: aboveground phytomass, accelerated growth, regression analysis, dependence equations, pine, spruce.

ЗАЙЦЕВ Дмитрий Андреевич – доцент кафедры лесоводства Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 1340-0849. ORCID: 0000-0002-8704-6516.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: disoks@gmail.com;

ведущий научный сотрудник отдела агрохимии и агроландшафтов Ленинградского НИИСХ «Белогорка» – филиала ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр картофеля им. А.Г. Лорха».

188338, Институтская ул., 1, д. Белогорка, Гатчинский район, Ленинградская область, Россия.

ZAYTSEV Dmitriy A. – PhD (Agricultural), Associate Professor, Department of Forestry, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 1340-0849. ORCID: 0000-0002-8704-6516.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: disoks@gmail.com;

leading research scientist of Department of Agrochemistry and Agrolandscapes, Leningrad Research Agriculture Institute Branch of Russian Potato Research Centre.

188338, Institutskaya str. 1, Belogorka, Leningrad Region, Russia.

ДАНИЛОВ Дмитрий Александрович – заведующий кафедры 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., 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: stown200@mail.ru

DANILOV Dmitry 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

НАВАЛИХИН Сергей Викторович – доцент кафедры лесных культур Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 3700-2299. ORCID: 0000-0002-2630-4868.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: 6423487@mail.ru

NAVALIKHIN Sergey V. – PhD (Agricultural), Associate Professor, Department of Forest Crops, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 3700-2299. ORCID: 0000-0002-2630-4868.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: 6423487@mail.ru

ТЮРИН Дмитрий Сергеевич – соискатель кафедры лесоводства Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат сельскохозяйственных наук.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: djdimaturn@gmail.com

TYURIN Dmitry S. – PhD (Agricultural), Applicant, Department of Forestry, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: djdimaturn@gmail.com

УДК 630.568

А.С. Алексеев, Д. Шариф

АНАЛИЗ И ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОГНОЗА ДИНАМИКИ ЛЕСНОГО ФОНДА ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ ПО МОДЕЛИ EFISCEN

Введение. Имитационное моделирование как метод изучения свойств сложных и очень сложных не полностью формализуемых систем имеет довольно длительную историю, которую обычно связывают с созданием Дж. Форрестером метода системной динамики в пятидесятые годы прошлого века [Форрестер, 1971, 1974, 2003].

Наиболее распространенным методическим подходом к моделированию экосистем является построение матричных моделей [Алексеев, 2009; Leslie, 1945; Usher, 1969, 1979, 1981; Sallnas, 1990; Logofet, Lesnaya, 2000; Logofet, 2008]. В обзоре [Liang, Picard, 2013] приведено более тысячи публикаций на тему применения матричных моделей для изучения различных аспектов динамики лесных экосистем. В работах Карева Г.П. [1994, 1999] обсуждаются различные подходы к построению математических моделей лесных экосистем и показано, что все различные подходы к моделированию являются частями единой математической теории. В работах [Pretzsch et al., 2002; Pretzsch, 2009] разработана система имитационного моделирования динамики лесных сообществ от отдельного дерева, совокупности деревьев до крупных лесных ландшафтов.

В содержательном обзоре [Chertov et al., 1999a] все возможные подходы к моделированию лесных экосистем сгруппированы в 3 раздела: имитационные модели, модели с учетом пространственных характеристик лесов и аналитические модели на уровне популяций и растительных сообществ экосистем.

Различные методы математического моделирования находят широкое применение для решения задач устойчивого управления лесами. Некоторые из них рассматриваются в монографиях [Computer…, 2006; De Lara, Doyen, 2008].

Наиболее известными из отечественных разработок имитационных моделей для лесных экосистем, основанных на иных принципах, являются FORRUS и EFIMOD.

FORRUS – имитационная модель динамики многовидовых разновозрастных лесных массивов, позволяет прогнозировать их развитие, определяя на каждом шаге моделирования в 5 лет состав древостоя, его таксационные характеристики по составляющим породам (средние значения высоты,

диаметра, возраста, запаса), включая численность стволов на 1 га, полноту и другие данные. При моделировании учитывается световая и кроновая конкуренция древостоя с учетом его пространственного положения [Чумаченко, 1993; Чумаченко и др., 2004, 2007; Chumachenko et al., 1996, 2003].

Система моделей лесных экосистем EFIMOD [Моделирование…, 2007; Chertov et al., 1999b; Komarov et al., 2003] является индивидуально-ориентированной. Она предназначена для моделирования биологических круговоротов элементов питательных веществ в лесных экосистемах таежной зоны и смешанных лесов. Система моделей рассчитывает параметры баланса углерода и азота и таксационные характеристики древостоев (густота, полнота, средние высота и диаметр, запас древесины). Модель основана на применении для моделирования процессов в растительных сообществах теории конечных автоматов [Зубкова и др., 2016].

Для моделирования динамики лесного фонда регионов в Европейском институте леса в 1990-е гг. была разработана специальная модель EFISCEN [Модель…, 2025], которая позволяет получать прогнозы состояния лесов регионов или даже целых стран при реализации различных сценариев ведения лесного хозяйства. Модель EFISCEN представляет собой матричную модель перехода площадей лесного фонда из одного состояния в другое под воздействием лесохозяйственных мероприятий и естественной динамики [Sallnas, 1990]. Модель широко применялась для прогнозирования состояния лесов в различных странах Европы при использовании разных сценариев, в том числе и в России с учетом возможных изменений климата [Леса…, 2020]. Модель EFISCEN была использована для прогноза состояния лесов Ленинградской области на 50 лет вперед с 1990 по 2040 гг. [Nabuurs, Lioubimov, 2000].

У имитационных моделей прогнозирования динамики лесных экосистем есть некоторые недостатки. К ним относится, прежде всего, их авторский характер, который делает очень затруднительной использование моделей другими исследователями и независимую проверку результатов расчетов по модели. Самый известный случай проверки результатов имитационного моделирования на длительную перспективу [Медоуз и др., 1991, 2007] дал противоречивые результаты.

Целью настоящей статьи является проверка совпадения (несовпадения) прогнозных, указанных в статье [Nabuurs, Lioubimov, 2000], и фактических характеристик лесного фонда Ленинградской области по данным Государственного лесного реестра (ГЛР) на 2021 г.

Материалы и методика исследования. Объектами исследований являются имитационная модель динамики лесного фонда Ленинградской области EFISCEN, сценарии, использованные при прогнозировании динамики

лесного фонда на 50 лет вперед, количественные оценки результатов прогнозирования. Применение модели дает возможность получить оценки состояния лесного фонда на промежуточные даты, которые приведены в статье [Nabuurs, Lioubimov, 2000]. Для проверки результатов имитационного моделирования и прогнозирования на 2020 г. используются официальные статистические данные Государственного лесного реестра о состоянии лесов Ленинградской области в 2021 г.

В рассматриваемой работе моделирование выполнялось авторами с использованием модели EFISCEN – матричной модели оценки лесных ресурсов, в которой лесной фонд представлен через распределение площади насаждений по классам возраста и запаса. Для расчетов лесной фонд Ленинградской области был разделен на 20 подрайонов, одну группу собственников, две группы классов бонитета и четыре основные древесные породы: ель, сосну, березу и осину – что позволило выделить 160 расчетных вариантов динамики лесов. Для каждого варианта учитывались площадь насаждений, запас древесины, возрастная структура и текущее чистое годичное изменение запаса, которое оценивалось по региональным таблицам хода роста. Управленческие воздействия задавались через параметры рубок ухода, рубок главного пользования (спелых и перестойных древостоев) и восстановления насаждений. Различия между сценариями были связаны с интенсивностью лесопользования и природоохранными ограничениями, учитывали исключение части площади старовозрастных насаждений из площадей рубок и увеличение доли древесины, получаемой за счет рубок ухода. Породный состав учитывался при формировании расчетных вариантов динамики лесов, вероятность смены преобладающей породы не задавалась как отдельный параметр модели.

Для моделирования на период 1990-2040 гг. с помощью модели EFISCEN были использованы следующие пять сценариев:

1. Идеальное управление лесами. В этом сценарии предполагается проведение всех необходимых лесохозяйственных мероприятий в полном соответствии с правилами, нормативами и рекомендациями, разработанными на основе научных исследований;

2. Обычная практика ведения лесного хозяйства, которая сформировалась в 1990-е гг. прошлого века. В частности, для всего периода моделирования предполагается использовать низкий уровень заготовки древесины, который сформировался в эти годы, в объеме 5,2 млн. $м^3$ в год;

3. Сценарий, направленный на достижение максимально возможного устойчивого уровня лесопользования. Он предполагает поиск с помощью модели максимального уровня заготовки древесины, при котором средние запасы древостоев будут поддерживаться на некотором постоянном уровне;

4. Сценарий, предполагающий восстановление лесохозяйственного производства и заготовки древесины конца 1980-х гг. в течение первых 20 лет;

5. Сценарий, предполагающий восстановление уровня производства лесного сектора как в предыдущем сценарии №4, но с учетом дополнительных требований охраны природы. В частности, предполагается сохранение старовозрастных лесов путем исключения их из расчетов пользования лесом и увеличение заготовок древесины с помощью выборочных рубок.

Результаты прогнозирования по модели сравнивались по следующим трем показателям: средний запас древостоев, средний прирост древостоев и объем заготовки древесины. Сравнение проводилось с фактическими значениями указанных показателей по данным Государственного лесного реестра о состоянии лесов Ленинградской области в 2021 г. в абсолютных и относительных величинах.

Для сравнения качества прогнозирования по 5 сценариям и определения наиболее точного из них для каждого из сценариев нами был предложен и рассчитывался индекс расхождения прогнозных результатов моделирования и фактических данных по следующей формуле:

$$I = \sum_{i=1}^{3} \frac{(x_i - y_i)}{x_i}, \quad (1)$$

где I – индекс расхождения прогнозных результатов моделирования и фактических данных, x_i – прогнозируемое значение показателя i, y_i – фактическое значение показателя i. Сравнение сценариев проводилось по следующим трем показателям: средний запас древесины, м^3/га; средний прирост (среднее изменение запаса растущего леса), м^3/га*год; объем заготовленной древесины, 10^6 м^3.

Значение индекса I показывает относительное расхождение между прогнозными результатами моделирования и фактическими данными. Положительное или отрицательное значение отражает направление отклонения прогнозного значения от фактического. Чем ближе значение индекса I к нулю, тем меньше расхождение между прогнозными и фактическими данными.

Сравнение выполнялось по каждому из рассматриваемых сценариев. Для обобщенной оценки расхождения между прогнозными и фактическими значениями использовался индекс расхождения I. С учетом характера и объема доступных данных статистический анализ был выполнен в форме сравнительной оценки прогнозных и фактических показателей в абсолютных и относительных единицах.

Результаты исследования и обсуждение. Результаты сравнения прогнозных значений среднего запаса древостоев, среднего прироста и объемов

лесопользования с фактическими данными 2021 г. приведены на рис. 1–3 и в табл. 1–3.

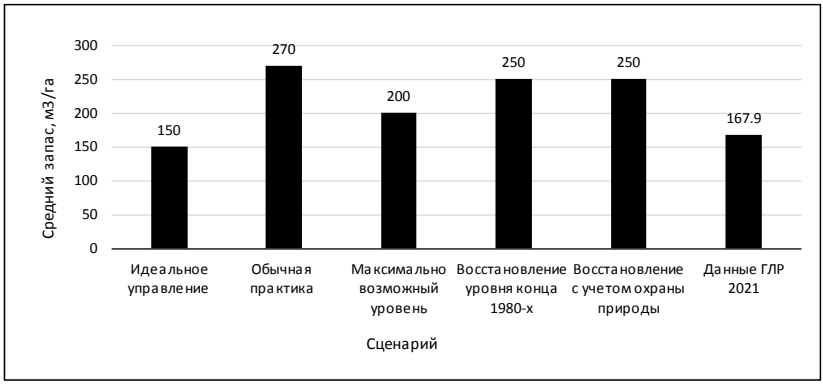


Рис. 1. Сравнение прогнозируемого по модели EFISCEN среднего запаса лесов Ленинградской области и фактических данных 2021 г.

Fig. 1. Comparison of the average forest growing stock per hectare of the Leningrad region predicted by the EFISCEN model and the actual data for 2021

Таблица 1

Прогнозируемый по модели EFISCEN и фактический средний запас лесов Ленинградской области

Projected by the EFISCEN model and the actual average forest growing stock per hectare of the Leningrad region

Сценарий	Средний запас, м^3/га	Отклонение от фактического значения ГЛР 2021 – 167,9 м^3/га	
		м^3/га	%
1	150	–17,9	–10,7
2	270	102,1	60,8
3	200	32,1	19,1
4	250	82,1	48,9
5	250	82,1	48,9

Данные рис. 1 и табл. 1 говорят о том, что фактический средний запас древостоев превышает прогнозную величину для сценария №1 – «Идеальное управление лесами» – на 10,7%, или на 17,9 м^3/га, что представляет собой относительно небольшое отклонение. При этом фактический средний

запас намного отстает от остальных сценариев: превышение среднего запаса лесов Ленинградской области по сценариям 2-5 варьирует от 19,1 до 60,8%, или от 32,1 до 102,1 м^3/га. В этом прогнозе среднего запаса древостоев Ленинградской области встает вопрос, по какой причине средний запас по сценарию №1 оказывается меньше, чем по всем остальным, включая фактический средний запас в 2021 г.

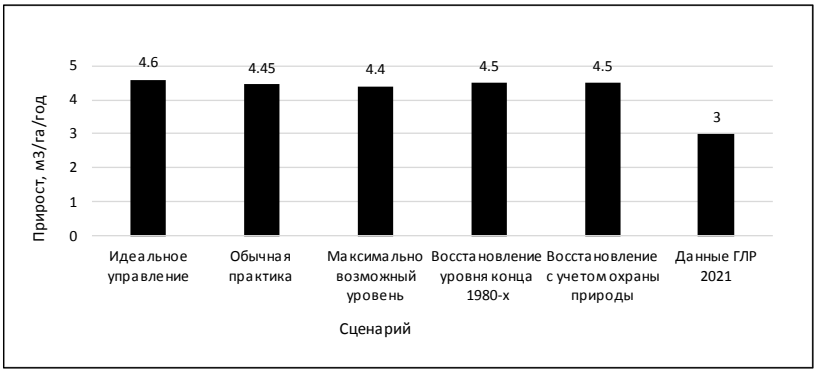


Рис. 2. Сравнение прогнозируемого по модели EFISCEN среднего прироста лесов Ленинградской области и фактических данных 2021 г.

Fig. 2. Comparison of the average forest growing stock increment per hectare of the Leningrad region predicted by the EFISCEN model and the actual data for 2021

Таблица 2

Прогнозируемый по модели EFISCEN и фактический средний прирост лесов Ленинградской области

Projected by the EFISCEN model and the actual average forest growing stock increment per hectare of the Leningrad region

Сценарий	Средний прирост, м^3/га*год	Отклонение от фактического значения ГЛР 2021 – 3,0 м^3/га*год	
		м^3/га*год	%
1	4,6	1,6	53,3
2	4,45	1,45	48,3
3	4,4	1,4	46,7
4	4,5	1,5	50,0
5	4,5	1,5	50,0

Из данных рис. 2 и табл. 2 следует, что фактический средний прирост в лесах Ленинградской области меньше всех прогнозных значений на величину от 1,4 до 1,6 м^3/га*год, или, в относительных величинах, от 46,7 до 53,3%. Наибольший прирост предсказан для сценария №1 – «Идеальное управление лесами», что может быть объяснено фактом минимального запаса древостоев при этом сценарии, который имеет место вследствие интенсивных мероприятий по уходу за лесом. Вместе стем следует отметить, что средний прирост (среднее изменение запаса на 1 га) не является вполне эффективным показателем для верификации результатов прогнозирования с помощью модели EFISCEN, так как его различие между сценариями находится в пределах погрешности исходных данных.

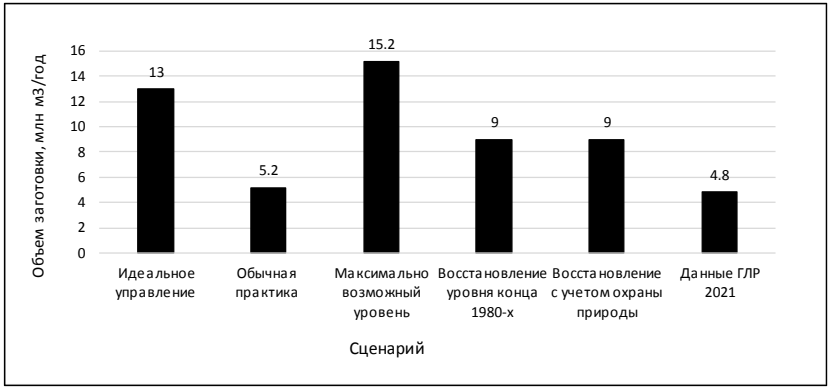


Рис. 3. Сравнение прогнозируемого по модели EFISCEN объемов заготовки древесины в Ленинградской области и фактических данных 2021 г.

Fig. 3. Comparison of the harvested wood volume in Leningrad region predicted by the EFISCEN model and the actual data for 2021

Данные рис. 3 и табл. 3 показывают, что фактическая заготовка древесины в Ленинградской области в объеме 4,8 млн. м^3 в 2021 г. наиболее близка к прогнозу по сценарию №2 – «Обычная практика ведения лесного хозяйства» – и отличается от него на 0,4 млн. м^3, или 8,3%. Такое расхождение долговременного прогноза и фактических данных следует признать незначительным, тем более что с 2007 г. в сфере лесопользования произошли существенные изменения в связи в вводом в действие нового лесного законодательства. Представляют интерес оценки максимального объема лесопользования для Ленинградской области, которые соответствуют прогнозам по сценариям №1 – «Идеальное управление лесами» – и №3 –

«Максимально возможный устойчивый уровень лесопользования». По первому из них объем лесопользования возможен в объеме 13 млн м^3/год, по второму – 15,2 млн м^3/год, что превосходит существующий уровень более чем в 3 раза. Эти результаты говорят о том, что потенциальный размер пользования древесиной в Ленинградской области очень большой и используется далеко не полностью.

Таблица 3

Прогнозируемый по модели EFISCEN и фактический объем заготовки древесины в Ленинградской области

Projected by the EFISCEN model and the actual volume of harvested wood in Leningrad region

Сценарий	Объем заготовленной древесины, 10^6 м^3	Отклонение от фактического значения ГЛР 2021 – 4,8 10^6 м^3	
		10^6 м^3	%
1	13	8,2	170,8
2	5,2	0,4	8,3
3	15,2	10,4	216,7
4	9	4,2	87,5
5	9	4,2	87,5

Результаты вычисления индексов расхождения прогнозируемых и фактических данных для каждого из использованных сценариев приведены в табл. 4.

Таблица 4

Индексы расхождения прогнозируемых и фактических данных для пяти сценариев

Discrepancy indices of predicted and actual data for five scenarios

№ сценария	1	2	3	4	5
Индекс расхождения	2,35	1,17	2,82	1,86	1,86

Наименьшее расхождение с фактическими данными имеет сценарий №2 – «Обычная практика ведения лесного хозяйства», наибольшее – сценарий №3 – «Максимально возможный устойчивый уровень лесопользования». Остальные сценарии занимают по точности прогнозов промежуточное положение.

Не является неожиданным тот факт, что наиболее точным оказался прогноз по сценарию №2, так как с учетом сроков оборота лесного хозяйства прогноз на 30 лет с 1990 по 2020 гг. не является долгосрочным. Этот результат позволяет предположить, что наиболее надежным методом прогнозирования на такие сроки может быть простая экстраполяция.

Обращает на себя внимание тот факт, что сценарии №4 – «Восстановление лесохозяйственного производства и заготовки древесины конца 1980-х годов» – и №5 – «Восстановление лесохозяйственного производства и заготовки древесины конца 1980-х годов с учетом требований охраны природы» – по всем трем прогнозируемым характеристикам дают одинаковые результаты и имеют одинаковый индекс расхождения. Этот факт может свидетельствовать о том, что дополнительные требования по охране природы не оказали влияния на динамику лесного фонда и лесопользования.

Заключение. В целом результаты прогнозирования характеристик лесного фонда Ленинградской области с помощью модели EFISCEN представляют научный интерес, однако она, безусловно, не может учитывать всех факторов, оказывающих влияние на его динамику, и поэтому получаемые результаты прогнозов имеют приблизительный характер. В частности, они расходятся с фактическими характеристиками лесов 2021 г. Можно ожидать, что прогнозы на 2050 г. могут отклониться от фактических данных еще больше. Как показал проведенный анализ, наиболее надежным методом прогнозирования характеристик лесного фонда и результатов ведения лесного хозяйства в виде объемов лесопользования может быть экстраполяция на будущее обычной практики ведения лесного хозяйства.

Тем не менее результаты имитационного моделирования представляют интерес с точки зрения оценки потенциала лесного хозяйства моделируемого региона в нашем случае Ленинградской области. Без использования метода моделирования такие количественные оценки возможного объема лесопользования, которые дают сценарии №1 – «Идеальное управление лесами» – и №3 – «Максимально возможный устойчивый уровень лесопользования», получить и обосновать затруднительно.

Пять сценариев для моделирования динамики лесного фонда и объема лесопользования, которые были рассмотрены в данной работе, не исчерпывают всех возможных вариантов. Например, интересными сценариями могут быть учитывающие внешние воздействия на леса, такие как лесные пожары, размножение вредителей и болезней. Отдельную группу сценариев могут составить те, которые учтут влияние на леса возможных изменений

климата, например, частоты экстремальных погодных явлений и аномалий. Наиболее интересными сценариями также могут быть описывающие влияние на лесной сектор социально-экономических и законодательных факторов, например, изменений в лесной политике регионального и федерального уровней.

Таким образом, метод имитационного моделирования, в том числе и модель EFISCEN, несмотря на все его недостатки, остается полезным инструментом для научного изучения динамики лесного сектора в изменяющемся мире.

Вклад авторов. Алексеев А.С. – постановка задачи, описание результатов, сравнительный анализ и формулировка выводов и заключений; Шариф Д. – обзор литературных источников, подготовка исходных материалов, анализ результатов.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Алексеев А.С. Влияние на динамику лесного фонда смены пород и характера ведения лесного хозяйства в ряде областей Северо-запада РФ // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2009. Вып. 186. С. 4-15.

Зубкова Е.В., *Жукова Л.А*, *Фролов П.В*, *Шанин В.Н*. Работы А.С. Комарова по клеточно-автоматному моделированию популяционно-онтогенетических процессов у растений // Компьютерные исследования и моделирование. 2016. Т. 8, №2. С. 285−295. DOI: 10.20537/2076-7633-2016-8-2-285-295.

Карев Г.П. Структурные модели естественной динамики лесного покрова // ДАН. 1994. Т. 337, № 2. С. 354-356.

Карев Г.П. Структурные модели лесных экосистем // Сибирский лесной журнал. 1999. №4. С. 381-396.

Леса России и изменение климата. Европейский институт леса, 2020. 140 с.

Медоуз Д.Л., *Медоуз Д.Х*., *Рандерс Й*., *Беренс У.* Пределы роста. М.: Изд-во МГУ, 1991. 208 с.

Медоуз Д.Х., *Медоуз Д.Л*., *Рандерс Й.* Пределы роста. 30 лет спустя М.: Академкнига, 2007. 342 с.

Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах. М.: Наука, 2007. 380 с.

Модель EFISCEN // Официальный сайт Европейского института леса. URl: https://efi.int/knowledge/models/efiscen (дата обращения: 28.04.2025).

Форрестер Дж. Основы кибернетики предприятия (Индустриальная динамика). М.: Прогресс, 1971. 340 с.

Форрестер Дж. Динамика развития города. М.: Прогресс, 1974. 286 с.

Форрестер Дж. Мировая динамика. М.: АСТ, 2003. 384 с.

Чумаченко С.И. Базовая модель динамики многовидового разновозрастного лесного ценоза // Науч. тр. МГУЛ. 1993. Вып. 248. С. 147–180.

Чумаченко С.И., *Паленова М.М.*, *Коротков В.Н.* Прогноз динамики таксационных показателей лесных насаждений при разных сценариях ведения лесного хозяйства // Восточноевропейские леса: история в голоцене и современность. М., 2004. С. 492–507.

Чумаченко С.И., *Починков С.В.*, *Кухаркина Е.В.* Имитационное моделирование динамики насаждений FORRUS-S – инструмент выбора стратегии и планирования лесного хозяйства // Лесной вестник. 2007. №5. С. 143-152.

Chertov O.G., *Komarov A.S.*, *Karev G.P.* Modern Approaches in Forest Ecosystem Modelling // European Forest Institute Research Reports. 1999a. Vol. 8. 116 p. DOI: 10.1163/9789004612570.

Chertov O.G., *Komarov A.S.*, *Tsiplianovsky A.V.* A combined simulation model of Scots pine, Norway spruce and Silver birch ecosystems in European boreal zone // Forest Ecology and Management. 1999b. №116. P. 189-206. DOI: 10.1016/S0378-1127(98)00456-3.

Chumachenko S.I., *Syssouev V.V.*, *Palenova M.M.*, *Bredikhin M.A.*, *Korotkov V.N.* Imitation modeling of heterogeneous uneven-aged stands spatial dynamics taking into account silvicultural treatment // IUFRO Conf. Copenhagen, 1996. P. 484–492.

Chumachenko S.I., *Korotkov V.N.*, *Palenova M.M.*, *Politov D.V.* Simulation modelling of long-term stand dynamics at different scenarios of forest management for conifer – broad-leaved forests // Ecol. Modeling. 2003. Vol. 170. P. 345–361. DOI: 10.1016/S0304-3800(03)00238-2.

Computer applications in Sustainable Forest management. Springer, 2006. 278 p.

De Lara M., *Doyen L.* Sustainable management of natural resources. Mathematical models and methods. Springer, 2008. 266 p. DOI: 10.1007/978-3-540-79074-7.

Komarov A., *Chertov O.*, *Zudin S.*, *Nadporozhskaya M.*, *Mikhailov A.*, *Bykhovets S.*, *Zudina E.*, *Zoubkova E.* EFIMOD 2 – a model of growth and elements cycling in boreal forest ecosystems // Ecological Modelling. 2003. №170 (2-3). P. 373-392. DOI: 10.1016/S0304-3800(03)00240-0.

Leslie P.H. On the use of matrices in certain population mathematics // Biometrika. 1945. Vol. 33, iss. 3. P. 183–212. DOI: 10.1093/biomet/33.3.183.

Liang J., *Picard N.* Matrix Model of Forest Dynamics: An Overview and Outlook // Forest Science. 2013. Vol. 59, iss. 3. P. 359-378. DOI: 10.5849/forsci.11-123.

Logofet D.O. Convexity in projection matrices: Projection to a calibration problem // Ecol. Model. 2008. Vol. 216, iss. 2. P. 217–228. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2008.03.004.

Logofet D.O., *Lesnaya E.V.* The mathematics of Markov models: What Markov chains can really predict in forest successions // Ecol. Model. 2000. Vol. 126, iss. 2–3. P. 285–298. DOI: 10.1016/S0304-3800(00)00269-6.

Nabuurs G.-I., *Lioubimov A.V.* Future development of the Leningrad region forests under nature-oriented forest management // Forest Ecology and Management. 2000. No. 130. P. 235-251. DOI: 10.1016/S0378-1127(99)00179-6.

Pretzsch H. Forest Dynamics, Growth and Yield. From Measurement to Model. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. 655 p. DOI: 10.1007/978-3-540-88307-4.

Pretzsch H., *Biber P.*, *Dursky J.* The single tree based stand simulator SILVA. Construction, application and evaluation // Forest Ecology and Management. 2002. Vol. 162. P. 3–21. DOI: 10.1016/S0378-1127(02)00047-6.

Sallnas O. A matrix growth model of the Swedish forest // Studia For. Suec. 1990. No. 183. 23 p.

Usher M.B. A matrix model for forest management // Biometrics. 1969. №25 (2). P. 309 –315. DOI: 10.2307/2528791.

Usher M.B. Markovian approaches to ecological succession // Journal of Animal Ecology. 1979. №48 (2). P. 413– 426. DOI: 10.2307/4170.

Usher M.B. Modelling ecological succession with particular reference to Markovian models // Vegetatio. 1981. №46-47. P. 11–18. DOI: 10.1007/BF00118380.

References

Alekseev A.S. Influence on the dynamics of the forest fund the change of species and the style of forest management in a number of regions of the North-West of the Russian Federation. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2009, iss. 186, pp. 4-15. (In Russ.)

Chertov O.G., *Komarov A.S.*, *Karev G.P.* Modern Approaches in Forest Ecosystem Modelling. *European Forest Institute Research Reports*, 1999a, vol. 8, 116 p. DOI: 10.1163/9789004612570.

Chertov O.G., *Komarov A.S.*, *Tsiplianovsky A.V.* A combined simulation model of Scots pine, Norway spruce and Silver birch ecosystems in European boreal zone. *Forest Ecology and Management*, 1999b, no. 116, pp. 189-206. DOI: 10.1016/S0378-1127(98)00456-3.

Chumachenko S.I. Basic model of the dynamics of a multi-species forest cenosis of different ages. *Sci. works of MSUL*, 1993, iss. 248, pp. 147-180. (In Russ.)

Chumachenko S.I., *Syssouev V.V.*, *Palenova M.M.*, *Bredikhin M.A.*, *Korotkov V.N.* Imitation modeling of heterogeneous uneven-aged stands spatial dynamics taking into account silvicultural treatment. *IUFRO Conf.* Copenhagen, 1996, pp. 484–492.

Chumachenko S.I., *Korotkov V.N.*, *Palenova M.M.*, *Politov D.V.* Simulation modelling of long-term stand dynamics at different scenarios of forest management for conifer – broad-leaved forests. *Ecol. Modeling*, 2003, vol. 170, pp. 345–361. DOI: 10.1016/S0304-3800(03)00238-2.

Chumachenko S.I., *Palenova M.M.*, *Korotkov V.N.* Forecast of the dynamics of taxation indicators of forest plantations under different scenarios of forestry. *Eastern European forests: history in the Holocene and modernity.* Moscow, 2004, pp. 492-507. (In Russ.)

Chumachenko S.I., *Palenova M.M.*, *Pochinkov S.V.*, *Kukharkina E.V.* Simulation modeling of FORRUS-S plantation dynamics is a tool for choosing forestry strategy and planning. *Lesnoy Vestnik*, 2007, no. 5, pp. 143-152. (In Russ.)

Computer applications in Sustainable Forest management. Springer, 2006. 278 p.

De Lara M., *Doyen L.* Sustainable management of natural resources. Mathematical models and methods. Springer, 2008. 266 p. DOI: 10.1007/978-3-540-79074-7.

EFISCEN model. *The official website of the European Forest Institute*. URL: https://efi.int/knowledge/models/efiscen (accessed April 28, 2025).

Forests of Russia and climate change. European Forest Institute, 2020. 140 p. (In Russ.)

Forrester J. Dynamics of urban development. Moscow: Progress, 1974. 286 p. (In Russ.)

Forrester J. Fundamentals of enterprise Cybernetics (Industrial dynamics). Moscow: Progress, 1971. 340 p. (In Russ.)

Forrester J. World dynamics. Moscow: AST, 2003. 384 p. (In Russ.)

Karev G.P. Structural models of natural dynamics of forest cover. *Reports to Russian Academy of Science*, 1994, vol. 337, no. 2, pp. 354-356. (In Russ.)

Karev G.P. Structural models of forest ecosystems. *Siberian Forest Journal*, 1999, no. 4, pp. 381-396. (In Russ.)

Komarov A., *Chertov O.*, *Zudin S.*, *Nadporozhskaya M.*, *Mikhailov A.*, *Bykhovets S.*, *Zudina E.*, *Zoubkova E.* EFIMOD 2 – a model of growth and elements cycling in boreal forest ecosystems. *Ecological Modelling*, 2003, №170 (2-3), pp. 373-392. DOI: 10.1016/S0304-3800(03)00240-0.

Leslie P.H. On the use of matrices in certain population mathematics. *Biometrika*, 1945, vol. 33, iss. 3, pp. 183–212. DOI: 10.1093/biomet/33.3.183.

Liang J., *Picard N.* Matrix Model of Forest Dynamics: An Overview and Outlook. *Forest Science*, 2013, vol. 59, iss. 3, pp. 359-378. DOI: 10.5849/forsci.11-123.

Logofet D.O. Convexity in projection matrices: Projection to a calibration problem. *Ecol. Model.*, 2008, vol. 216, iss. 2, pp. 217–228. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2008.03.004.

Logofet D.O., *Lesnaya E.V.* The mathematics of Markov models: What Markov chains can really predict in forest successions. *Ecol. Model.*, 2000, vol. 126, iss. 2–3, pp. 285–298. DOI: 10.1016/S0304-3800(00)00269-6.

Meadows D.L., *Meadows D.H.*, *Randers J.*, *Berens W.* The Limits of growth. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1991. 208 p. (In Russ.)

Meadows D.H., *Meadows D.L.*, *Randers J.* Limits of growth. 30 years later. Moscow: Akademkniga, 2007. 342 p. (In Russ.)

Modeling the dynamics of organic matter in forest ecosystems. Moscow: Nauka, 2007. 380 p. (In Russ.)

Nabuurs G.-I., *Lioubimov A.V.* Future development of the Leningrad region forests under nature-oriented forest management. *Forest Ecology and Management*, 2000, no. 130, pp. 235-251. DOI: 10.1016/S0378-1127(99)00179-6.

Pretzsch H. Forest Dynamics, Growth and Yield. From Measurement to Model. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. 655 p. DOI: 10.1007/978-3-540-88307-4.

Pretzsch H., *Biber P.*, *Dursky J.* The single tree based stand simulator SILVA. Construction, application and evaluation. *Forest Ecology and Management*, 2002, vol. 162, pp. 3–21. DOI: 10.1016/S0378-1127(02)00047-6.

Sallnas O. A matrix growth model of the Swedish forest. *Studia For. Suec*., 1990, no. 183, 23 p.

Usher M.B. A matrix model for forest management. *Biometrics*, 1969, no. 25 (2), pp. 309 –315. DOI: 10.2307/2528791.

Usher M.B. Markovian approaches to ecological succession. *Journal of Animal Ecology*, 1979, no. 48 (2), pp. 413– 426. DOI: 10.2307/4170.

Usher M.B. Modelling ecological succession with particular reference to Markovian models. *Vegetatio*, 1981, no. 46-47, pp. 11–18. DOI: 10.1007/BF00118380.

Zubkova E.V., *Zhukova L.A*., *Frolov P.V*., *Shanin V.N.* A. S. Komarov's work on cellular automaton modeling of population-ontogenetic processes in plants. *Computer research and modeling*, 2016, vol. 8, no. 2, pp. 285-295. DOI: 10.20537/2076-7633-2016-8-2-285-295. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 28.01.2026

Алексеев А.С., Шариф Д. Анализ и оценка результатов прогноза динамики лесного фонда Ленинградской области по модели EFISCEN // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2026. Вып. 259. С. 159–174. DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.159-174

В статье проведен анализ и получены количественные оценки результатов прогнозирования динамики лесного фонда Ленинградской области по модели EFISCEN. Приведен краткий обзор основных имитационных и других математических моделей, применяемых для прогнозирования динамики лесного фонда. Для моделирования на период с 1990 по 2020 гг. с помощью модели EFISCEN были использованы следующие пять сценариев: идеальное управление лесами, обычная практика ведения лесного хозяйства, сценарий, направленный на достижение максимально возможного устойчивого уровня лесопользования, сценарий, предполагающий восстановление лесохозяйственного производства и заготовки древесины конца 1980-х гг. в течение первых 20 лет, и сценарий восстановления, но с учетом дополнительных требований охраны природы. Результаты прогнозирования по модели сравнивались по следующим трем показателям: средний запас древостоев, средний прирост древостоев, объем заготовки древесины. Сравнение проводилось с фактическими значениями указанных показателей по данным Государственного лесного реестра о состоянии лесов Ленинградской области в 2021 г. в абсолютных и относительных величинах. Для сравнения качества прогнозирования по 5 сценариям и определения наиболее точного из них для каждого из сценариев рассчитывался индекс расхождения прогнозных результатов моделирования и фактических данных. Наиболее точным оказался прогноз по сценарию №2 – «Обычная практика ведения лесного хозяйства». Этот результат позволяет предположить, что наиболее надежным методом прогнозирования на срок 30 лет

может быть простая экстраполяция. Прогнозы, которые дают сценарии №1 – «Идеальное управление лесами» – и №3 – «Максимально возможный устойчивый уровень лесопользования», позволяют оценить потенциал лесного хозяйства Ленинградской области. Метод имитационного моделирования, в том числе и модель EFISCEN, несмотря на все его недостатки, остается полезным инструментом для научного изучения динамики лесного сектора в условиях изменяющейся окружающей среды.

Ключевые слова: лесной фонд, запас древостоев, прирост древостоев, лесопользование, имитационное моделирование, модель EFISCEN, сценарий, прогноз.

Alekseev A.S., Shareef D. Analysis and evaluation of the results of forecasting the dynamics of the Leningrad region forest fund using the EFISCEN model. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2026, iss. 259, pp. 159–174 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.159-174

The article analyzes and quantifies the results of forecasting the dynamics of the Leningrad Region forest fund using the EFISCEN model. A brief overview of the main simulation and other mathematical models used to predict the dynamics of the forest fund is given. The following five scenarios were used for modeling for the period from 1990 to 2020 using the EFISCEN model: ideal forest management, common forest management practices, a scenario aimed at achieving the highest possible sustainable level of forest management, a scenario involving the restoration of forestry production and timber harvesting in the late 1980s during the first 20 years and restoration scenario, but taking into account additional requirements of nature protection. The model's forecasting results were compared according to the following three indicators: the average growing stock of tree stands, the average wood stock increment of stands, and the volume of timber harvesting. The comparison was carried out with the actual values of these indicators according to the data of the State Forest Register on the state of forests of the Leningrad Region in 2021 in absolute and relative terms. To compare the quality of forecasting for 5 scenarios and determine the most accurate one, an index of discrepancy between the predicted modeling results and actual data was calculated for each scenario. The forecast turned out to be the most accurate according to scenario No. 2 – “Common forestry practice”. This result suggests that the most reliable forecasting method for a period of 30 years may be a simple extrapolation. The forecasts given by scenarios No. 1 – “Ideal forest management” and No. 3 – “The maximum possible sustainable level of forest management” – allow us to assess the potential of forestry in the Leningrad region. The simulation method, including the EFISCEN model, despite all its disadvantages, remains a useful tool for the scientific study of the dynamics of the forest sector in a changing environment.

Keywords: forest fund, wood stock of stands, increment of wood stock, forest management, simulation modeling, EFISCEN model, scenario, forecast.

АЛЕКСЕЕВ Александр Сергеевич – заведующий кафедрой лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, профессор, доктор географических наук. SPIN-код: 8115-9103. ORCID: 0000-0001-8795-2888.

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

ALEKSEEV Aleksandr S. – DSc (Geographical), Professor, Head of the Department of Forest Inventory, Management and GIS, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 8115-9103. ORCID: 0000-0001- 8795-2888.

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

ШАРИФ Дима – аспирант кафедры лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 4392-6631. ORCID: 0009-0003-3243-3425.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: dimashareef147@gmail.com

SHAREEF Deema – PhD student, Department of Forest Inventory, Management and GIS, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 4392-6631. ORCID: 0009-0003-3243-3425.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: dimashareef147@gmail.com

УДК 630.3 : 630.4

Н.А. Цуварёва, Е.И. Иришина, М.Б. Фоминых, И.Р. Кашафеев, С.В. Бикетова

ВЛИЯНИЕ ЦЕНОТИЧЕСКОГО ОКРУЖЕНИЯ НА СОСТОЯНИЕ ДЕРЕВА В ПАРКОВЫХ СООБЩЕСТВАХ

Введение. Любая растительность в крупных городах испытывает как прямое, так и опосредованное антропогенное воздействие [Неверова, Колмогорова, 2003; Грязькин и др., 2011; Зелёное…, 2013; Петрик и др., 2015; Беляева, Саксонов, 2018; Бойко и др., 2019; Costanza et al., 1997; Chang et al., 2017]. Интенсивность антропогенного воздействия зависит как от численности рекреантов, так и от общей площади парка, сквера, дворовой территории [Грязькин и др., 2003, 2010; Беляева и др., 2013; Зелёное…, 2013; Зубова, 2017; Clark et al., 1997; Costanza et al., 1997].

Парки и сады крупных городов требуют постоянного контроля за состоянием деревьев. В современных условиях такой контроль осуществляется различными способами [Жакова и др., 2020; Мельничук, Цуварёва, 2020; Costanza et al., 1997; Fink, 2009; Alonzo et al., 2014]. Самый доступный и распространенный метод – визуальная диагностика жизненного состояния деревьев [Грязькин и др., 2003; Аносов, 2015; Жакова и др., 2020; Fink, 2009; Blanusa et al., 2019]. Указанный способ позволяет оценить состояние дерева и определить внешние повреждения. При этом определяются поражающие факторы и намечаются необходимые профилактические работы и мероприятия.

Известно также, что визуальная оценка жизнеспособности отдельного дерева не всегда позволяет оценивать его реальное состояние [Грязькин и др., 2003; Аносов, 2015; Цуварёва и др., 2019, 2021; Жакова и др., 2020; Fink, 2009; Blanusa et al., 2019]. Например, S. Fink [2009] считает, что метод визуальной оценки отличается высокой трудоемкостью, требует больших денежных затрат и обладает определенной степенью субъективности.

Скрытые пороки и заболевания нередко находятся внутри ствола и недоступны для выявления визуальным методом. При этом известно, что внутренние пороки, в первую очередь стволовые гнили, влияют на прочность ствола и в целом на устойчивость дерева, его жизнеспособность.

Скрытые повреждения создают определённую опасность для людей и окружающих сооружений. В связи с этим проблема ранней диагностики санитарного состояния древесных растений в парках и садах городов является

высоко актуальной [Майдебура, 2006; Цуварёва и др., 2021; Costanza et al., 1997; Alonzo et al., 2014]. Один из основных путей ее решения – использование современных технологий, приборов и инструментов [Грязькин, Грязькин, 1999; Грязькин и др., 2010, 2012, 2014; Севостьянов, Грязькин, 2016; Цуварёва и др., 2019; Жакова и др., 2020; Мельничук, Цуварёва, 2020; Цуварёва и др., 2021; Costanza et al., 1997; Ardila et al., 2012; Alonzo et al., 2014; Blanusa et al., 2019].

Инструментальная диагностика позволяет определить наличие и оценить степень распространения стволовой гнили. Это необходимо для своевременного реагирования и принятия мер по лечению или удалению дерева. Многие авторы указывают на то, что без инструментальной диагностики точно оценить состояние дерева и его функционирование не всегда возможно [Майдебура, 2006; Аносов, 2015; Севостьянов, Грязькин, 2016; Цуварёва и др., 2019, 2021; Мельничук, Цуварёва, 2020; Granier, 1987; Costanza et al., 1997; Burgess et al., 2001; Cheng-Jung et al., 2008; Cumming et al., 2008].

В современных условиях для инструментальной диагностики состояния дерева используются различные технологии и устройства [Тюкавина, 2014, 2015; Цуварёва и др., 2019; Costanza et al., 1997; Burgess et al., 2001; Čermak et al., 2004]. Компанией Rinntech был создан специальный прибор для проведения диагностики – *resistograph* (автор разработки Frank Rinn, Германия). Этот прибор используется для выявления гнили в стволе деревьев. При оценке аварийности деревьев в парках и садах *resistograph* является незаменимым. Стволовая гниль, в первую очередь ядровая, не всегда идентифицируется при визуальном осмотре дерева [Цуварёва и др., 2019; Costanza et al., 1997; Burgess et al., 2001; Čermak et al., 2004]. При наличии гнили дерево может выглядеть абсолютно здоровым, однако при этом прочность стволовой древесины ослаблена и быстро снижается.

Другой современный прибор для оценки внутреннего состояния дерева – арботом (*arbotom*). С помощью этого прибора осуществляется импульсная томография ствола дерева. Принцип действия устройства – измерение скорости прохождения звука в древесине между датчиков, закрепленных вокруг ствола дерева [Мельничук и др., 2012; Тюкавина, 2014, 2015; Латухина и др., 2016; Мельничук, Цуварёва, 2020; Köstner et al., 1998; Cheng-Jung et al., 2008].

Наличие внутренней гнили в стволе дерева можно установить и отбором керна с помощью бурава Пресслера (специализированный дендрохронологический инструмент). По керну осуществляется визуальная и инструментальная оценка качества древесины, выявляется наличие стволовой гнили, и определяется плотность древесины [Аносов, 2015].

Растительность парков и садов, зелёных насаждений любого уровня обеспечивает высокое качество городской среды: она регулирует водный баланс и поглощает шум, пыль, вредные для человека выбросы [Петрик и

др., 2015; Шихова, 2015; Costanza et al., 1997; Andersson et al., 2014; Chang et al., 2017; Andersson-Sköld et al., 2018]. Главная функция зелёных зон – рекреационные экосистемные услуги. Из этого можно сделать вывод, что городская зеленая инфраструктура обеспечивает весь комплекс экосистемных сервисов для жителей города [Шихова, 2015; Costanza et al., 1997; Andersson et al., 2014; Chang et al., 2017; Andersson-Sköld et al., 2018; Blanusa et al., 2019].

D.J. Nowak et al. [2016] считают, что максимальная реализация экосистемных сервисов возможна при рациональном управлении городской зеленой инфраструктурой, в том числе состоянием древесной растительности. По мнению авторов, постоянный контроль за состоянием деревьев способствует улучшению экологической обстановки на городских территориях.

Необходимость контроля за состоянием городских лесов и других объектов зелёной инфраструктуры служит основанием для выделения государством значительных средств для содержания зеленых насаждений и сохранения выполняемых ими важнейших экологических функций [Cumming et al., 2008; Andersson et al., 2014; McPherson et al., 2016; Andersson-Sköld et al., 2018; Sushko et al., 2021]. В то же время городские зеленые насаждения отличаются высокой пространственной неоднородностью и динамичностью, что обусловлено многочисленными естественными и антропогенными воздействиями. Постоянный мониторинг городских зеленых насаждений позволяет оценить динамику их основных характеристик, понять причины ухудшения каких-либо параметров и принять меры по их улучшению, а также предотвратить возможные негативные последствия [Cumming et al., 2008; Sushko et al., 2021].

По мнению L.A. Roman et al. [2018], функционирование современных мегаполисов сопряжено с непрерывной аккумуляцией энергии и вещества. Высокая концентрация энергии и веществ в городах сочетается с необратимыми преобразованиями ландшафтов, что снижает качество городской среды [Севостьянов, Грязькин, 2016; Clark et al. 1997; Andersson et al., 2014; Blanusa et al., 2019]. При этом города остаются основным центром концентрации населения, благодаря более высокому уровню жизни. По данным из разных источников, к 2030 г. более 2/3 населения планеты будет проживать в городах [Angel et al., 2011]. Из этого следует, что роль городских экосистем в обеспечении высокого качества жизни будет возрастать.

Материалы и методика исследования. Для исследования было выбрано пять деревьев – один дуб (*Quercus robur* L.) и четыре липы (*Tilia cordata* Mill.) в дендрарии Ботанического сада Санкт-Петербургского лесотехнического университета. Эти древесные породы представлены практически во

всех парках Санкт-Петербурга. Отобранные модельные экземпляры имеют сопоставимые характеристики по возрасту и высоте.

У всех учётных деревьев измеряли высоту, диаметр ствола, определяли возраст дерева. При визуальной оценке состояния дерева использовали шкалу, рекомендованную Правилами санитарной безопасности в лесах от 09.12.2020 (Прил. №1). В радиусе 6 м вокруг каждого модельного дерева установлен видовой состав и основные характеристики деревьев, подроста, подлеска и живого напочвенного покрова [Грязькин, Бикетова, 2025].

Результаты исследования. Визуальная оценка санитарного состояния дерева – это традиционный способ оценки. В Санкт-Петербурге визуальная оценка деревьев активно используется при составлении дендрологических планов и перечётных ведомостей в соответствии с требованиями Постановления Правительства Санкт-Петербурга от 17.01.2014 №ПП-770 «О правилах охраны и использования территорий зеленых насаждений общего пользования, территорий зеленых насаждений, выполняющие специальные функции, территорий ограниченного пользования».

Как было указано выше, для выполнения полевых исследований было отобрано 5 модельных деревьев. Все деревья одноствольные и не имеют видимых критических повреждений и заболеваний. В табл. 1 представлены общие сведения по всем деревьям.

Таблица 1

Общие сведения по модельным деревьям

General information about model trees

Номер модели	Название древесной породы	Номер участка – инв. номер дерева	Возраст, лет	Диаметр ствола, см	Высота дерева, м
1	*Quercus robur* L.	28-16	145	75	23,0
2	*Tilia cordata* Mill.	28-34	145	97	24,0
3	*Tilia cordata* Mill.	25-18	115	73	24,0
4	*Tilia cordata* Mill.	30-91	60	41	22,0
5	*Tilia cordata* Mill.	36-1	60	44	24,5

Выбранные модельные деревья произрастают в различных ценотических условиях. На разном удалении от моделей произрастают деревья, подрост и подлесок. Ценотическое положение каждого модельного дерева представлено на рис. 1–5.

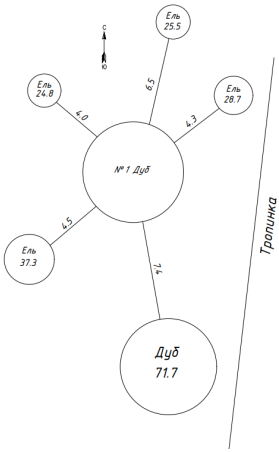


Рис. 1. Ценотическое положение модельного дерева №1

Fig. 1. Cenotic position of model tree №1

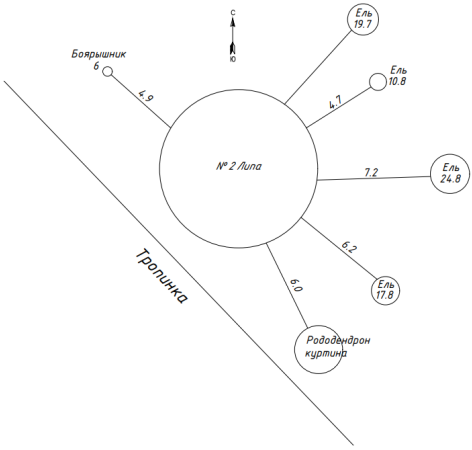


Рис. 2. Ценотическое положение модельного дерева №2

Fig. 2. Cenotic position of model tree №2

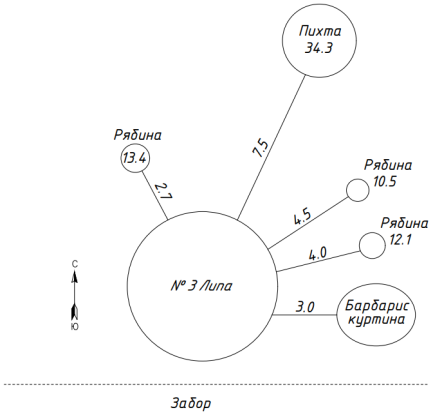


Рис. 3. Ценотическое положение модельного дерева №3

Fig. 3. Cenotic position of model tree №3

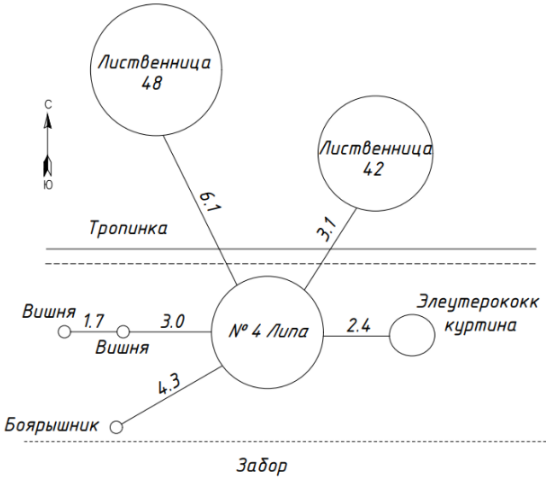


Рис. 4. Ценотическое положение модельного дерева №4
Fig. 4. Cenotic position of model tree №4

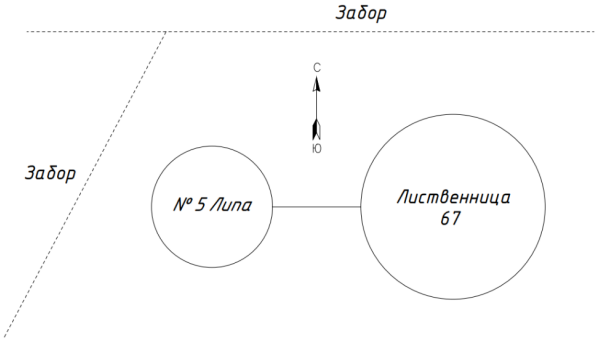


Рис. 5. Ценотическое положение модельного дерева №5
Fig. 5. Cenotic position of model tree №5

Визуальная оценка состояния выбранных модельных деревьев показала, что модельное дерево №5 соответствует первой категории санитарного состояния деревьев (здоровые без признаков ослабления). Категории санитарного состояния установлены в соответствии с Правилами санитарной безопасности в лесах (действуют с 1 января 2021 г.). Модельные деревья №1-3 отнесены ко второй категории (ослабленные). Модельное дерево №4 отнесено к третьей категории санитарного состояния (сильно ослабленное).

На состояние любого дерева в фитоценозе определённое влияние оказывают соседние растения. Степень влияния деревьев, произрастающих в радиусе 7 м от модельных деревьев, оценивали по величине коэффициента влияния (Кв) (табл. 2). Величина указанного коэффициента определялась для каждого дерева делением диаметра ствола на расстояние до модели. Чем больше эта величина, тем сильнее влияние соседнего дерева на модель.

Таблица 2

Влияние деревьев, произрастающих в радиусе 7 м на модель

The effect of trees growing within a radius of 7 m on the model

Название вида	Расстояние до модели, м	Диаметр ствола, см	Коэффициент влияния
Модель №1			
Дуб черешчатый – *Quercus robur* L.	7,1	72	10,1
Ель европейская – *Picea abies* (L.) H. Karst.	4,5	37	8,2
Ель европейская – *Picea abies* (L.) H. Karst.	4,0	25	6,2
Ель европейская – *Picea abies* (L.) H. Karst.	6,5	26	4,0
Ель европейская – *Picea abies* (L.) H. Karst.	4,3	29	6,7
Итого	–	–	35,0
Модель №2			
Ель европейская – *Picea abies* (L.) H. Karst.	6,6	20	3,0
Ель европейская – *Picea abies* (L.) H. Karst.	4,7	11	2,3
Ель европейская – *Picea abies* (L.) H. Karst.	7,0	25	3,6
Ель европейская – *Picea abies* (L.) H. Karst.	6,2	18	2,9
Боярышник кроваво-красный – *Crataegus sanguinea* Pall.	4,9	6	1,2
Итого	–	–	13,0
Модель №3			
Пихта сибирская – *Abies sibirica* Ledeb.	7,2	34	4,7
Рябина глоговина – *Sorbus torminalis* (L.) Crantz	2,7	13	4,8
Рябина глоговина – *Sorbus torminalis* (L.) Crantz	4,5	11	2,4
Рябина глоговина – *Sorbus torminalis* (L.) Crantz	4,0	12	3,0
Итого	–	–	14,9

Окончание табл. 2

Название вида	Расстояние до модели, м	Диаметр ствола, см	Коэффициент влияния
Модель №4			
Лиственница сибирская – *Larix sibirica* Ledeb.	6,1	54	8,9
Лиственница сибирская – *Larix sibirica* Ledeb.	6,9	36	5,2
Лиственница сибирская – *Larix sibirica* Ledeb.	7,0	38	5,4
Лиственница сибирская – *Larix sibirica* Ledeb.	6,8	32	4,7
Лиственница сибирская – *Larix sibirica* Ledeb.	7,0	40	5,7
Липа мелколистная – *Tilia cordata* Mill.	3,1	46	14,8
Итого	–	–	45,7
Модель №5			
Лиственница сибирская – *Larix sibirica* Ledeb.	–	–	21,6

Как видно из данных, представленных в табл. 2, самое сильное воздействие оказывают деревья, окружающие модель №4. Минимальное воздействие от соседних деревьев получают модели №2 и №3. В особых условиях произрастает модель №5. В радиусе 7 м находится всего одно дерево, следовательно оно воздействует на модель №5 минимально – только с одной стороны.

Определённую роль в функционировании растительной экосистемы играет и растительность нижних ярусов – подрост, подлесок и живой напочвенный покров. В составе подроста в радиусе 7 м встречается несколько видов древесных пород. Основные характеристики подроста в окружении модельных деревьев представлены в табл. 3.

Таблица 3

Подрост, приуроченный к модельным деревьям в радиусе 7 м

Young trees adjacent to model trees within a 7 m radius

Характеристика	Номер модельного дерева				
	1	2	3	4	5
Состав, %	58Дуб 34КлёнЯ 8КлёнО	100Липа	75Липа 25КлёнО	60КлёнО 20Липа 20Вяз	100Липа
Численность, экз./га	1240	84	168	840	84
Средняя высота, см	42	42	66	68	77

Примечание. КлёнЯ – клён явор (*Acer pseudoplatanus* L.), КлёнО – клён остролистный (*Acer platanoides* L.)

Подлесок в окружении модельных деревьев произрастает, как правило, куртинами. Основные характеристики подлеска в окружении модельных деревьев представлены в табл. 4.

Таблица 4

Подлесок, приуроченный к модельным деревьям в радиусе 7 м

Undergrowth adjacent to model trees within a 7 m radius

Характеристика	Номер модельного дерева				
	1	2	3	4	5
Состав, %	50Чуб 50Бер	100Бар	60Спир 20Свид 20Бар	100Крыж	100Спир
Численность, экз./га	84	куртина	куртины	куртина	куртина
Средняя высота, см	53	61	162	71	84

Примечание. Чуб – чубушник венечный, Бер – бересклет бородавчатый, Бар – барбарис обыкновенный, Спир – спирея дубравколистная, Свид – свидина белая, Крыж – крыжовник

Конкуренция за элементы питания проявляется между всеми компонентами фитоценоза, включая живой напочвенный покров. В табл. 5 перечислены виды сосудистых растений, произрастающих в окружении модельных деревьев, и указана величина проективного покрытия.

Таблица 5

Видовой состав живого напочвенного покрова и проективное покрытие под кронами модельных деревьев

Species composition of the living ground cover and projective cover under the crowns of model trees

Название вида	Номер модельного дерева				
	1	2	3	4	5
Астильба ручейная – *Astilbe rivularis* Buch.-Ham. ex D. Don	–	2	–	–	–
Будра плющевидная – *Glechoma hederacea* L.	1	2	–	–	–
Ветреница дубравная – *Anemonoides nemorosa* L. (Holub)	–	–	–	–	20
Вороний глаз – *Paris quadrifolia* L.	–	–	–	3	–

Окончание табл. 5

Название вида	Номер модельного дерева				
	1	2	3	4	5
Герань лесная – *Geranium sylvaticum* L.	2	–	–	–	–
Гравилат городской – *Geum urbanum* L.	2	1	–	–	–
Крапива глухая – *Lamium album* L.	1	1	–	–	–
Крапива двудомная – *Urtica dioica* L.	2	1	–	–	–
Купена многоцветковая – *Polygonatum multiflorum* (L.) All.	1	–	–	–	–
Ландыш – *Convallaria majalis* L.	4	–	–	–	–
Лук гусиный – *Gagea lutea* (L.) Ker Gawl.	2	3	–	–	–
Лютик едкий – *Ranunculus acris* L.	1	1	–	–	–
Одуванчик – *Taraxacum* F. H. Wigg.	–	1	–	1	–
Печеночница – *Hepatica* Mill.	1	–	–	–	–
Пырей ползучий – *Elytrigia repens* (L.) Desv. ex Nevski	–	4	10	–	–
Сныть – *Aegopodium podagraria* L.	50	2	60	60	70
Сочевичник весенний – *Lathyrus vernus* (L.) Bernh.	1	–	–	–	–
Хвощ лесной – *Equisetum sylvaticum* L.	–	1	4	10	3
Хохлатка клубневая – *Corydalis bulbosa* (L.) DC.	1	2	–	–	–
Чистяк весенний – *Ranunculus ficaria* L.	1	–	–	1	–
Чистотел большой – *Chelidonium majus* L	30	3	–	–	–
Итого живой напочвенный покров	95	23	74	75	93
Итого видов	15	13	3	5	3
Минерализованная часть	10	70	20	30	–

Примечания: проективное покрытие по видам указано в %.. Минерализованная часть – доля поверхности почвы без растительности

Большое разнообразие видов в составе живого напочвенного покрова связано с режимом освещённости. Дуб по сравнению с липой более светолюбивая порода. Крона дуба ажурная и пропускает больше света к нижним ярусам растительности.

Заключение. Совокупность видов, численность растений и их размеры оказывают комплексное влияние на выбранные для исследования модельные деревья. Физиологическое состояние модельных деревьев и категории,

установленные визуальным методом, коррелируют с интенсивностью воздействия окружающих деревьев. Фиксация ценотического окружения модельных деревьев позволяет получать более обоснованную оценку жизненного состояния дерева.

Вклад авторов. Вклад авторов в подготовку представленной рукописи равноценный.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Аносов Е.А. Аварийные деревья зеленых насаждений городов. Методы визуальной и инструментальной диагностики аварийности, оценка состояния насаждений // Ученые заметки ТОГУ. 2015. Т. 6, №4. С. 637-648.

Беляева Ю.В., *Саксонов С.С.* Влияние автотранспорта на древесные растения города (на примере г. Тольятти, Самарская область) // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2018. Т. 28, №1. С. 97-99.

Беляева Н.В., *Грязькин А.В.*, *Воскресенская М.П.*, *Ковалев Н.В.*, *Малыхина Е.О.*, *Соколова В.А.* Лесорастительные особенности Санкт-Петербурга // Зеленое пространство крупных городов: наука и инновации. СПб., 2013. С. 4-14.

Бойко Т.А., *Мальцева А.П.*, *Збруева И.И.* Состояние зеленых насаждений общего пользования в условиях Перми // Экология урбанизированных территорий. 2019. №2. С. 85-92.

Грязькин М.А., *Грязькин А.В.* Эффективность внедрения новых технологий при проведении научных исследований // Полевые эксперименты – для устойчивого землепользования. СПб., 1999. С. 164-166.

Грязькин А.В., *Бикетова С.В.* Патент № 2852509. Способ комплексного учёта растительности экосистем. Дата регистрации 2025-12-09.

Грязькин А.В., *Мельничук И.А.*, *Трубачева Т.А.* О состоянии зеленых насаждений на улицах г. Санкт-Петербурга // Проблемы экологии и охраны природы. Пути их решения: мат. Всерос. науч.-практ. конф. Ульяновск, 2003. С. 39-42.

Грязькин А.В., *Цимбал Г.С.*, *Трубачева Т.А.*, *Пименов К.А.* Оценка устойчивости древесных растений к антропогенному воздействию по биометрическим характеристикам листьев // Проблемы озеленения крупных городов: мат. общегородской конф. М., 2010. С. 187-189.

Грязькин А.В., *Петрик В.В.*, *Смертин В.Н.* Динамика состояния древостоев в парковых биогеоценозах // ИВУЗ. Лесной журнал. 2011. №6. С. 23-31.

Грязькин А.В., *Герасюта С.М.*, *Бернацкий Д.П.*, *Трубачева Т.А.*, *Ковалев Н.В.* Изменчивость величины импеданса древесных пород // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2012. Вып. 198. С. 12-19.

Грязькин А.В., *Беляева Н.В.*, *Ковалев Н.В.*, *Базаев А.Б.*, *Хетагуров Х.М.* Зарубежный опыт в области лесных отношений и оценки значения зеленых насаждений

// Экологические проблемы Арктики и северных территорий. 2014. Вып. 17. С. 9-15.

Жакова С.Н., *Пименова Е.В.*, *Лихачев С.В.* Экологические методы диагностики жизнеспособности древесных растений: практикум. Пермь: Прокростъ, 2020. 54 с.

Зеленое пространство крупных городов: наука и инновации. СПб.: СПбГЛТУ, 2013. 124 с.

Зубова С.С. Состояние и структура уличных насаждений центральной части г. Екатеринбург // Научный журнал КубГАУ. 2017. №134 (10). С. 753-759.

Латухина И.К., *Бабич Н.А.*, *Антонов А.М.*, *Пастухова Н.О.* Импульсно-томографная диагностика стволов в городских условиях на примере липы мелколистной // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2016. №7. С. 36-40.

Майдебура И.С. Влияние загрязнения воздушного бассейна города Калининграда на анатомо-морфологические и биохимические показатели древесных растений: дис. … канд. биол. наук. Калининград, 2006. 146 с.

Мельничук И.А., *Йассин М.Й.С.*, *Черданцева О.А.* Диагностика внутреннего состояния деревьев *Tilia cordata* Mill. с использованием комплекса аппаратуры акустической ультразвуковой томографии «Арботом» // Вестник РУДН. Сер.: Агрономия и животноводство. 2012. №5. С. 25-32.

Мельничук И.А., *Цуварёва Н.А.* Перспективы применения цифровых технологий для мониторинга зеленых насаждений в Санкт-Петербурге // Цифровые технологии в лесном секторе: мат. Всерос. науч.-техн. конф. СПб., 2020. С. 102-104.

Неверова О.А., *Колмогорова Е.Ю.* Древесные растения и урбанизированная среда (экологические и биотехнологические аспекты). Новосибирск: Наука, 2003. 222 с.

Петрик В.В., *Грязькин А.В.*, *Смертин В.Н.* Динамика структуры и состояния парковых фитоценозов в условиях интенсивной рекреации. Архангельск: ИД САФУ, 2015. 96 с.

Севостьянов В.А., *Грязькин А.В.* Оценка аэроионной способности древесных растений для создания локальных фитологических ингаляториев // Успехи современного естествознания. 2016. №9. С. 82-86.

Тюкавина О.Н. Скорость прохождения звукового импульса в древесине сосны // Arctic Environmental Research. 2014. №3. С. 32-38.

Тюкавина О.Н. О методах интерпретации результатов акустической томографии древесины сосны // ИВУЗ. Лесной журнал. 2015. №2. С. 78-83.

Цуварёва Н.А., *Сушко С.В.*, *Мельничук И.А.*, *Ярославцев А.М.* Применение современных технологических средств для оценки и мониторинга состояния зеленых насаждений города (на примере устройства TreeTalker) // Чтения памяти Т.Б. Дубяго: сб. тр. межд. конф. СПб., 2019. С. 116-119.

Цуварёва Н.А., *Дык Буй Динь*, *Мельничук И.А.*, *Селиховкин А.В.* Мониторинг состояния насаждений Санкт-Петербурга: современные и традиционные подходы

// Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2021. Вып. 235. С. 6-22. DOI:10.21266/2070-4304.2021.235.6-22.

Шихова Н.С. Комплексная оценка состояния лесов зеленой зоны Владивостока // Лесоведение. 2015. №6. С. 436-446.

Alonzo M., *Bookhagen B*., *Roberts D.A.* Urban tree species mapping using hyperspectral and lidar data fusion // Remote Sens. Environ. 2014. Vol. 148. P. 70–83. DOI: 10.1016/j.rse.2014.03.018.

Andersson E., *Barthel S*., *Borgström S*., *Colding J*., *Elmqvist T*., *Folke C*., *Gren Å.* Reconnecting Cities to the Biosphere: Stewardship of Green Infrastructure and Urban Ecosystem Services // AMBIO. 2014. Vol. 43. P. 445–453. DOI: 10.1007/s13280-014-0506-y.

Andersson-Sköld Y., *Klingberg J*., *Gunnarsson B*., *Cullinan K*., *Gustafsson I*., *Hedblom M*., *Knez I*., *Lindberg F*., *Sang Å.O*., *Pleijel H*., *Thorsson P*., *Thorsson S.* A framework for assessing urban greenery's effects and valuing its ecosystem services // J. Environ. Manag. 2018. Vol. 205. P. 274–285. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.09.071.

Angel S., *Parent J*., *Civco D.L*., *Blei A*., *Potere D.* The dimensions of global urban expansion: estimates and projections for all countries, 2000–2050 // Prog. Plann. 2011. Vol. 75, iss. 2. P. 53-107. DOI: 10.1016/j.progress.2011.04.001.

Ardila J.P., *Bijker W*., *Tolpekin V.A*., *Stein A.* Context- sensitive extraction of tree crown objects in urban areas using VHR satellite images // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2012. Vol. 15. P. 57–69. DOI: 10.1016/j.jag.2011.06.005.

Blanusa T., *Garratt M*., *Cathcart-James M*., *Hunt L*., *Cameron R.W.F.* Urban hedges: A review of plant species and cultivars for ecosystem service delivery in northwest Europe // Urban For. Urban Green. 2019. Vol. 44. Art. no. 126391. DOI: 10.1016/j.ufug.2019.126391.

Burgess S.S., *Adams M.A*., *Turner N.C*., *Beverly C.R*., *Ong C.K*., *Khan A.A*., *Bleby T.M.* An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap ow in woody plants // Tree Physiol. 2001. Vol. 21. P. 589–598. DOI: 10.1093/treephys/21.9.589.

Čermak J., *Kucera J*., *Nadezhdina N.* Sap ow measurements with some thermodynamic me- thods, ow integration with trees and scaling up from sample trees to entire forest stands // Trees. 2004. Vol. 18. P. 529–546. DOI: 10.1007/s00468-004-0339-6.

Chang J., *Qu Z*., *Xu R*., *Pan K*., *Xu B*., *Min Y*., *Ge Y.* Assessing the ecosystem services provided by urban green spaces along urban center-edge gradients // Scientific Reports. 2017. Vol. 7, iss. 1. Art. no. 11226. DOI: 10.1038/s41598-017-11559-5.

Cheng-Jung Lin, *Yu-Chien Kao*, *Ta-Te Lin*, *Ming-Jer Tsai*, *Song-Yung Wang*, *Lang-Dong Lin*, *Ya-Nan Wang*, *Ming-Hsun Chan*. Application of an ultrasonic tomographic technique for detecting defects in standing trees // International Biodeterioration & Biodegradation. 2008. Vol. 62. P. 434-441. DOI: 10.1016/j.ibiod.2007.09.007.

Clark J.R., *Matheny N.P*., *Cross G*., *Wade V.* A model of urban forest sustainability // Journal of Arboriculture. 1997. Vol. 23, iss. 1. P. 17–30. DOI: 10.48044/jauf.1997.003.

Costanza R., *d'Arge R*., *de Groot R*., *Farber S*., *Grasso M*., *Hannon B*., *Limburg K*., *Naeem S*., *O'Neill R.V*., *Paruelo J*., *Raskin R.G*., *Sutton P*., *van den Belt M.* The value

of the world's ecosystem services and natural capital // Nature. 1997. Vol. 387, iss. 15. P. 253-260. DOI: 10.1038/387253a0.

Cumming A.B., *Twardus D.B*., *Nowak D.J.* Urban forest health monitoring: Large-scale assessments in the United States // Arboriculture and Urban Forestry. 2008. Vol. 34. P. 341–346. DOI: 10.48044/jauf.2008.047.

Fink S. Hazard tree identification by visual tree assessment (VTA): Scientifically solid and practically approved // Arboricultural Journal. 2009. Vol. 32, iss. 3. P. 139-155. DOI: 10.1080/03071375.2009.9747570.

Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas stand by means of sap ow measurements // Tree Physiol. 1987. Vol. 3, iss. 4. P. 309–319. DOI: 10.1093/treephys/3.4.309.

Köstner B., *Granier A*., *Cermák J.* Sap Flow measurements in forest stands: methods and uncertainties // Annales des sciences forestières. 1998. Vol. 55, iss. 1-2. P. 13-27. DOI: 10.1051/forest:19980102.

McPherson E.G., *van Doorn N*., *Peper P.* Urban Tree Database and Allometric Equations: Gen. Tech. Report. Albany, 2016. 86 p. DOI: 10.2737/PSW-GTR-253.

Nowak D.J., *Hoehn R.E*., *Bodine A.R*., *Greenfield E.J*., *O'Neil- Dunne J.* Urban forest structure, ecosystem services and change in Syracuse, NY // Urban Ecosystems. 2016. Vol. 19, iss. 4. P. 1455–1477. DOI: 10.1007/s11252-013-0326-z.

Roman L.A., *Campbell L.K*., *Jordan R.C.* Civic Science in Urban Forestry: An Introduction // Arboriculture & Urban Forestry. 2018. Vol. 44 (442). P. 41–48. DOI: 10.48044/jauf.2018.004.

Sushko S., *Yaroslavtsev A*., *Tsuvareva N*., *Valentini R.* Capacity of *Quercus robur* L. and *Tilia cordata* Mill. trees in providing urban ecosystem services in boreal climate // EGU General Assembly. 2021. Art. no. 7125. DOI: 10.5194/egusphere-egu21-7125.

References

Alonzo M., *Bookhagen B*., *Roberts D.A.* Urban tree species mapping using hyperspectral and lidar data fusion. *Remote Sens. Environ*., 2014, vol. 148, pp. 70–83. DOI: 10.1016/j.rse.2014.03.018.

Andersson E., *Barthel S*., *Borgström S*., *Colding J*., *Elmqvist T*., *Folke C*., *Gren Å.* Reconnecting Cities to the Biosphere: Stewardship of Green Infrastructure and Urban Ecosystem Services. *AMBIO*, 2014, vol. 43, pp. 445–453. DOI: 10.1007/s13280-014-0506-y.

Andersson-Sköld Y., *Klingberg J*., *Gunnarsson B*., *Cullinan K*., *Gustafsson I*., *Hedblom M*., *Knez I*., *Lindberg F*., *Sang Å.O*., *Pleijel H*., *Thorsson P*., *Thorsson S.* A framework for assessing urban greenery's effects and valuing its ecosystem services. *J. Environ. Manag*., 2018, vol. 205, pp. 274–285. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.09.071.

Angel S., *Parent J*., *Civco D.L*., *Blei A*., *Potere D.* The dimensions of global urban expansion: estimates and projections for all countries, 2000–2050. *Prog. Plann*., 2011, vol. 75, iss. 2, pp. 53-107. DOI: 10.1016/j.progress.2011.04.001.

Anosov E.A. Avariynye derevya zelenykh nasazhdeniy gorodov. Metody vizualnoy i instrumentalnoy diagnostiki avariynosti, otsenka sostoyaniya nasazhdeniy. *Uchenye zametki TOGU*, 2015, vol. 6, no. 4, pp. 637-648. (In Russ.)

Ardila J.P., *Bijker W.*, *Tolpekin V.A.*, *Stein A.* Context- sensitive extraction of tree crown objects in urban areas using VHR satellite images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, vol. 15, pp. 57–69. DOI: 10.1016/j.jag.2011.06.005.

Belyaeva N.V., *Gryazkin A.V.*, *Voskresenskaya M.P.*, *Kovalev N.V.*, *Malyxina E.O.*, *Sokolova V.A.* Lesorastitelnye osobennosti Sankt-Peterburga. *Zelenoe prostranstvo krupnykh gorodov: nauka i innovatsii*. St. Petersburg, 2013, pp. 4-14. (In Russ.)

Belyaeva Yu.V., *Saksonov S.S.* Vliyanie avtotransporta na drevesnye rasteniya goroda (na primere g. Tolyatti, Samarskaya oblast). *Samarskaya Luka: problemy regionalnoy i globalnoy ekologii*, 2018, vol. 28, no. 1, pp. 97-99. (In Russ.)

Blanusa T., *Garratt M.*, *Cathcart-James M.*, *Hunt L.*, *Cameron R.W.F.* Urban hedges: A review of plant species and cultivars for ecosystem service delivery in north-west Europe. *Urban For. Urban Green.*, 2019, vol. 44, art. no. 126391. DOI: 10.1016/j.ufug.2019.126391.

Boyko T.A., *Maltseva A.P.*, *Zbrueva I.I.* Sostoyanie zelenykh nasazhdeniy obshchego polzovaniya v usloviyakh Permi. *Ekologiya urbanizirovannykh territoriy*, 2019, no. 2, pp. 85-92. (In Russ.)

Burgess S.S., *Adams M.A.*, *Turner N.C.*, *Beverly C.R.*, *Ong C.K.*, *Khan A.A.*, *Bleby T.M.* An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap ow in woody plants. *Tree Physiol.*, 2001, vol. 21, pp. 589–598. DOI: 10.1093/treephys/21.9.589.

Čermak J., *Kucera J.*, *Nadezhdina N.* Sap ow measurements with some thermodynamic me- thods, ow integration with trees and scaling up from sample trees to entire forest stands. *Trees*, 2004, vol. 18, pp. 529–546. DOI: 10.1007/s00468-004-0339-6.

Chang J., *Qu Z.*, *Xu R.*, *Pan K.*, *Xu B.*, *Min Y.*, *Ge Y.* Assessing the ecosystem services provided by urban green spaces along urban center-edge gradients. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, iss. 1, art. no. 11226. DOI: 10.1038/s41598-017-11559-5.

Cheng-Jung Lin, *Yu-Chien Kao*, *Ta-Te Lin*, *Ming-Jer Tsai*, *Song-Yung Wang*, *Lang-Dong Lin*, *Ya-Nan Wang*, *Ming-Hsun Chan*. Application of an ultrasonic tomographic technique for detecting defects in standing trees. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2008, vol. 62, pp. 434-441. DOI: 10.1016/j.ibiod.2007.09.007.

Clark J.R., *Matheny N.P.*, *Cross G.*, *Wade V.* A model of urban forest sustainability. *Journal of Arboriculture*, 1997, vol. 23, iss. 1, pp. 17–30. DOI: 10.48044/jauf.1997.003.

Costanza R., *d'Arge R.*, *de Groot R.*, *Farber S.*, *Grasso M.*, *Hannon B.*, *Limburg K.*, *Naeem S.*, *O'Neill R.V.*, *Paruelo J.*, *Raskin R.G.*, *Sutton P.*, *van den Belt M.* The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, vol. 387, iss. 15, pp. 253-260. DOI: 10.1038/387253a0.

Cumming A.B., *Twardus D.B.*, *Nowak D.J.* Urban forest health monitoring: Large-scale assessments in the United States. *Arboriculture and Urban Forestry*, 2008, vol. 34, pp. 341–346. DOI: 10.48044/jauf.2008.047.

Fink S. Hazard tree identification by visual tree assessment (VTA): Scientifically solid and practically approved. *Arboricultural Journal*, 2009, vol. 32, iss. 3, pp. 139-155. DOI: 10.1080/03071375.2009.9747570.

Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas stand by means of sap ow measurements. *Tree Physiol*., 1987, vol. 3, iss. 4, pp. 309–319. DOI: 10.1093/treephys/3.4.309.

Gryazkin A.V., *Biketova S.V.* Patent № 2852509. Sposob kompleksnogo uchyota rastitelnosti ekosistem. Registered September 12, 2025. (In Russ.)

Gryazkin M.A., *Gryazkin A.V.* Effektivnost vnedreniya novykh tekhnologiy pri provedenii nauchnykh issledovaniy. *Polevye eksperimenty – dlya ustoychivogo zemlepolzovaniya*. St. Petersburg, 1999, pp. 164-166. (In Russ.)

Gryazkin A.V., *Melnichuk I.A.*, *Trubacheva T.A.* O sostoyanii zelenykh nasazhdeniy na uliczakh g. Sankt-Peterburga. *Problemy ekologii i okhrany prirody. Puti ikh resheniya*: mat. of All-Russ. sci.-pract. conf. Ulyanovsk, 2003, pp. 39-42. (In Russ.)

Gryazkin A.V., *Tsimbal G.S.*, *Trubacheva T.A.*, *Pimenov K.A.* Otsenka ustoychivosti drevesnykh rasteniy k antropogennomu vozdeystviyu po biometricheskim kharakteristikam listyev. *Problemy ozeleneniya krupnykh gorodov*: mat. of citywide conf. Moscow, 2010, pp. 187-189. (In Russ.)

Gryazkin A.V., *Petrik V.V.*, *Smertin V.N.* Dinamika sostoyaniya drevostoev v parkovykh biogeotsenozakh. *Russian forestry journal*, 2011, no. 6, pp. 23-31. (In Russ.)

Gryazkin A.V., *Gerasyuta S.M.*, *Bernatskiy D.P.*, *Trubacheva T.A.*, *Kovalev N.V.* Izmenchivost velichiny impedansa drevesnykh porod. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2012, iss. 198, pp. 12-19. (In Russ.)

Gryazkin A.V., *Belyaeva N.V.*, *Kovalev N.V.*, *Bazaev A.B.*, *Khetagurov Kh.M.* Zarubezhny opyt v oblasti lesnykh otnosheniy i otsenki znacheniya zelenykh nasazhdeniy. *Ekologicheskie problemy Arktiki i severnykh territoriy*, 2014, iss. 17, pp. 9-15. (In Russ.)

Köstner B., *Granier A.*, *Cermák J.* Sap Flow measurements in forest stands: methods and uncertainties. *Annales des sciences forestières*, 1998, vol. 55, iss. 1-2, pp. 13-27. DOI: 10.1051/forest:19980102.

Latukhina I.K., *Babich N.A.*, *Antonov A.M.*, *Pastukhova N.O.* Impulsno-tomografnaya diagnostika stvolov v gorodskikh usloviyakh na primere lipy melkolistnoy. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2016, no. 7, pp. 36-40. (In Russ.)

Maydebura I.S. Vliyanie zagryazneniya vozdushnogo basseyna goroda Kaliningrada na anatomo-morfologicheskie i biokhimicheskie pokazateli drevesnykh rasteniy. Diss. ... Cand. Biol. Sci. Kaliningrad, 2006. 146 p. (In Russ.)

McPherson E.G., *van Doorn N.*, *Peper P.* Urban Tree Database and Allometric Equations: Gen. Tech. Report. Albany, 2016. 86 p. DOI: 10.2737/PSW-GTR-253.

Melnichuk I.A., *Tsuvaryova N.A.* Perspektivy primeneniya tsifrovykh tekhnologiy dlya monitoringa zelenykh nasazhdeniy v Sankt-Peterburge. *Tsifrovye tekhnologii v lesnom sektore*: mat. of All-Russ. sci.-tech. conf. St. Petersburg, 2020, pp. 102-104. (In Russ.)

Melnichuk I.A., *Yassin M.Y.S.*, *Cherdantseva O.A.* Diagnostika vnutrennego sostoyaniya derevyev *Tilia cordata* Mill. s ispolzovaniem kompleksa apparatury akusticheskoy ultrazvukovoy tomografii "Arbotom". *Vestnik RUDN. Ser.: Agronomiya i zhivotnovodstvo*, 2012, no. 5, pp. 25-32. (In Russ.)

Neverova O.A., *Kolmogorova E.Yu.* Drevesnye rasteniya i urbanizirovannaya sreda (ekologicheskie i biotekhnologicheskie aspekty). Novosibirsk: Nauka, 2003. 222 p. (In Russ.)

Nowak D.J., *Hoehn R.E.*, *Bodine A.R.*, *Greenfield E.J.*, *O'Neil- Dunne J.* Urban forest structure, ecosystem services and change in Syracuse, NY. *Urban Ecosystems*, 2016, vol. 19, iss. 4, pp. 1455–1477. DOI: 10.1007/s11252-013-0326-z.

Petrik V.V., *Gryazkin A.V.*, *Smertin V.N.* Dinamika struktury i sostoyaniya parkovykh fitotsenozov v usloviyakh intensivnoy rekreatsii. Arkhangelsk: PH SAFU, 2015. 96 p. (In Russ.)

Roman L.A., *Campbell L.K.*, *Jordan R.C.* Civic Science in Urban Forestry: An Introduction. *Arboriculture & Urban Forestry*, 2018, vol. 44 (442), pp. 41–48. DOI: 10.48044/jauf.2018.004.

Sevostyanov V.A., *Gryazkin A.V.* Otsenka aeroionnoy sposobnosti drevesnykh rasteniy dlya sozdaniya lokalnykh fitologicheskikh ingalyatoriev. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2016, no. 9, pp. 82-86. (In Russ.)

Shikhova N.S. Kompleksnaya otsenka sostoyaniya lesov zelenoy zony Vladivostoka. *Lesovedenie*. 2015, no. 6, pp. 436-446. (In Russ.)

Sushko S., *Yaroslavtsev A.*, *Tsuvareva N.*, *Valentini R.* Capacity of *Quercus robur* L. and *Tilia cordata* Mill. trees in providing urban ecosystem services in boreal climate. *EGU General Assembly*, 2021, art. no. 7125. DOI: 10.5194/egusphere-egu21-7125.

Tsuvaryova N.A., *Sushko S.V.*, *Melnichuk I.A.*, *Yaroslavtsev A.M.* Primenenie sovremennykh tekhnologicheskikh sredstv dlya otsenki i monitoringa sostoyaniya zelenykh nasazhdeniy goroda (na primere ustroystva TreeTalker). *Chteniya pamyati T.B. Dubyago*: collection of works of int. conf. St. Petersburg, 2019, pp. 116-119. (In Russ.)

Tsuvaryova N.A., *Dyk Buy Din`*, *Melnichuk I.A.*, *Selikhovkin A.V.* Monitoring sostoyaniya nasazhdeniy Sankt-Peterburga: sovremennye i traditsionnye podkhody. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2021, iss. 235, pp. 6-22. (In Russ.)

Tyukavina O.N. Skorost prokhozhdeniya zvukovogo impulsa v drevesine sosny. *Arctic Environmental Research*, 2014, no. 3, pp. 32-38. (In Russ.)

Tyukavina O.N. O metodakh interpretatsii rezultatov akusticheskoy tomografii drevesiny sosny. *Russian forestry journal*, 2015, no. 2, pp. 78-83. (In Russ.)

Zelenoe prostranstvo krupnykh gorodov: nauka i innovatsii. St. Petersburg: SPbGLTU, 2013. 124 p. (In Russ.)

Zhakova S.N., *Pimenova E.V.*, *Likhachev S.V.* Ekologicheskie metody diagnostiki zhiznesposobnosti drevesnykh rasteniy: praktikum. Perm: Prokrost, 2020. 54 p. (In Russ.)

Zubova S.S. Sostoyanie i struktura ulichnykh nasazhdeniy tsentralnoy chasti g. Ekaterinburg. *Nauchny zhurnal KubGAU*, 2017, no. 134 (10), pp. 753-759. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 15.01.2026

Цуварёва Н.А., Иришина Е.И., Фоминых М.Б., Кашафеев И.Р., Бикетова С.В. Влияние ценотического окружения на состояние дерева в парковых сообществах // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2026. Вып. 259. С. 175–194. DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.175-194

Представлены материалы по установлению жизненного состояния дерева с учётом ценотического окружения. Объект исследования – дендропарк Ботанического сада Санкт-Петербургского лесотехнического университета. Для выполнения научных исследований выбрано 5 модельных деревьев – один *Quercus robur* L. и четыре *Tilia cordata* Mill. Эти древесные породы представлены практически во всех парках Санкт-Петербурга. Отобранные модельные экземпляры имеют сопоставимые характеристики по возрасту и по высоте. У всех модельных деревьев измеряли высоту, диаметр ствола, определяли возраст дерева. При визуальной оценке состояния дерева использовали шкалу, рекомендованную Правилами санитарной безопасности в лесах, введёнными в действие с 1 января 2021 года. В радиусе 6 м вокруг каждого модельного дерева установлен видовой состав и основные характеристики деревьев, подроста, подлеска и живого напочвенного покрова. Учётные работы проведены в соответствии с Патентом РФ № 2852509. Установлено, что жизненное состояние дерева коррелирует с ценотическим окружением – с интенсивностью воздействия соседних деревьев.

Ключевые слова: парковые сообщества, модельные деревья, жизненное состояние, подрост, подлесок, живой напочвенный покров.

Tsuvareva N.A., Irishina E.I., Fominykh M.B., Kashafeev I.R., Biketova S.V. Influence of the cenotic environment on the condition of a tree in park communities. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2026, iss. 259, pp. 175–194 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.175-194

The article presents materials on the determination of a tree's vital state, taking into account the composition of the phytocenosis. The study object is the dendropark of the Botanical Garden of the St. Petersburg Forestry University. Five model trees were selected for scientific research – one *Quercus robur* L. and four *Tilia cordata* Mill. These tree species are present in almost all parks in St. Petersburg. The selected model specimens have comparable characteristics in terms of age and height. The height, trunk diameter, and age of the trees were measured. When visually assessing the condition of a tree, a scale was used that was recommended by the Rules for sanitary safety in forests,

which were put into effect on January 1, 2021. Within a 6-meter radius around each model tree, the species composition and main characteristics of trees, undergrowth, understory, and living ground cover were determined. The survey was conducted in accordance with Russian Patent № 2852509. It has been established that the vital state of a tree correlates with the composition of the phytocenosis, and it depends on intensity of influence from neighboring trees.

Keywords: park communities, model trees, vital state, undergrowth, understory, living ground cover.

ЦУВАРЁВА Нина Александровна – аспирант Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. Researcher ID: AAG-1681-2020. ORCID: 0000-0001-8257-5956.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: miss-spb09@mail.ru

TSUVAREVA Nina A. – PhD student, St.Petersburg State Forest Technical University. Researcher ID: AAG-1681-2020. ORCID: 0000-0001-8257-5956.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: miss-spb09@mail.ru

ИРИШИНА Евгения Игоревна – аспирант Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. AuthorID: 1225653. SPIN-код: 7996-1847.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: evgenia.irischina@yandex.ru

IRISCHINA Evgeniya I. – PhD student, St.Petersburg State Forest Technical University. AuthorID: 1225653. SPIN-code: 7996-1847.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: evgenia.irischina@yandex.ru

ФОМИНЫХ Мария Борисовна – аспирант Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имент С.М. Кирова. SPIN-код: 8916-7189. Author ID: 966811. ORCID: 0009-0006-6760-9509.

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

FOMINYKH Maria B. – PhD student, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 8916-7189. Author ID: 966811. ORCID: 0009-0006-6760-9509.

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

КАШАФЕЕВ Ильнур Рафаэльевич – аспирант Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

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

KASHAFEEV Ilnur R. – PhD student, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: lesnik.ilnur@mail.ru

БИКЕТОВА Софья Викторовна – магистрант Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. ORCID: 0009-0003-9001-6646. SPIN-код: 2140-2303. AuthorID: 1221628.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: sonja.biketova@gmail.com

BIKETOVA Sofya V. – master's student, St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0009-0003-9001-6646. SPIN-code: 2140-2303. AuthorID: 1221628.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: sonja.biketova@gmail.com

УДК 630.90

А.А. Добровольский, И.Н. Валиев

ЧАСТНОЕ ЛЕСОВЛАДЕНИЕ НА ЗЕМЛЯХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ: ПРАВОВЫЕ ОСНОВЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Введение. Российская Федерация располагает одним из крупнейших лесных фондов в мире: по данным Глобальной оценки лесных ресурсов (FRA) 2025 года леса занимают 828,4 млн га, что эквивалентно примерно 20% глобального лесного покрова [FAO, 2025]. При этом все леса, входящие в состав земель лесного фонда, находятся в исключительной федеральной собственности (ст. 8 Лесного кодекса РФ, 2006), что резко отличает Россию от большинства бореальных стран и формирует институциональные ограничения для долгосрочного, ориентированного на собственника управления лесными ресурсами [Шварц, Шматков, 2020].

За последние десятилетия в стране существенно сократилась площадь сельскохозяйственных угодий: по различным оценкам, с 1960-х по начало 2000-х годов из активного использования выбыло более 58,3 млн га сельхозугодий [Агроэкологическое состояние..., 2008], за период с 2001 по 2011 гг. – ещё более 17 млн га пашни [Жигунов и др., 2014], а суммарная площадь заброшенных земель сегодня оценивается в 76 млн га с прогнозом роста до 100 млн га к началу 2030-х годов [Родина, Закалюжная, 2023; Ярошенко, 2026]. Большинство этих площадей интенсивно зарастает древесно-кустарниковой растительностью (ДКР), формируя самовозобновляющиеся леса, которые фактически выпали из легального хозяйственного оборота [Новоселова и др., 2016; Гульбе и др., 2017; Беляева и др., 2019; Жижин и др., 2021].

Исследования российских авторов показывают, что видовой состав и производительность формирующихся на таких землях древостоев существенно варьируют в зависимости от природно-географических условий. При этом производительность таких древостоев во многих случаях превосходит показатели естественных лесов [Залесов и др., 2015; Zalesov et al., 2019]. В частности, искусственные лиственничники в 60-летнем возрасте на бывшей пашне обеспечивают средний прирост 7,5–12,3 м³/га в год и запас до 740 м³/га [Залесов и др., 2022], что в разы превышает среднероссийские показатели.

Сравнения с другими странами, находящимися в бореальном поясе (Швеция, Финляндия, Норвегия, Канада, США), показывают, что, например, при существенно меньшей площади лесов скандинавские страны обеспечивают значительно более высокую интенсивность лесопользования и экономический возврат, опираясь на преобладание частной собственности и интенсивные модели ведения лесного хозяйства [Angelstam et al., 2017; Elbakidze et al., 2013]. В этой связи использование заброшенных сельхозземель, находящихся в частной собственности, для целей лесного хозяйства, особенно для целей плантационного лесовыращивания, рассматривается как один из ключевых потенциальных стимулов реформирования российского лесного комплекса [Шварц и др., 2020; Шварц, Шматков, 2020].

Цель настоящей работы – проанализировать правовые механизмы развития частного лесовладения на землях сельскохозяйственного назначения в России, оценить потенциал вовлечения выбывших из оборота сельхозземель в лесохозяйственный оборот и сопоставить возможные направления реформ с опытом стран бореального пояса.

Материалы и методика исследования. Исследование выполнено с применением сравнительно-правового и системно-аналитического методов. Информационную базу составили: нормативные правовые акты Российской Федерации; данные Глобальной оценки лесных ресурсов ФАО ООН по шести странам бореального пояса; Государственные (национальные) доклады о состоянии и использовании земель в Российской Федерации; отечественные и зарубежные рецензируемые научные публикации, а также официальная лесохозяйственная статистика Швеции (Skogsstyrelsen), Финляндии (Luke), Норвегии (NIBIO, SSB), Канады (Natural Resources Canada) и США (USDA Forest Service).

Результаты исследования.

1. Правовые основы ведения лесного хозяйства на землях сельскохозяйственного назначения

Современный правовой режим лесов в России определяется Лесным кодексом РФ 2006 года и смежными актами, закрепляющими принцип государственной собственности на лесной фонд при разнообразии форм лесопользования. Статья 6 Лесного кодекса РФ устанавливает, что леса могут располагаться на землях иных категорий, в том числе сельскохозяйственного назначения, а ст. 123 ЛК РФ устанавливает особенности использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов, расположенных на землях данной категории, делегируя определение порядка их реализации уполномоченному федеральному органу исполнительной власти в области лесных отношений.

Земельный кодекс РФ (ст. 7) подразделяет земли на категории по целевому назначению, а ст. 77 ч. 2 относит к землям сельхозназначения пашни, сенокосы, пастбища, залежи, а также земли, занятые дорогами, коммуникациями и древесно-кустарниковой растительностью. При этом долгосрочное лесное хозяйство как самостоятельный вид использования этих земель в ЗК РФ не выделяется, что создаёт системную правовую коллизию.

Правовую основу проблемы частного лесовладения на землях сельскохозяйственного назначения формирует именно эта коллизия между двумя кодексами. Земельный кодекс РФ (ст. 42) и ст. 6 Федерального закона № 101-ФЗ «Об обороте земель сельскохозяйственного назначения» обязывают правообладателей использовать земельные участки по целевому назначению, а ненадлежащее использование влечёт административную ответственность (ч. 2 ст. 8.8 КоАП РФ: для граждан – от 0,3 до 0,5% кадастровой стоимости участка, но не менее 3 000 руб.; для юридических лиц – от 2 до 10% кадастровой стоимости, но не менее 200 000 руб.) и в дальнейшем потенциальное принудительное изъятие участка в судебном порядке. Согласно ст. 284 ГК РФ, изъятие возможно в случае неиспользования земельного участка по целевому назначению в течение трёх лет – этот срок является принципиальным, поскольку именно за три года заброшенный участок успевает зарасти ДКР до степени, фиксируемой как признак нарушения, тогда как легальных инструментов для хозяйственного освоения этих насаждений не существовало [Родина, Закалюжная, 2023].

Практическим следствием описанной коллизии стала правовая ловушка для добросовестных землевладельцев. Зарастание участка ДКР, происходившее нередко вопреки воле собственника в силу заброшенности угодий в постсоветский период, фиксировалось органами Россельхознадзора как факт неиспользования земли по целевому назначению в соответствии с перечнем признаков, закреплённым постановлением Правительства РФ от 18.09.2020 № 1482 «О признаках неиспользования земельных участков из земель сельскохозяйственного назначения по целевому назначению или использования с нарушением законодательства Российской Федерации». Плановые контрольные проверки влекли предписания об устранении нарушений и административные штрафы; при повторных нарушениях органы исполнительной власти субъекта или прокуратура были вправе инициировать принудительное изъятие участка через суд (ст. 284–285 ГК РФ, ст. 6 Закона № 101-ФЗ).

Согласно постановлению Правительства РФ от 18.09.2020 № 1482, наличие на пашне, сенокосах и пастбищах несанкционированной древесно-

кустарниковой растительности квалифицируется как признак неиспользования земельного участка по целевому назначению. Это означает, что зарастающий участок автоматически подпадает под действие нормативного перечня независимо от причин зарастания и влечет применение мер административной ответственности и гражданско-правовых последствий в виде угрозы изъятия. Единственным доступным для собственника «решением» нередко становилось механическое или пирогенное уничтожение сложившихся насаждений, что наносит очевидный экологический ущерб [Родина, Закалюжная, 2023; Жижин и др., 2021].

Законодательно урегулировать коллизию были предприняты попытки в два взаимосвязанных шага. Первым стало Постановление Правительства РФ от 18.09.2020 № 1482, обновившее перечень признаков неиспользования земель сельскохозяйственного назначения и исключившее из него наличие древесно-кустарниковой растительности в тех случаях, когда правообладатель использует участок для ведения лесного хозяйства в соответствии с установленными условиями. Вторым – принятое тремя днями позже Постановление Правительства РФ от 21.09.2020 № 1509 «Об особенностях использования, охраны, защиты, воспроизводства лесов, расположенных на землях сельскохозяйственного назначения», фактически легализовавшее частное лесное хозяйство на таких участках без их перевода в земли лесного фонда.

Перевод сельскохозяйственных земель в категорию земель лесного фонда формально может устранить указанную коллизию, но одновременно приводит к утрате их статуса сельхозугодий и усложняет режим землепользования для правообладателей. Более рациональным решением представляется не изменение категории земель, а закрепление лесного хозяйства как самостоятельного вида разрешённого использования в рамках земель сельскохозяйственного назначения.

Несмотря на существование ряда неурегулированных вопросов, Постановление № 1509 по данным некоторых авторов [Шварц и др., 2022] на начальном этапе реализации подтвердило свою востребованность: за первые два года его действия в территориальные органы Россельхознадзора поступило 2 487 уведомлений об использовании земельных участков сельскохозяйственного назначения для целей ведения лесного хозяйства в отношении 10 116 участков общей площадью 552,7 тыс. га (средний размер участка – около 55 га).

Вместе с тем принятые позже подзаконные акты не создали полноценного института частного лесовладения. Постановление № 1043 от 08.06.2022 существенно усложнило реализацию Постановления № 1509:

уведомительный порядок был заменён разрешительным – с обязательным согласованием территориального органа Федерального агентства лесного хозяйства (Рослесхоза), рассмотрением межведомственной комиссией и ограниченным сроком действия положительного решения. Одновременно введены жёсткие пороговые критерии (площадь участка более 0,5 га, высота деревьев более 5 м, лесной покров более 75%, сомкнутость крон 0,8–1 – все четыре признака одновременно), существенно сужающие круг участков, к которым Положение применимо. Порядок оформления прав на насаждения, механизм их инвентаризации и включения в государственный лесной реестр по-прежнему отсутствуют [Родина, Закалюжная, 2023; Шварц и др., 2022; Дубенок и др., 2020]. Таким образом, проблема лесопользования на землях сельскохозяйственного назначения по сей день остаётся нерешённой.

2. Международный опыт и модели частного лесовладения

По данным Глобальной оценки лесных ресурсов (FRA) 2025 года, страны бореального пояса демонстрируют широкий спектр сочетаний государственной и частной собственности на леса [FAO, 2025]. В Норвегии, Швеции и Финляндии доминируют частные и семейные лесовладения; в Канаде преобладают государственные леса, используемые на основе долгосрочных концессий; в США наблюдается сочетание частных, корпоративных и государственных лесов с сильной региональной дифференциацией (табл. 1).

Таблица 1

Структура лесовладения в странах бореального пояса

Structure of forest ownership in boreal countries

Страна	Доля частного лесовладения, %	Доля государственного владения, %	Площадь лесов, млн га
Россия	0	100	828,4
США	57,6	42,4	308,9
Канада	8,7	90,5	369,0
Швеция	74,6	25,3	27,9
Финляндия	68,9	30,8	22,5
Норвегия	83,2	12,3	12,1

Примечание. Данные FRA 2025 (базовый год – 2020). Сумма долей частного и государственного владения может не составлять 100% ввиду наличия иных форм собственности. Для Норвегии разница (4,5%) соответствует категории «Unknown (d)» в отчёте FRA 2025 – лесам, по которым форма собственности официально не установлена (546,81 тыс. га).

Сравнение показателей лесного хозяйства по странам позволяет выделить принципиальные различия в эффективности управления лесными ресурсами. По данным ФАО (FRA 2025), объём лесозаготовки в России составляет 188,0 млн м³ в год (табл. 2); по данным Рослесхоза, в 2022 году этот показатель достигал 194,6 млн м³, что объясняется различиями в методологии учёта. Суммарная вырубка леса в Швеции в 2022 году составила 95,8 млн м³ [Skogsstyrelsen, 2023], что соответствует ~51% от российского показателя по данным Рослесхоза за тот же год; по данным FRA 2025 (базовый год – 2020) годовая заготовка в Швеции составляла 88,9 млн м³ (табл. 2).

Таблица 2

Основные показатели лесных ресурсов по странам бореального пояса

Main indicators of forest resources in boreal countries

Страна	Площадь лесов, млн га	Общий запас, млн м³	Запас на 1 га, м³	Годовой прирост, млн м³	Прирост на 1 га/год, м³	Годовая заготовка, млн м³
Россия	828,4	125 677,0	150,9	1 063,0[1]	1,28	188,0
США	308,9	45 770,0	148,2	708,0[2]	2,29	369,0[2]
Канада	369,0	50 384,0	136,6	–	–	129,5[3]
Швеция	27,9	3 544,8	126,9	114,0	4,08	88,9[4]
Финляндия	22,5	2 538,6	112,6	103,0[5]	4,57	76,0[6]
Норвегия	12,1	1 184,2	97,8	24,6[6]	2,03	12,8[7]

Примечание. Данные по всем странам, за исключением случаев, отмеченных сносками, взяты из отчётов по странам FAO Global Forest Resources Assessment 2025 г. (базовый год – 2020).

Это характеризует огромный разрыв в интенсивности использования лесных ресурсов стран, находящихся в схожих климатических условиях. Эти различия подтверждаются также сравнением объёмов искусственного

[1] [Филипчук и др., 2022]
[2] [Oswalt et al., 2019]
[3] [Natural Resources Canada, 2024]
[4] [Skogsstyrelsen, 2023]
[5] [Luke, 2023]
[6] Данные приведены без коры (under bark). [SSB, 2023]

лесовосстановления, площади рубок ухода и величины заготовки в расчёте на гектар сплошных рубок, где Россия заметно уступает скандинавским странам [Шварц и др., 2022].

Финляндия, где 69% площади лесов находится в частной собственности, демонстрирует максимальный коэффициент освоения расчётного ежегодного прироста: при среднегодовом приросте 103 млн м³ фактические рубки в 2019–2023 гг. составляли 69–76 млн м³/год, то есть осваивалось 67–74% ежегодного прироста [FAO, 2025]. В Швеции (75% частного владения) общий лесной запас вырос с 3 185 млн м³ (1990) до 3 545 млн м³ (2020) несмотря на высокий объём лесозаготовок [FAO, 2025]. В Норвегии запас вырос почти втрое с 1925 г. – с ~400 до 1 184 млн м³ к 2020 г., – что объясняется сочетанием активного лесоуправления и последовательного развития частной инициативы [FAO, 2025; Norsk institutt for bioøkonomi, 2023]. Данные таблиц 1 и 2, взятые совместно, выявляют устойчивую закономерность: страны с высокой долей частного лесовладения (Норвегия – 83%, Швеция – 75%, Финляндия – 69%), в целом, демонстрируют более высокие показатели прироста на 1 га (2,03; 4,08; и 4,57 м³/га/год соответственно), тогда как Россия при 100% государственной собственности этот показатель составляет лишь 1,28 м³/га/год. Эта закономерность согласуется с выводами исследователей, которые при сопоставлении российского (на основе государственной собственности) и шведского (децентрализованного) подходов к лесному хозяйству заключили, что именно различия в лесоуправлении и структуре собственности влияют на биопродуктивность и показатели освоения расчетной лесосеки [Angelstam et al., 2017; Elbakidze et al., 2013].

Россия, при крупнейшей в мире лесной площади (828,4 млн га) и наибольшем абсолютном приросте (1 063 млн м³/год), демонстрирует наихудший среди рассматриваемых стран показатель прироста на 1 га и наименьший коэффициент освоения расчётной лесосеки – в отдельные годы фактическая заготовка составляет лишь около 25% от расчетной лесосеки в среднем по стране [Писаренко, Страхов, 2004; FAO, 2025]. При этом официальная расчётная лесосека в ряде важнейших лесопромышленных регионов не превышает 35% от установленной [Соколов и др., 2017], что свидетельствует об одновременном завышении нормативов и недоосвоении даже заниженных показателей. Ключевой проблемой российской модели остаётся ориентация на экстенсивное освоение пространственного ресурса, а не на управление лесом как воспроизводимым капиталом [Писаренко, Страхов, 2004; Книзе, Романюк, 2004; Шварц, Шматков, 2020].

Международный опыт показывает, что переход от «лесного рудника» к устойчивому интенсивному лесоуправлению потребовал в скандинавских странах нескольких десятилетий системных преобразований [Angelstam et al. 2019]. Например, в Швеции основы современной лесной политики были заложены ещё в лесном законе 1903 г., однако принципиальный сдвиг произошёл в 1993 г., когда правительство впервые уравняло производственные и экологические цели лесопользования [FAO, 2025]. При этом частное лесовладение играет ключевую роль в современной шведской модели – частные собственники – в совокупности владеющие 74,6% лесного фонда страны – концентрируют в своих руках 48% продуктивных лесных земель, доступных для промышленной эксплуатации, и обеспечивают 59% годового объема лесозаготовок [Kronholm et al., 2020]. По данным FRA 2025 частные владельцы контролируют 74,6% общей площади лесов Швеции, тогда как 48% относятся только к продуктивным лесным землям по национальной статистике [FAO, 2025; Kronholm et al., 2020]. В Канаде эволюция лесной политики шла по пути постепенного разграничения полномочий между федеральным правительством и провинциями при одновременном ужесточении экологических стандартов для концессионеров [Жидкова, 2025]. При этом 10–11% лесов в Канаде, находящихся в частной собственности, обеспечивают около 19–20% от общего объема лесозаготовок в стране [Private forest…].

Частные лесовладельцы в этих странах осуществляют лесохозяйственную деятельность с долгосрочным инвестиционным горизонтом, превышающим продолжительность одного оборота рубки [FAO, 2025]. Фактически же реальный горизонт планирования определяется сроком действия лесохозяйственного регламента лесничества, который разрабатывается на 10 лет[7], что заведомо исключает долгосрочные инвестиции в создание и ведение лесных культур, развитие лесной инфраструктуры и интенсивное лесное хозяйство на таких участках.

Кроме того, существующий в Российской Федерации механизм аренды лесов не стимулирует арендаторов к инвестициям в лесовосстановление и систему ведения лесного хозяйства [Миронов, Селименков, 2014]. Хорошей иллюстрацией этого является статистика по созданию лесных культур и рубкам ухода. Лесные культуры составляют лишь около 1/5 общей площади лесовосстановления, то есть большая часть сплошных вырубок оставляется

[7] Лесной кодекс Российской Федерации от 04.12.2006 № 200□ФЗ (в ред. действующей на 25.03.2026)

под естественное лесозаращивание. При этом площадь молодняков, пройденных некоммерческими рубками осветления и прочистки, снижается и уже почти сравнялась с площадью искусственного лесовосстановления. В то же время опыт Швеции и Финляндии показывает, что площадь некоммерческих рубок ухода должна превышать площадь лесных культур в 2–3 раза [Шварц и др., 2022].

Сравнительные исследования подтверждают, что именно отсутствие своевременного ухода за молодняками является ключевой причиной снижения прироста ели в России: если в Швеции 100% молодых еловых насаждений прошли осветление, то в России – лишь 5% [Angelstam et al., 2017].

3. Заброшенные сельхозземли как ресурсная база для частного лесовладения в России

С формально-правовой точки зрения частные леса в России отсутствуют. Это принципиально отличает страну от Финляндии и Швеции, где ~69–75% лесного фонда находится в частной собственности [FAO, 2025]. Согласно ст. 8 Лесного кодекса РФ, лесные участки в составе земель лесного фонда находятся в федеральной собственности, другие формы собственности на земли лесного фонда исключены.

Данные международной статистики подтверждают это: частное лесовладение в России официально отсутствует (табл. 1).

Однако фактически значительные площади лесных насаждений существуют за пределами лесного фонда – на землях сельскохозяйственного назначения, находящихся в частной собственности. Пунктом 2 статьи 8 ЛК РФ указано, что формы собственности на лесные участки в составе земель иных категорий определяются в соответствии с земельным законодательством.

По данным Государственного доклада о состоянии и использовании земель РФ, на 01.01.2025 в собственности граждан находится 104 833,3 тыс. га земель сельскохозяйственного назначения, а в собственности юридических лиц – 25 393,7 тыс. га. Таким образом, суммарно в частной собственности находится 130 227,0 тыс. га земель сельскохозяйственного назначения, что составляет 34,8% от всей площади земель этой категории.

При этом, судя по отчетным документам, доля таких земель, находящихся в частной собственности, существенно выросла за период с 2022 года, когда она составляла 127 627,3 тыс. га, что соответствовало 33,97% от всей площади земель этой категории [Государственный (национальный) доклад…].

Согласно тому же отчету, только учтенных нарушений, связанных с зарастанием земельных участков сорной, древесной и кустарниковой растительностью и неиспользованием для ведения сельского хозяйства в 2024 году было выявлено на площади 2,2 млн га [Государственный (национальный) доклад…]. Выявленные нарушения – лишь малая часть от общего объёма заброшенных земель. Суммарная же площадь заброшенных сельхозземель оценивается в 76 млн га с прогнозом роста до 100 млн га к 2030-м годам [Родина, Закалюжная, 2023; Ярошенко, 2026].

Большая часть этих земель либо уже сформировала лесные насаждения, либо находится на разных стадиях зарастания ДКР [Новоселова и др., 2016; Беляева и др., 2019; Жижин и др., 2021]. Исследования показывают высокую лесохозяйственную ценность бывших с/х угодий: искусственные насаждения лиственницы Сукачева в 60-летнем возрасте обеспечивают запас стволовой древесины до 740 м³/га при среднем приросте 7,5–12,3 м³/га в год и относятся к 1а классу бонитета [Залесов и др., 2022]. Для сравнения: средний прирост по лесному фонду России составляет лишь 1,28 м³/га/год (таблица 2). Созданные в Пермском крае лесные культуры хвойных пород демонстрируют приросты и запасы, существенно превышающие средние показатели таких насаждений: культуры сосны к 120 годам – 720 м³/га, смешанные культуры сосны и ели к 95-119 годам – 658 м³/га [Рогозин, Разин, 2011].

Таким образом, плантации лесных культур на землях сельскохозяйственного назначения по продуктивности могут превышать средний показатель по стране в 6–10 раз.

Для плантационного выращивания на бывших сельскохозяйственных угодьях целесообразно применять сокращённый оборот рубки, что минимизирует экономические риски и обеспечивает более раннее получение товарной продукции, снижая зависимость результата от долгосрочных рыночных и экологических колебаний. В современных условиях бурного развития плантационного лесовыращивания во всем мире именно сокращённый оборот рубки может стать стратегическим ориентиром для российского сектора лесной промышленности.

Выход из ситуации неопределённого правового статуса лесного хозяйства на землях сельскохозяйственного назначения может дать принципиально новые импульсы для развития лесного комплекса. Заросшие лесом земли сельскохозяйственного назначения часто находятся в непосредственной близости от развитой дорожной и промышленной инфраструктуры, что кардинально выгоднее длинного плеча вывозки, характерного для традиционных лесопромышленных районов [Gerasimov et al., 2013]. Опыт

скандинавских стран убедительно демонстрирует, что частные владельцы со средним размером лесного участка 34–48 га способны обеспечивать подавляющую долю промышленной заготовки древесины [Fridén et al., 2024; Häyrinen et al., 2017]. Именно дробная, но хорошо организованная частная собственность, подкреплённая государственной системой консультационной поддержки и долгосрочными инструментами планирования, определяет высокую продуктивность лесного хозяйства в этих странах. Применительно к России это означает, что даже при сохранении государственной собственности на земли лесного фонда легализация частного лесовладения на заброшенных сельскохозяйственных угодьях способна создать конкурентоспособный сегмент интенсивного лесопользования, опирающийся на уже имеющийся земельный и ресурсный потенциал.

Заключение. Проведённый анализ позволяет утверждать, что правовой режим использования земель сельскохозяйственного назначения для целей лесовыращивания в Российской Федерации остаётся неурегулированным, несмотря на предпринятые в 2020–2022 гг. шаги по его нормативной корректировке. Сохраняющаяся коллизия между Лесным и Земельным кодексами, а также последующее изменение подходов к реализации Постановления № 1509 привели к ситуации, при которой собственники частных земель, на которых сформировались лесные биогеоценозы, не имеют легальных инструментов для их долгосрочного лесохозяйственного освоения. Фактически эти земли остаются в «правовой серой зоне», где формальное требование использования по целевому назначению вступает в противоречие с объективно сложившимся лесным ресурсным потенциалом.

Перспективы развития частного лесовладения на землях сельхозназначения в России связаны с необходимостью системного устранения правовых противоречий. Ключевыми направлениями, вытекающими из проведённого исследования, являются: законодательное закрепление ведения лесного хозяйства как самостоятельного вида использования земель сельскохозяйственного назначения без перевода их в иную категорию; создание механизма инвентаризации и учёта лесных насаждений на таких землях с последующим внесением в государственный лесной реестр; а также введение инструментов регулирования, позволяющих собственникам реализовывать сокращённые обороты рубки, минимизируя экономические риски и обеспечивая возврат инвестиций.

Таким образом, использование выбывших из оборота сельхозземель, находящихся в частной собственности, для целей плантационного лесовыращивания способно не только снять существующие правовые конфликты,

но и стать стимулом роста отечественного лесного комплекса, создав предпосылки для перехода от экстенсивного освоения пространственного ресурса к интенсивному управлению лесом как воспроизводимым капиталом.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Агроэкологическое состояние и перспективы использования земель России, вышедших из активного сельскохозяйственного оборота / под ред. Г.А. Романенко. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2008. 64 с.

Беляева Н.В., *Данилов Д.А.*, *Каза И.А.* Особенности естественного возобновления ели европейской на постагрогенных землях // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2019. Вып. 54. С. 6–10.

Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2024 году / Федеральная служба государственной регистрации, кадастра и картографии. М.: Росреестр, 2025. 203 с.

Гульбе Я.И., *Гульбе А.Я.*, *Гульбе Т.А.* Динамика биологической продуктивности молодняка ольхи серой на залежи // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2017. Вып. 47. С. 13–16.

Дубенок Н.Н., *Танюкевич В.В.*, *Михин В.И.*, *Кулик А.В.*, *Хмелева Д.В.*, *Кваша А.А.* К вопросу о проведении инвентаризации защитных лесных насаждений на землях сельскохозяйственного назначения (на примере Ростовской области) // Лесохозяйственная информация. 2020. № 4. С. 61–71. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2020.4.06

Жигунов А.В., *Данилов Д.А.*, *Красновидов А.Н.*, *Эндерс О.О.* Создание высокопродуктивных лесонасаждений на землях, вышедших из активного сельскохозяйственного оборота // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2014. № 3 (31). С. 85–90.

Жижин С.М., *Магасумова А.Г.*, *Оплетаев А.С.* Зарастание древесной растительностью сельскохозяйственных угодий в южной подзоне тайги Республики Удмуртия // Вестник Бурятской сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. 2021. № 2 (63). С. 84–91.

Жидкова Е.В. Анализ опыта применения лесного законодательства в лесах Канады разных форм собственности // Лесохозяйственная информация. 2025. № 1. С. 108–120. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2025.1.10

Залесов С.В., *Юровских Е.В.*, *Белов Л.А.*, *Магасумова А.Г.*, *Оплетаев А.С.* Рост лиственничных древостоев на бывших пашнях // Аграрный вестник Урала. 2015. № 5 (135). С. 50–54.

Залесов С.В., *Жижин С.М.*, *Магасумова А.Г.*, *Оплетаев А.С.*, *Платонов Е.П.* Повышение эффективности использования бывших сельскохозяйственных угодий // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 239. С. 104–116. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.239.104-116

Книзе А., *Романюк Б.* О двух точках зрения на российский лес и лесное хозяйство // Устойчивое лесопользование. 2004. № 4 (6). С. 21–28.

Миронов А.В., *Селименков Р.Ю.* К вопросу о развитии концессионных отношений в лесном хозяйстве региона // Проблемы развития территории. 2014. № 4 (72). С. 117–126.

Новоселова Н.Н., *Залесов С.В.*, *Магасумова А.Г.* Формирование древесной растительности на бывших сельскохозяйственных угодьях. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2016. 106 с. URL: http://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/ 6237/1/Novoselova.pdf (дата обращения: 25.03.2026).

Писаренко А.И., *Страхов В.В.* Лесное хозяйство России: от использования к управлению. М.: ИД «Юриспруденция», 2004. 552 с.

Родина М.Е., *Закалюжная Н.В.* Выращивание леса на землях сельскохозяйственного назначения в России: законодательные новеллы и их реализация // Правовой порядок и правовые ценности. 2023. Т. 1, № 2. С. 34–46. DOI: 10.23947/2949-1843-2023-1-2-34-46

Рогозин М.В., *Разин Г.С.* Лесные культуры А.Е. и Ф.А. Теплоуховых и современный научный поиск // Вестник Пермского университета. Биология. 2011. № 2. С. 10–17.

Соколов В.А., *Соколова Н.В.*, *Втюрина О.П.*, *Лапин Е.А.* Прогноз динамики лесов Красноярского края // Сибирский лесной журнал. 2017. № 4. С. 91–100.

Филипчук А.Н., *Малышева Н.В.*, *Золина Т.А.*, *Федоров С.В.*, *Бердов А.М.*, *Косицын В.Н.*, *Югов А.Н.*, *Кинигопуло П.С.* Аналитический обзор количественных и качественных характеристик лесов Российской Федерации: итоги первого цикла государственной инвентаризации лесов // Лесохозяйственная информация. 2022. № 1. С. 5–34. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2022.1.01

Шварц Е.А., *Стариков И.В.*, *Харламов В.С.*, *Голунов Р.Ю.*, *Кобяков А.В.*, *Луковцев Ф.Ю.*, *Птичников А.В.*, *Тюленева О.В.*, *Шматков Н.М.*, *Щеголев А.А.*, *Ярошенко А.Ю.* Новый взгляд: предложения в проект Стратегии развития лесного комплекса // Устойчивое лесопользование. 2020. № 4 (63). С. 2–25.

Шварц Е.А., *Шматков Н.М.* Мифы и проблемы реформирования лесного хозяйства России // Общественные науки и современность. 2020. № 3. С. 35–53. DOI: 10.31857/S086904990010068-6

Шварц Е.А., *Шматков Н.М.*, *Карпачевский М.Л.*, *Байбар А.С.* Вызовы и проблемы реформирования лесного хозяйства России // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 241. С. 157–172. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.241.157-172

Ярошенко А.Ю. Сельское лесоводство в России: ситуация на начало 2026 года / Ассоциация «Охрана природы» // Лесной форум Гринпис России. 2026. URL: https://forest.earthtouches.me/wiki/tpost/7ayyuu6ps1-selskoe-lesovodstvo-v-rossii-situatsiya (дата обращения: 25.03.2026).

Angelstam P., *Naumov V.*, *Elbakidze M.* Transitioning from Soviet wood mining to sustainable forest management by intensification: Are tree growth rates different in

northwest Russia and Sweden? *Forestry*. 2017. Vol. 90, No. 2. P. 292–303. DOI: 10.1093/forestry/cpw055

Angelstam P., *Elbakidze M*., *Axelsson R*., *Khoroshev A*., *Tysiachniouk M*., *Zabubenin E.* Model forests in Russia as landscape approach: Demonstration projects or initiatives for learning towards sustainable forest management? // *Forest Policy and Economics*. 2019. Vol. 101. P. 96–110. DOI: 10.1016/j.forpol.2019.01.005

Elbakidze M., *Andersson K*., *Angelstam P*., *Armstrong G.W*., *Axelsson R*., *Doyon F*., *Hermansson M*., *Jacobsson J*., *Pautov Y.* Sustained yield forestry in Sweden and Russia: How does it correspond to sustainable forest management policy? // *Ambio*. 2013. Vol. 42, No. 2. P. 175–188. DOI: 10.1007/s13280-012-0370-6

FAO. Global Forest Resources Assessment 2025. Country Reports: Russia, Sweden, Finland, Norway, Canada, USA. – Rome: FAO, 2025. URL: https://www.fao.org/forest-resources-assessment/en/ (дата обращения: 25.03.2026).

Fridén A., *D'Amato D*., *Ekström H*., *Iliev B*., *Nebasifu A*., *May W*., *Thomsen M*., *Droste N.* Mapping two centuries of forest governance in Nordic countries: An open access database // *Forest Policy and Economics*. 2024. Vol. 160. Article 103142. DOI: 10.1016/j.forpol.2023.103142

Gerasimov Y., *Senko S*., *Karjalainen T.* Prospects of forest road infrastructure development in northwest Russia with proven Nordic solutions // *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2013. Vol. 28, No. 5. P. 453–460. DOI: 10.1080/02827581.2013.838299

Häyrinen L., *Mattila O*., *Berghäll S*., *Närhi M*., *Toppinen A.* Exploring the future use of forests: perceptions from non-industrial private forest owners in Finland // *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2017. Vol. 32, No. 4. P. 327–336. DOI: 10.1080/02827581.2016.1220619

Kronholm T., *Bengtsson D*., *Bergström D.* Family Forest Owners' Perception of Management and Thinning Operations in Young Dense Forests: A Survey from Sweden // *Forests*. 2020. Vol. 11, No. 11. Article 1151. DOI: 10.3390/f11111151

Luke (Luonnonvarakeskus). Finnish National Forest Inventory. – Helsinki: Luke, 2023. URL: https://www.luke.fi/en/statistics/forest-resources (дата обращения: 25.03.2026).

Natural Resources Canada. The State of Canada's Forests: Annual Report 2024. Ottawa, 2024. URL: https://natural-resources.canada.ca/sites/admin/files/documents/2025-07/StateofForestReport-2024-EN.pdf (дата обращения: 25.03.2026).

Norsk institutt for bioøkonomi (NIBIO). Landsskogtakseringen. Oslo: NIBIO, 2023. URL: https://www.nibio.no/tema/skog/landsskogtakseringen (дата обращения: 25.03.2026).

Oswalt S.N., *Smith W.B*., *Miles P.D*., *Pugh S.A.* Forest Resources of the United States, 2017. Gen. Tech. Rep. WO-97. Washington, DC: USDA Forest Service, 2019. 223 p.

Private Forests in Canada / Canadian Forest Owners Association. URL: https://www.forestowners.ca (дата обращения: 25.03.2026).

Skogsstyrelsen. Swedish Statistical Yearbook of Forestry 2023. Jönköping: Skogsstyrelsen, 2023. URL: https://www.skogsstyrelsen.se/en/statistics/ (дата обращения: 25.03.2026).

SSB (Statistics Norway). Skogavvirkning for salg. Oslo: SSB, 2023. URL: https://www.ssb.no/en/jord-skog-jakt-og-fiskeri/skogbruk/statistikk/skogavvirkning-for-salg (дата обращения: 25.03.2026).

Zalesov S.V., *Magasumova A.G.*, *Opletaev A.S.* Effectiveness of larch stands creation on former agricultural lands // *Ecological Agriculture and Sustainable Development: Research Development Center*. 2019. No. 1. P. 69–76.

References

Agroekologicheskoye sostoyaniye i perspektivy ispolzovaniya zemel Rossii, vyshedshikh iz aktivnogo selskokhozyaystvennogo oborota [Agroecological status and prospects for use of Russia's lands that have left active agricultural circulation] / ed. by G.A. Romanenko. Moscow: FGNU "Rosinformagrotekh", 2008, 64 p. (In Russ.)

Belyaeva N.V., *Danilov D.A.*, *Kaza I.A.* Osobennosti estestvennogo vozobnovleniya eli yevropeyskoy na postagrogennykh zemlyakh [Features of natural Norway spruce regeneration on post-agricultural lands]. *Aktualnyye problemy lesnogo kompleksa* [Current Issues of the Forest Complex], 2019, iss. 54, pp. 6–10. (In Russ.)

State (National) Report on the State and Use of Lands of the Russian Federation in 2024 / Federal Service for State Registration, Cadastre and Cartography. Moscow: Rosreestr, 2025, 203 p. (In Russ.)

Gulbe Ya.I., *Gulbe A.Ya.*, *Gulbe T.A.* Dinamika biologicheskoy produktivnosti molodnyaka olkhi seroy na zalezhi [Dynamics of biological productivity of grey alder young stands on fallow lands]. *Aktualnyye problemy lesnogo kompleksa* [Current Issues of the Forest Complex], 2017, iss. 47, pp. 13–16. (In Russ.)

Dubenok N.N., *Tanyukevich V.V.*, *Mikhin V.I.*, *Kulik A.V.*, *Khmeleva D.V.*, *Kvasha A.A.* To the question of inventory of protective forest stands on agricultural lands (case study of the Rostov Region). *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry Information], 2020, no. 4, pp. 61–71. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2020.4.06 (In Russ.)

Zhigunov A.V., *Danilov D.A.*, *Krasnovidov A.N.*, *Enders O.O.* Sozdaniye vysokoproduktivnykh lesonasazhdeniy na zemlyakh, vyshedshikh iz aktivnogo selskokhozyaystvennogo oborota [Establishment of highly productive forest stands on lands that have left active agricultural circulation]. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Bashkir State Agrarian University], 2014, no. 3 (31), pp. 85–90. (In Russ.)

Zhizhin S.M., *Magasumova A.G.*, *Opletaev A.S.* Zarastaniye drevesnoy rastitelnostyu selskokhozyaystvennykh ugodiy v yuzhnoy podzone taygi Respubliki Udmurtiya [Overgrowth of agricultural lands with woody vegetation in the southern taiga subzone of the Udmurt Republic]. *Vestnik Buryatskoy selskokhozyaystvennoy*

akademii im. V.R. Filippova [Bulletin of the Buryat State Academy of Agriculture], 2021, no. 2 (63), pp. 84–91. (In Russ.)

Zhidkova E.V. Analiz opyta primeneniya lesnogo zakonodatelstva v lesakh Kanady raznykh form sobstvennosti [Analysis of forest legislation application in Canadian forests of different ownership forms]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry Information], 2025, no. 1, pp. 108–120. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2025.1.10 (In Russ.)

Zalesov S.V., *Yurovskikh E.V.*, *Belov L.A.*, *Magasumova A.G.*, *Opletaev A.S.* Rost listvennichnykh drevostoyev na byvshikh pashn'yakh [Growth of larch stands on former arable lands]. *Agrarnyy vestnik Urala* [Agrarian Bulletin of the Urals], 2015, no. 5 (135), pp. 50–54. (In Russ.)

Zalesov S.V., *Zhizhin S.M.*, *Magasumova A.G.*, *Opletaev A.S.*, *Platonov E.P.* Povysheniye effektivnosti ispolzovaniya byvshikh selskokhozyaystvennykh ugodiy [Improving the efficiency of former agricultural lands use]. *Izvestia Sankt-Peterburgskoy Lesotekhnicheskoy Akademii* [Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Academy], 2022, iss. 239, pp. 104–116. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.239.104-116 (In Russ.)

Knize A., *Romanyuk B.* O dvukh tochkakh zreniya na rossiyskiy les i lesnoye khozyaystvo [On two viewpoints on Russian forests and forestry]. *Ustoychivoye lesopolzovaniye* [Sustainable Forest Management], 2004, no. 4 (6), pp. 21–28. (In Russ.)

Mironov A.V., *Selimenkov R.Yu.* K voprosu o razvitii kontsessionnykh otnosheniy v lesnom khozyaystve regiona [On the issue of developing concession relations in regional forestry]. *Problemy razvitiya territorii* [Problems of Territory Development], 2014, no. 4 (72), pp. 117–126. (In Russ.)

Novoselova N.N., *Zalesov S.V.*, *Magasumova A.G.* Formirovaniye drevesnoy rastitelnosti na byvshikh selskokhozyaystvennykh ugodyakh [Formation of woody vegetation on former agricultural lands]. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2016, 106 p. URL: http://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/6237/1/Novoselova.pdf (accessed March 25, 2026). (In Russ.)

Pisarenko A.I., *Strakhov V.V.* Lesnoye khozyaystvo Rossii: ot ispolzovaniya k upravleniyu [Forestry of Russia: from use to management]. Moscow: Yurisprudentsiya, 2004, 552 p. (In Russ.)

Rodina M.E., *Zakalyuzhnaya N.V.* Growing forests on agricultural land in Russia: legislative novelties and their implementation. *Pravovoy poryadok i pravovye tsennosti* [Law and Order and Legal Values], 2023, vol. 1, no. 2, pp. 34–46. DOI: 10.23947/2949-1843-2023-1-2-34-46 (In Russ.)

Rogozin M.V., *Razin G.S.* Lesnyye kultury A.Ye. i F.A. Teploukhov i sovremennyy nauchnyy poisk [Forest plantations of A.E. and F.A. Teploukhov and modern scientific research]. *Vestnik Permskogo universiteta. Biologiya* [Bulletin of Perm University. Biology], 2011, no. 2, pp. 10–17. (In Russ.)

Sokolov V.A., *Sokolova N.V.*, *Vtyurina O.P.*, *Lapin E.A.* Prognoz dinamiki lesov Krasnoyarskogo kraya [Forecast of forest dynamics in Krasnoyarsk Krai]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian Journal of Forest Science], 2017, no. 4, pp. 91–100. (In Russ.)

Filipchuk A.N., *Malysheva N.V.*, *Zolina T.A.*, *Fedorov S.V.*, *Berdov A.M.*, *Kositsyn V.N.*, *Yugov A.N.*, *Kinigopulo P.S.* Analytical review of quantitative and qualitative characteristics of forests of the Russian Federation: results of the first cycle of state forest inventory. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry Information], 2022, no. 1, pp. 5–34. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2022.1.01 (In Russ.)

Schwartz E.A., *Starikov I.V.*, *Kharlamov V.S.*, *Golunov R.Yu.*, *Kobyakov A.V.*, *Lukovtsev F.Yu.*, *Ptichnikov A.V.*, *Tyuleneva O.V.*, *Shmatkov N.M.*, *Shchegolev A.A.*, *Yaroshenko A.Yu.* Novyy vzglyad: predlozheniya v proyekt Strategii razvitiya lesnogo kompleksa [New perspective: proposals for the draft Strategy for the Development of the Forest Sector]. *Ustoychivoye lesopolzovaniye* [Sustainable Forest Management], 2020, no. 4 (63), pp. 2–25. (In Russ.)

Schwartz E.A., *Shmatkov N.M.* Mify i problemy reformirovaniya lesnogo khozyaystva Rossii [Myths and issues of Russian forestry reform]. *Obshchestvennyye nauki i sovremennost* [Social Sciences and Contemporary World], 2020, no. 3, pp. 35–53. DOI: 10.31857/S086904990010068-6 (In Russ.)

Schwartz E.A., *Shmatkov N.M.*, *Karpachevsky M.L.*, *Baybar A.S.* Vyzovy i problemy reformirovaniya lesnogo khozyaystva Rossii [Challenges and problems of Russian forestry reform]. *Izvestia Sankt-Peterburgskoy Lesotekhnicheskoy Akademii* [Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Academy], 2022, iss. 241, pp. 157–172. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.241.157-172 (In Russ.)

Yaroshenko A.Yu. Selskoye lesovodstvo v Rossii: situatsiya na nachalo 2026 goda [Agroforestry in Russia: situation at the beginning of 2026] / Association "Nature Conservation". *Lesnoy forum Grinpis Rossii* [Greenpeace Russia Forest Forum], 2026. URL: https://forest.earthtouches.me/wiki/tpost/7ayyuu6ps1-selskoe-lesovodstvo-v-rossii-situatsiya (accessed March 25, 2026). (In Russ.)

Angelstam P., *Naumov V.*, *Elbakidze M.* Transitioning from Soviet wood mining to sustainable forest management by intensification: Are tree growth rates different in northwest Russia and Sweden? *Forestry*, 2017, vol. 90, no. 2, pp. 292–303. DOI: 10.1093/forestry/cpw055

Angelstam P., *Elbakidze M.*, *Axelsson R.*, *Khoroshev A.*, *Tysiachniouk M.*, *Zabubenin E.* Model forests in Russia as landscape approach: Demonstration projects or initiatives for learning towards sustainable forest management? *Forest Policy and Economics*, 2019, vol. 101, pp. 96–110. DOI: 10.1016/j.forpol.2019.01.005

Elbakidze M., *Andersson K.*, *Angelstam P.*, *Armstrong G.W.*, *Axelsson R.*, *Doyon F.*, *Hermansson M.*, *Jacobsson J.*, *Pautov Y.* Sustained yield forestry in Sweden and Russia: How does it correspond to sustainable forest management policy? *Ambio*, 2013, vol. 42, no. 2, pp. 175–188. DOI: 10.1007/s13280-012-0370-6

FAO. Global Forest Resources Assessment 2025. Country Reports: Russia, Sweden, Finland, Norway, Canada, USA. Rome: FAO, 2025. URL: https://www.fao.org/forest-resources-assessment/en/ (accessed March 25, 2026).

Fridén A., *D'Amato D.*, *Ekström H.*, *Iliev B.*, *Nebasifu A.*, *May W.*, *Thomsen M.*, *Droste N.* Mapping two centuries of forest governance in Nordic countries: An open

access database. *Forest Policy and Economics*, 2024, vol. 160, article 103142. DOI: 10.1016/j.forpol.2023.103142

Gerasimov Y., *Senko S.*, *Karjalainen T.* Prospects of forest road infrastructure development in northwest Russia with proven Nordic solutions. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2013, vol. 28, no. 5, pp. 453–460. DOI: 10.1080/02827581.2013.838299

Häyrinen L., *Mattila O.*, *Berghäll S.*, *Närhi M.*, *Toppinen A.* Exploring the future use of forests: perceptions from non-industrial private forest owners in Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2017, vol. 32, no. 4, pp. 327–336. DOI: 10.1080/02827581.2016.1220619

Kronholm T., *Bengtsson D.*, *Bergström D.* Family Forest Owners' Perception of Management and Thinning Operations in Young Dense Forests: A Survey from Sweden. *Forests*, 2020, vol. 11, no. 11, article 1151. DOI: 10.3390/f11111151

Luke (Luonnonvarakeskus). Finnish National Forest Inventory. Helsinki: Luke, 2023. URL: https://www.luke.fi/en/statistics/forest-resources (accessed March 25, 2026).

Natural Resources Canada. The State of Canada's Forests: Annual Report 2024. Ottawa, 2024. URL: https://natural-resources.canada.ca/sites/admin/files/documents/2025-07/StateofForestReport-2024-EN.pdf (accessed March 25, 2026).

Norsk institutt for bioøkonomi (NIBIO). Landsskogtakseringen. Oslo: NIBIO, 2023. URL: https://www.nibio.no/tema/skog/landsskogtakseringen (accessed March 25, 2026).

Oswalt S.N., *Smith W.B.*, *Miles P.D.*, *Pugh S.A.* Forest Resources of the United States, 2017. Gen. Tech. Rep. WO-97. Washington, DC: USDA Forest Service, 2019, 223 p.

Private Forests in Canada / Canadian Forest Owners Association. URL: https://www.forestowners.ca (accessed March 25, 2026).

Skogsstyrelsen. Swedish Statistical Yearbook of Forestry 2023. Jönköping: Skogsstyrelsen, 2023. URL: https://www.skogsstyrelsen.se/en/statistics/ (accessed March 25, 2026).

SSB (Statistics Norway). Skogavvirkning for salg. Oslo: SSB, 2023. URL: https://www.ssb.no/en/jord-skog-jakt-og-fiskeri/skogbruk/statistikk/skogavvirkning-for-salg (accessed March 25, 2026).

Zalesov S.V., *Magasumova A.G.*, *Opletaev A.S.* Effectiveness of larch stands creation on former agricultural lands. *Ecological Agriculture and Sustainable Development: Research Development Center*, 2019, no. 1, pp. 69–76.

Материал поступил в редакцию 25.02.2026

Добровольский А.А., Валиев И.Н. Частное лесовладение на землях сельскохозяйственного назначения в Российской Федерации: правовые основы и перспективы развития // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2026. Вып. 259. С. 195–214. DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.195-214

В работе представлен анализ правовых механизмов развития частного лесовладения на землях сельскохозяйственного назначения в Российской Федерации, выполнена оценка потенциала вовлечения выбывших из оборота сельхозземель в лесохозяйственный оборот, а также проведено сопоставление возможных направлений реформ с опытом стран бореального пояса (Швеция, Финляндия, Норвегия, Канада, США). Исследование основано на анализе нормативно-правовых актов Российской Федерации, данных Глобальной оценки лесных ресурсов ФАО 2025, государственных докладов Росреестра, а также на обобщении результатов отечественных и зарубежных научных публикаций. Установлено, что правовой режим использования земель сельскохозяйственного назначения для лесоразведения в России остаётся неурегулированным. Коллизия между Лесным и Земельным кодексами, а также последующее изменение подходов к реализации Постановления Правительства РФ № 1509 не привели к созданию полноценного института частного лесовладения. В то же время, по данным Росреестра, на начало 2025 года в частной собственности находится 130,2 млн га земель сельскохозяйственного назначения, из которых, по оценкам исследователей, до 76 млн га заброшены и интенсивно зарастают древесно-кустарниковой растительностью. Потенциально такие земли могут быть использованы для создания высокопродуктивных плантационных насаждений. Правовое урегулирование использования сельхозземель для целей ведения лесного хозяйства способно снять существующие правовые коллизии и стать драйвером развития отечественного лесного комплекса. Для этого необходимо законодательно закрепить лесное хозяйство как самостоятельный вид использования земель сельскохозяйственного назначения, создать механизмы инвентаризации и учёта лесных насаждений на таких землях, а также внедрить долгосрочные инструменты регулирования, включая сокращённые обороты рубки.

Ключевые слова: *частное лесовладение*, *земли сельскохозяйственного назначения*, *плантационное лесовыращивание*, *постагрогенные земли*, *продуктивность древостоев.*

Dobrovolsky A.A., Valiev I.N. Private Forest Ownership on Agricultural Lands in the Russian Federation: Legal Framework and Development Prospects. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2026, iss. 259, pp. 195–214 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.195-214

This article examines the legal mechanisms governing the development of private forest ownership on agricultural lands in the Russian Federation, assesses the potential for integrating abandoned farmland into forestry use, and benchmarks possible reform trajectories against the experience of other boreal countries (Sweden, Finland, Norway, Canada, USA). The study draws on an analysis of Russian federal legislation, data from the FAO Global Forest Resources Assessment (FRA 2025), state land-use reports of Rosreestr, and a synthesis of domestic and international scientific literature. The

findings confirm that the legal framework for afforestation on agricultural lands remains unresolved. The conflict between the Forest Code and the Land Code of the Russian Federation, compounded by subsequent amendments to Government Decree No. 1509, has precluded the emergence of a fully-fledged private forest ownership institution. At the same time, according to Rosreestr data, as of the beginning of 2025, 130.2 million hectares of agricultural land are in private ownership, of which, according to researchers' estimates, up to 76 million hectares are abandoned and are being intensively overgrown with tree and shrub vegetation. Potentially, such lands could be used for the establishment of highly productive plantation stands. The legal regulation of the use of agricultural lands for forestry purposes has the potential to resolve existing legal conflicts and become a driver for the development of the domestic forest complex. To achieve this, it is necessary to legislatively establish forestry as an independent type of land use on agricultural lands, create mechanisms for the inventory and registration of forest stands on such lands, and implement long-term regulatory instruments, including shortened rotation cycles (short rotations).

K e y w o r d s : private forest ownership, agricultural lands, forest plantations, post-agricultural lands, stand productivity.

ДОБРОВОЛЬСКИЙ Александр Александрович – доцент кафедры лесоводства Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доцент, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 7044-0571. ORCID: 0000-0002-6816-4912.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: alexander-83@yandex.ru

DOBROVOLSKY Alexander A. – PhD (Agriculture), Associate Professor of the Department of Silviculture, St.Petersburg State Forest Technical University, Associate Professor. SPIN-код: 7044-0571. ORCID: 0000-0002-6816-4912.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: alexander-83@yandex.ru

ВАЛИЕВ Ильдар Нурисламович – магистрант кафедры лесоводства Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

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

VALIEV Ildar N. – MSc student, Department of Silviculture, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: ivalievn@yandex.ru

2. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ЛЕСОЗАГОТОВОК

УДК 630.375

А.С. Королько, Н.С. Королько, Ф.В. Свойкин, Е.И. Игнатова, К.В. Россихин, Е.В. Денисова, В.Е. Божбов

ИСТОРИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КАНАТНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ РАЗНЫХ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Введение. Транспортировка крупногабаритных и тяжеловесных грузов в условиях сложного рельефа (горная местность, заболоченные территории, зоны с разрушенной инфраструктурой) остаётся одной из ключевых логистических проблем как в промышленности, так и в военной сфере. Несмотря на стремительное развитие технологий, включая беспилотные транспортные средства для перемещения небольших партий грузов, канатные установки сохраняют свою актуальность как высокоэффективное средство для перемещения грузов массой от 200 до 1000 кг на значительные расстояния в условиях, где применение традиционной техники затруднено или нецелесообразно.

Канатные системы представляют собой специализированное грузотранспортное оборудование, отличающееся высокой адаптивностью к особенностям ландшафта и минимальным воздействием на почвенный покров. Исторически их применение получило развитие в нескольких ключевых направлениях: лесозаготовки (трелёвка древесины), военно-инженерное обеспечение, организация переправ, а также пассажирские перевозки в туристических и городских условиях.

В современных условиях освоение труднодоступных лесных массивов, сокращение сезонности лесозаготовок, а также специфика ведения военных действий стимулируют разработку новых поколений канатных установок. Эти системы становятся более мобильными, автономными, компактными и интеллектуальными, интегрируя возможности дистанционного управления, роботизации и адаптации к сложным трассам. Учитывая условия новой экономической реальности, современные тенденции и состояние сектора лесной промышленности проблема развития отечественных канатно-трелевочных

систем является одним из актуальных вопросов [Кацадзе и др., 2025; Свойкин, Кацадзе, 2025; Свойкин, Королько, 2025].

В данной статье проводится историко-технический анализ эволюции канатных установок, рассматривается их современное состояние и многоотраслевое применение. Особое внимание уделяется проблематике транспортировки грузов в труднодоступных условиях, обзору современных научных разработок и перспективных направлений развития канатных систем, включая повышение мобильности, автономности и создание гибких транспортных сетей.

Цель работы. В целях проведения комплексного анализа и определения перспектив развития канатных установок необходимо систематизировать их исторический опыт и современное состояние в различных отраслях промышленности, что позволит выделить ключевые технологические тренды и направления для дальнейших исследований. Для решения данной задачи требуется рассмотреть эволюцию конструкций, оценить их адаптивность к сложным условиям эксплуатации, а также проанализировать научные разработки, направленные на повышение мобильности, автономности и эффективности канатных систем.

Еще одной проблемой, которую необходимо решать, помимо историко-технического обобщения, является оценка потенциала интеграции современных технологий (роботизация, цифровое моделирование, модульные опоры) в конструкции канатных установок. В таком виде эта задача включает анализ возможностей создания гибких транспортных сетей, способных функционировать в труднодоступных и экстремальных условиях. Важным аспектом является выявление общих требований и технологической конвергенции между гражданскими и военными применениями канатных систем.

Методика исследования. Канатные установки (далее КУ), используемые в полевых условиях, являются транспортной системой, широко применяющейся в различных сферах использования. В быту наиболее известны подвесные канатные дороги на горнолыжных склонах, бугельные подъёмники (буксировочные КУ) (рис. 1).

Помимо этого, широкое распространение получили туристические канатные дороги, такие как канатная переправа через Волгу в Нижнем Новгороде (рис. 2) или канатная дорога на Воробьёвых горах (рис. 3).

Исторически самой масштабной по размерам и степени важности применения является военная канатная дорога «MURMAN-SEILBAHN» [Дулич и др., 2008]. Данный объект был построен немецкими войсками на Кольском полуострове в 1941-1942 гг. и предназначался для бесперебойного снабжения линии фронта. Общее расположение трассы отражено на карте, представленной на рис. 4. Общая протяженность магистрали составляла 58,5 км,

что делает её одной из самых длинных полевых канатных дорог, когда-либо построенных в суровых климатических условиях. В конструкции системы, разработанной фирмой «BLEICHERT» (модификация Feldseilbahn Type 150 / 250), был применён единый тягово-несущий трос, организованный по схеме замкнутого кругового движения; привод механизмов осуществлялся от двигателей внутреннего сгорания.

Рис. 1. Бугельный подъемник
Fig. 1. Surface lift

Рис. 2. Переправа через Волгу в Нижнем Новгороде
Fig. 2. Crossing the Volga River in Nizhny Novgorod

Рис. 3. Канатная дорога на Воробьёвых горах в Москве
Fig. 3. Vorobyovy Gory Cable Car in Moscow

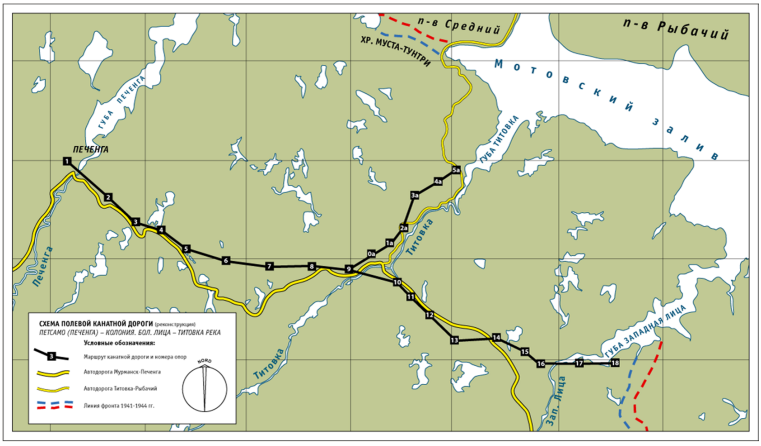


Рис. 4. Карта расположения канатной дороги 1942–1944 гг. на Кольском полуострове

Fig. 4. Map of the location of the cable car on the Kola Peninsula in 1942–1944

Грузоподъёмность платформ составляла от 150 до 250 кг, скорость движения – 8 км/час. Суточный грузооборот военной канатной дороги «MURMAN-SEILBAHN» составлял до 60 000 кг (рис. 5).

Рис. 5. Канатная военная дорога «MURMAN-SEILBAHN»
Fig. 5. Military Cable Car “MURMAN-SEILBAHN”

Пример дифференцированного функционала дороги по логистике персонала и грузов приведен на рис. 6.

Рис. 6. Перемещение бойца вермахта по канатной дороге на Кольском полуострове, 1942–1944 гг.

Fig. 6. Transfer of a Wehrmacht soldier by cable car on the Kola Peninsula, 1942–1944

Существенное значение в ходе боевых действий имела подвесная канатная дорога через Керченский пролив (рис. 7). Общая протяженность этой переправы составляла 5 100 м. По своей сути она являлась восстановленной и усовершенствованной немецкой военной канатной дорогой, адаптированной под нужды советских войск. Конструкция включала 25 опор, установленных на свайном основании; высота надводной части опор составляла 2,5 м. Данная транспортная артерия сыграла ключевую роль в снабжении наступления Красной Армии в начале 1944 г., обеспечивая суточный грузооборот до 300 000 кг. Для сравнения, аналогичные канатные дороги в немецкой армии могли достигать грузооборота до 1 000 000 кг/сутки. Анализ сохранившихся конструктивных элементов позволяет восстановить технические параметры сооружения. На таманском берегу располагалась анкерная станция для крепления несущих канатов, а также натяжное устройство с противовесом, обслуживавшее тяговый канат. На противоположном, керченском берегу находилась натяжная станция несущих канатов и приводная станция тягового каната. По обнаруженным фрагментам удалось установить, что диаметр несущего троса составлял 36 мм. Количество опор, согласно сохранившимся остаткам, достигало 23, а расстояния между ними варьировали в пределах 200–250 м. Важно отметить, что деревянными в этой конструкции были только сами мачты (вертикальные части опор); все остальные узлы – крепления, такелаж, станционные механизмы – были выполнены из металла и бетона, что обеспечивало необходимую надежность и грузоподъемность. [Кондратьев и др., 1968; Бельский, 2018].

Рис. 7. Канатная дорога через Керченский пролив, 1943–1944 гг.
Fig. 7. Cable car across the Kerch Strait, 1943–1944

Помимо Керченской переправы, известны и другие военные канатные дороги периода Великой Отечественной войны. Это Никопольская дорога, проложенная через Днепр, а также трасса на Кавказе в районе Марухского

перевала. Согласно архивным данным, в 1941 г. рассматривался план строительства канатной дороги через Неву, причем переправа проектировалась в две нитки с взаимно-противоположным уклоном: по одной ветке предполагалось движение в прямом направлении, по другой – в обратном. Сам факт наличия таких проектов свидетельствует о том, что канатные установки входили в штатное имущество немецких горных и саперных частей, рассматриваясь как стандартное инженерное средство обеспечения мобильности войск в условиях пересеченной местности.

Принципиально важно отметить, что канатные установки военного и гражданского назначения имеют единую технологическую основу. Для обеих сфер применения общими требованиями выступают способность преодолевать сложный рельеф без прокладки дорогостоящих наземных магистралей и возможность перемещения грузов большой массы. Это подтверждается историческим опытом: еще в 1897–1920 гг. КУ применялись в промышленных целях на рудниках Российской Империи в Питкяранте [Михайлов, 2023]. В лесопромышленном секторе применение канатной трелевки началось в конце XIX века в Европе и США, а затем получило развитие в СССР. Показателен пример компании «Трентон Айрон Компани» (США), которая в 1880 г. построила 500-метровую двухкабельную систему с возвратной кареткой для транспортировки древесины от завода до железнодорожных путей; уже к 1889 г. по данной дороге перемещалось до 50 000 кг древесины за 10-часовую смену при скорости движения 1,4 м/с [Миронова, 2018; Samset, 1985].

Результаты исследования. Развитие канатных установок, в том числе предназначенных для трелевки древесины, в настоящее время идет по пути повышения мобильности, автономности и компактности, что обусловлено объективными изменениями в структуре лесопользования: уменьшением площадей лесосек и их территориальной разбросанностью, а также необходимостью эффективной работы на сложных склонах. Наиболее интенсивно это направление развивалось в 70–80-х гг. XX века в странах Северной Америки, где появились мобильные канатные установки различной конфигурации и принципов работы – от систем, развертываемых классическим способом с использованием базовой машины, оснащенной многобарабанной башенной опорой, до модификаций, монтируемых на базе гусеничных экскаваторов, что позволило существенно расширить технологические возможности лесозаготовительной техники. Одним из характерных вариантов конструктивного исполнения является телескопическая башня, монтируемая на базе прицепа или тягача (рис. 8). Данная система достигает высоты 27–33 м,

что позволяет эффективно использовать ее на крутых склонах и при больших межпролетных расстояниях, однако она обладает существенными недостатками: большой вес и недостаточная мобильность предъявляют повышенные требования к месту установки и условиям эксплуатации, что ограничивает ее применение в условиях рассредоточенных лесосек.

Более совершенным решением является цельнометаллическая опора с регулируемым углом наклона, агрегатируемая с канатно-трелевочной установкой «качельного» типа, представленная на рис. 9. Данная конструкция обеспечивает ускоренный монтаж и предъявляет пониженные требования к месту установки благодаря оптимизированной массе и упрощенной системе анкеровки, что особенно важно при работе на склонах. Технологическая гибкость установки повышается за счет возможности замены чокерного захвата на грейферный, что позволяет механизировать процесс захвата древесины и снизить долю ручного труда.

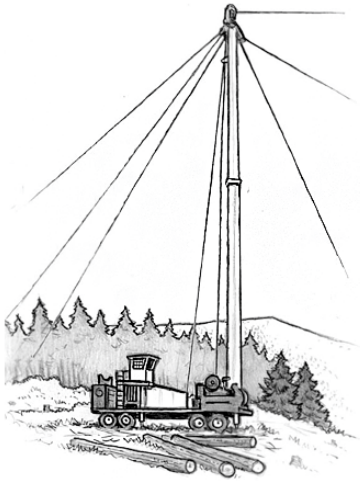


Рис. 8. Конструкция КТУ с телескопической башней на прицепе

Fig. 8. Construction of a rope-skidding installation with a telescopic tower on a trailer

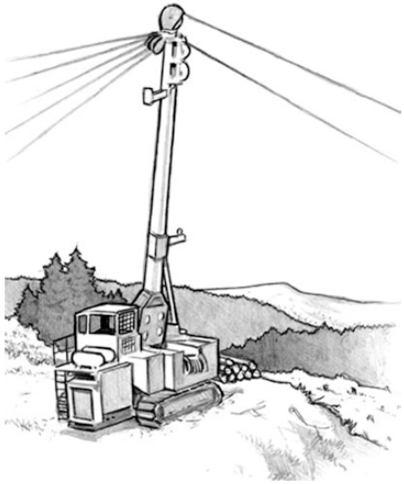


Рис. 9. Конструкция КТУ с цельнометаллической башней качельного типа

Fig. 9. Rope-skidding installation construction with an all-metal tower of a high-quality type

Отдельную категорию составляют установки, работающие по принципу «лассо», которые забрасывают трос с захватом непосредственно

в зону трелевки. Альтернативное решение – использование стрелы экскаватора в качестве несущей опоры (рис. 10, 11). Это обеспечивает высокую проходимость и требует минимума оттяжек. Однако перемещение такой КТУ между лесосеками затруднено, и она имеет все недостатки гибридной техники по сравнению со специализированными аналогами.

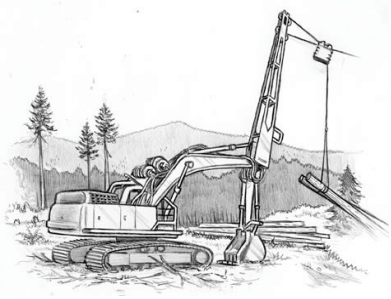


Рис. 10. КТУ на базе экскаватора с чокерным оборудованием

Fig. 10. Rope-skidding installation based on an excavator with choker equipment

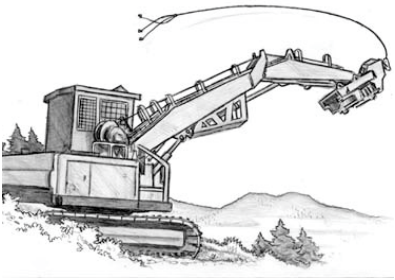


Рис. 11. КТУ на базе экскаватора, работающая по принципу «лассо»

Fig. 11. Rope-skidding installation based on an excavator operating on the principle of "lasso"

В европейских странах наибольшее распространение получили небольшие мобильные КТУ, используемые в качестве навесного оборудования на трактор, оснащенные башней и множеством барабанов у её основания (рис. 12).

Рассмотренные варианты оборудования для канатной трелевки обеспечивают возможность транспортировки древесины как вниз, так и вверх по склону, однако в условиях равнинной местности перечень применимых технических средств существенно сужается. В частности, на равнине становится необходимым использование минимум двух опор, поскольку безопорные и одноопорные канатно-трелевочные установки характеризуются крайне ограниченной рабочей зоной, недостаточной для эффективной организации лесозаготовительного процесса.

Все перечисленные выше системы требуют значительных капиталовложений, так как базируются на применении сложной крупногабаритной техники, эксплуатация которой предполагает максимальную загрузку оборудования, наличие высококвалифицированных рабочих и дорогостоящее сервисное обслуживание. Альтернативным подходом, позволяющим снизить затраты и повысить мобильность, является использование в качестве

несущих мачт растущих деревьев в сочетании с автономными каретками [Fischbacher, Mairhoter, 2007]. Автономность каретки и отсутствие тяжелой башенной опоры существенно упрощают транспортировку установки между лесосеками, позволяют применять меньшее количество тросов и снижают требования к обустройству погрузочной площадки. Пример реализации трелевки с использованием автономной каретки производства таких фирм, как Keller или Konrad, представлен на рис. 13.

Рис. 12. Мобильная КТУ на базе трактора МТЗ 1221.3.

Fig. 12. Mobile rope-skidding installation based on MTZ 1221.3 tractor

Рис. 13. Трелёвка автономной кареткой

Fig. 13. Skidding with an autonomous carriage

При работе на данном типе оборудования перемещение на значительные расстояния требует применение промежуточных опор, позволяющих избежать чрезмерного провисания и повышенного натяжения несущего каната.

Моторизованная (автономная) каретка имеет в своей конструкции дизельный двигатель, приводные ролики и систему торможения, которые позволяют ей при помощи дистанционного управления передвигаться вдоль несущего каната. При трелевке на склонах с большим уклоном данная система оснащается возвратным канатом. Автономность каретки в условиях небольших уклонов позволит ограничиться натяжением только несущего каната, что существенно упростит монтаж и сократит время не перестановку линии, следовательно, повысит эффективность применения КТУ на лесосеках небольшой площади и запаса.

В Российской Федерации исследованиями в области канатной трелёвки занимаются Российский университет транспорта (г. Москва) и Брянский государственный университет им. академика И.Г. Петровского, особое внимание уделяя пассажирским канатным дорогам. [Короткий и др., 2014; Лагерев, Лагерев, 2023].

В Санкт-Петербургском лесотехническом университете ведутся разработки канатной установки для трелёвки древесины с поворотами трассы, а также исследования по автоматизации построения сложных маршрутов канатных дорог вокруг препятствий.

Заключение. Канатные установки для гражданского и военного применения имеют общую технологическую основу. Общими требованиями являются возможность преодоления сложного рельефа и перемещение грузов большой массы.

Существует несколько направлений развития канатных установок. Стационарные канатные установки получили широкое распространение в сфере туризма и развлечений. При этом эксплуатация пассажирских канатных установок регламентируется ГОСТом (ГОСТ Р 71888-2025), для грузовых КУ таких ограничений не предусмотрено.

Существующие технологии пассажирских канатных дорог эффективно выполняют возложенные на них функции. Их развитие может идти по пути повышения комфорта пассажиров.

Использование стационарных грузовых канатных установок остаётся эффективным средством транспорта, в том числе для горнодобывающей промышленности. Одна из грузовых подвесных канатных дорог находится в Башкортостане (рис. 14) [Земсков и др., 2019].

Элементы канатных установок в наименьшей степени из конкурирующих видов оборудования подвержены негативному влиянию отрицательных температур. Грузовые подвесные канатные дороги успешно эксплуатируются во всем мире, как в южных широтах, так и на севере, в том числе за полярным кругом, например, на острове Шпицберген. В Норвегии за полярным кругом построена канатная дорога «Скороват» длиной 44 500 м для транспортирования пирита. Канатная дорога «Кристанберг Болиден» (Швеция) длиной 96 000 м служит для транспортирования рудного концентрата. В Чили на высоте 5 900 м над уровнем моря с помощью ГПКД перевозят сырую серу. В качестве примера можно также привести канатную дорогу, построенную в Индии (штат Бихар). Общая длина дороги – 53 500 м. Она состоит из восьми секций. Производительность – 400 000 кг/ч. Эксплуатационная долговечность ГПКД исчисляется 30 годами и более [Земсков,

Бехер, 2019]. Одним из последних предложений является представленный в конце 2025 г. в Благовещенске инвестпроект «Канатный Экспресс» корпорации «Сюань Юань», который предполагает строительство трансграничной низковысотной дороги для перевозки угля из России в Китай.

Рис. 14. Грузовая подвесная канатная дорога
по транспортировке известняка (Башкортостан)

Fig. 14. Cargo suspension cable car for transportation
of limestone (Bashkortostan)

Однако новые задачи, стоящие перед грузовыми канатными системами, требуют существенного развития их мобильности, скорости развертывания и универсальности. Также тенденциями развития являются роботизация и автономизация, основанная на дистанционном управлении. Для повышения мобильности интересным представляется развитие различных типов опор, в том числе модульных и надувных. [Абузов, Абузова, 2014a, b]. В направлении роботизации и беспилотного управления перспективными являются исследования построения трасс канатных установок с использованием математических методов, цифровых двойников [Лагерев, Лагерев, 2022; Свойкин и др., 2024; Королько и др., 2024, 2025a; Svojkin et al., 2024].

Развитие мобильности и увеличение скорости развертывания систем может быть достигнуто применением автономных кареток, позволяющих упростить канатную оснастку [Свойкин и др., 2022; Королько, Королько, 2025; Королько и др., 2025b], и созданием модульной конструкции опор [Лагерев, 2024].

Исследования, направленные на создание канатных установок, позволяющих осуществлять повороты трассы без перегрузки, позволят перевести канатную дорогу из разряда простого «линейного конвейера» в категорию гибкой «транспортной сети» [Нефедов и др., 2025]. Вариативность схем канатных трасс резко увеличивает охват территории, адаптивность системы и её общую эффективность, что приведёт к исследованиям по роботизации, маршрутизации, особенно для систем двойного назначения [Свойкин и др., 2021].

В морском деле канатные установки используются для передачи грузов на необорудованный берег и между кораблями в море [Топоров и др., 2019; Мизгирев и др., 2023].

Известен траверсный способ передавать грузы между судами с помощью канатных установок, в том числе в условиях волнения и на ходу (рис. 15). Все крупные танкеры снабжения ВМС США, которые построены и модернизированы за последние 10 лет, оснащены канатной системой «Фаст», предназначенной для передачи твердых грузов на ходу в море. Все лебедки снабжены регулирующими устройствами для поддержания постоянного натяжения и провиса тросов независимо от движения кораблей. Приводы главной и вспомогательной лебедок снабжены электронными регуляторами крутящего момента, которые предохраняют тросовую оснастку от разрывных напряжений. Состояние систем передачи грузов между кораблями в открытом море актуализирует научную задачу разработки системы, обеспечивающей прием-передачу грузов на ходу бесконтактным способом при повышенном волнении [Суслов, 2005; Баринов и др., 2016; Кипер и др., 2021; Мизгирев и др., 2024].

Рис. 15. Передача грузов траверсным способом
Fig. 15. Cargo transfer by traverse method

Интенсификация технологического прорыва использования канатных установок возможна в исследованиях их применения при решении военно-инженерных задач, в том числе для морского базирования в арктической зоне [Топоров и др., 2019; Марченко и др., 2022; Мизгирев и др., 2023].

Таким образом, в ряде случаев применение канатных установок является безальтернативным средством по осуществлению логистических перемести-тельных операций для разных отраслей промышленности. Несмотря на непрерывный научно-технический прогресс и поиск альтернативных источников осуществления логистических операций в тяжелых природно-производствен-ных условиях, сфера применения канатных установок расширяется.

Канатные установки являются актуальными средствами транспортиро-вания грузов в сложных природно-производственных условиях. Технологи-ческое развитие канатных установок в лесной и военной сферах демонстри-рует явную конвергенцию. Ключевыми драйверами являются требования мобильности, минимального воздействия на среду и сокращения человече-ского участия. Развитие канатных установок идёт по пути мобильности, ав-тономности и компактности.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Абузов А.В., *Абузова К.Р.* Патент № 2531649 Российская Федерация, МПК7 B63B 35/00, B63B 27/30, B61B 7/06. Способ транспортировки древесины с использованием надувных плавающих опор. № 2013121242/11. Заявл. 07.05.13., опубл. 27.10.14a, бюлл. №30.

Абузов А.В., *Абузова К.Р.* Патент № 2531778 Российская Федерация, МПК7 E04G 11/04, B63B 35/71, E04H 15/20. Надувная плавающая опора для удержания несущего каната. № 2013121199/11. Заявл. 07.05.13, опубл. 27.10.14b, бюлл. №30.

Баринов А.Ю., *Графов Е.Ю.*, *Сагдетдинов Д.Р.*, *Гульцов Е.И.* Патент № 2584047 C1 Российская Федерация, МПК B63B 27/30, B66D 1/26. Способ и система траверзной передачи сухих и жидких грузов между судами на ходу. № 2015114140/11. Заявл. 16.04.2015, опубл. 20.05.2016.

Бельский А.В. Подвесная канатная дорога 17-й немецкой армии над Керченским проливом (1943) // Военно-исторические чтения: мат. VI Всерос. науч.-практ. конф. Симферополь, 2018. С. 14-19.

Дулич Д.В. Канатная дорога на Мурмане, 1942-1944: мифы и реальность. Мурманск: Добросмысл, Доброхот, 2008. 94 с.

Земсков А.Н., *Бехер А.В.* Перспективы применения грузовых подвесных канатных дорог для условий Севера // ИВУЗ. Горный журнал. 2019. №8. С. 5-13. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-8-5-13.

Земсков А.Н., *Оверин А.А.*, *Бехер А.В.* Вторая жизнь грузовых подвесных канатных дорог в горнодобывающей промышленности России и Средней Азии // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. №3. С. 175-183. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-03-0-175-183.

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.

Кипер А.В., *Рыжов Г.А.*, *Давлюд И.И.* Проблема передачи боеприпасов между кораблями в открытом море на ходу траверзным способом // Научные исследования: итоги и перспективы. 2021. Т. 2, №3. С. 42-51.

Кондратьев З.И. Дороги войны. М.: Воениздат, 1968. 360 с.

Королько Н.С., *Королько А.С.* Результаты экспериментальных исследований макета канатной установки с поворотом трассы // Исследования молодежи – экономике, производству, образованию: сб. мат. XVI Всерос. молодеж. науч.-практ. конф. Сыктывкар, 2025. С. 8-11.

Королько Н.С., *Королько А.С.*, *Шейко А.В.*, *Свойкин Ф.В.*, *Россихин К.В.* Построение трассы канатной дороги математически программными методами // Сб. ст. по мат. науч.-техн. конф. Института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2023 г. СПб., 2024. С. 77–86.

Королько Н.С., *Свойкин Ф.В.*, *Рего Г.Э.*, *Королько А.С.*, *Россихин К.В.*, *Кретинин В.И.* Оптимальная схема разработки лесосеки канатной трелёвочной установкой // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025a. Вып. 252. С. 317-334. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.317-334.

Королько Н.С., *Королько А.С.*, *Россихин К.В.* Эффективность освоения лесосек кареткой новой конструкции // Повышение эффективности лесного комплекса: мат. Десятой Всерос. нац. науч.-практ. конф. Петрозаводск, 2025b. С. 81-86.

Короткий А.А., *Лагерев А.В.*, *Месхи Б.Ч.*, *Приходько В.М.*, *Кустарев Г.В.*, *Маслов В.Б.*, *Короткий Д.А.*, *Кирсанов М.В.*, *Панфилов А.В.*, *Лагерев И.А.* Патент № 2506182 C1 Российская Федерация, МПК B61B 7/00. Транспортная система ("Канатное метро"). № 2012121358/11. Заявл. 23.05.2012, опубл. 10.02.2014.

Лагерев А.В. Патент № 2818434 C1 Российская Федерация, МПК B61B 7/00. Модульная мобильная канатная дорога. № 2023131421. Заявл. 28.11.2023, опубл. 02.05.2024.

Лагерев А.В., *Лагерев И.А.* Общий подход к созданию цифровых двойников мобильных канатных дорог на основе мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2022. №1. С. 38-60. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-01-38-60.

Лагерев А.В., *Лагерев И.А.* Мобильные канатные дороги на базе аэромобильных канатных установок. Брянск: Брянский государственный университет им. академика И.Г. Петровского, 2023. 201 с.

Марченко Ю.В., *Попов С.И.*, *Кобцева Ю.И.* Система транспортирования отходов с применением грузового канатного транспорта в условиях Арктики и

континентального шельфа // Молодой исследователь Дона. 2022. №3 (36). С. 53-57.

Мизгирев Д.С., *Власов В.Н.*, *Тутынин Т.Д.* Механизмы передачи грузов судами транспортного и промыслового флота без использования существующих причальных сооружений // Морские технологии: проблемы и решения-2023: сб. тр. по мат. науч.-практ. конф. преподавателей, аспирантов и сотрудников КГМТУ. Керчь, 2023. С. 73-78.

Мизгирев Д.С., *Власов В.Н.*, *Тутынин Т.Д.* Анализ способов технических средств, применяемых для передачи грузов между судами // Актуальные решения проблем водного транспорта: сб. мат. III межд. науч.-практ. конф. Астрахань, 2024. С. 49-54.

Миронова Б.А. История развития и роль транспорта на канатной тяге в городах США // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния: мат. XXIV межд. (XXVII Екатеринбургской, II Минской) науч.-практ. конф. Минск, 2018. С. 142-152.

Михайлов Е.Г. Грузовая подвесная канатная дорога в Питкярантских рудниках в 1897–1920-е гг. // Страницы Выборгской истории. Выборг, 2023. Кн. 7. С. 217-231.

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 // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Физико-математические науки. 2025. Т. 29, №1. С. 129-157. DOI: 10.14498/vsgtu2131.

Свойкин Ф.В., *Кацадзе В.А.* Актуальные отечественные лесные машины в РФ // Повышение эффективности лесного комплекса: мат. Десятой Всерос. нац. науч.-практ. конф. Петрозаводск, 2025. С. 139-140.

Свойкин Ф.В., *Королько Н.С.* Производители лесозаготовительной техники в Российской Федерации // Февральские чтения: сб. мат. науч.-практ. конф. по итогам научно-исследовательской работы 2024 г. преподавателей Сыктывкарского лесного института. Сыктывкар, 2025. С. 217-220.

Свойкин В.Ф., *Свойкин Ф.В.*, *Кацадзе В.А.*, *Королько Н.С.*, *Королько А.С.*, *Бирман А.Р.*, *Мехренцев А.В.* Патент на полезную модель № 207117 U1 Российская Федерация, МПК B61B 7/00. Каретка канатной трелевочной установки. № 2021112780. Заявл. 30.04.2021, опубл. 13.10.2021, бюлл. №29.

Свойкин Ф.В., *Королько Н.С.*, *Свойкин В.Ф.*, *Угрюмов С.А.*, *Кретинин В.И.*, *Тарабан М.В.* Усовершенствования канатной трелевочной установки путем модернизации каретки // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2022. №8. С. 3-8.

Свойкин Ф.В., *Королько Н.С.*, *Угрюмов С.А.*, *Россихин К.В.* Построение трассы канатной дороги математически-программными методами // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 250. С. 252-272.

Суслов В. Ф. Разработка и оптимизация судового машиностроительного оборудования: автореф. дис. … д-ра техн. наук. СПб., 2005. 49 с.

Топоров А.В., *Кравец Д.Ю.*, *Кравец Ю.Д.* Способ передачи грузов во внепортовых условиях по канатной дороге // Вопросы оборонной техники. Сер. 16:

Технические средства противодействия терроризму. 2019. №11-12 (137-138). С. 121–124.

Fischbacher M., *Mairhoter M.* New skyline logging technology for yarding and tree processing with a two person crew // Proc. of the international mountain logging and 13th Pacific NordWest skyline symposium. Corvallis, OR, 2007. P. 26-31.

Samset I. Winch and cable systems. Dordrecht: Springer, 1985. 534 p.

Svojkin F.V., *Korolko N.S.*, *Korolko A.S.*, *Borozna A.A.*, *Sorokin K.E.* Construction of a cable yarding track by mathematical and software methods // E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 515. Art. no. 01013. DOI: 10.1051/e3sconf/202451501013.

References

Abuzov A.V., *Abuzova K.R.* Patent 2531649 Russian Federation, IPC7 B63B 35/00, B63B 27/30, B61B 7/06. Method of transporting timber using inflatable floating supports. No. 2013121242/11. Appl. 05/07/13., publ. 10/27/14a, bull, no. 30. (In Russ.)

Abuzov A.V., *Abuzova K.R.* Patent 2531778 Russian Federation, IPC7 E04G 11/04, B63B 35/71, E04H 15/20. Inflatable floating support for holding a load-bearing rope: No. 2013121199/11. Appl. 05/07/13: publ. 10/27/14b, bull, no. 30. (In Russ.)

Barinov A.Yu., *Grafov E.Yu.*, *Sagdetdinov D.R.*, *Gultsov E.I.* Patent No. 2584047 C1 Russian Federation, IPC B63B 27/30, B66D 1/26. Method and system for traverse transfer of dry and liquid cargoes between ships underway. No. 2015114140/11. Appl. 04/16/2015, publ. 05/20/2016. (In Russ.)

Belsky A.V. The suspended cable car of the 17th German Army over the Kerch Strait (1943). *Military historical readings*: proc. of the VI All-Russ. sci.-pract. conf. Simferopol, 2018, pp. 14–19. (In Russ.)

Dulich D.V. The cable car on Murmansk, 1942–1944: myths and reality. Murmansk: Dobromysl, Dobrokhot, 2008. 94 p. (In Russ.)

Fischbacher M., *Mairhoter M.* New skyline logging technology for yarding and tree processing with a two person crew. *Proc. of the international mountain logging and 13th Pacific NordWest skyline symposium*. Corvallis, OR, 2007, pp. 26-31.

Katsadze V.A., Svoikin F.V., *Svoikin V.F.*, *Vokhmyanin N.A.*, *Taraban M.V.*, *Stepanishcheva M.V.* Review of domestic logging equipment manufacturers in the Russian Federation. *Systems. Methods. Technologies*. 2025, no. 3 (67), pp. 139–147. (In Russ.)

Kiper A.V., *Ryzhov G.A.*, *Davlyud I.I.* The problem of transferring ammunition between ships in the open sea on the move by a traverse method. *Scientific research: results and prospects*, 2021, vol. 2, no. 3, pp. 42-51. (In Russ.)

Kondratiev Z. I. Roads of war. Moscow: Voenizdat, 1968. 360 p. (In Russ.)

Korolko N.S., *Korolko A.S.* The results of experimental studies of the model of a rope installation with a turn of the route. Youth Research – economics, production, education: collection of mat. of the XVI All-Russ. youth sci.-pract. conf. Syktyvkar, 2025, pp. 8-11. (In Russ.)

Korolko N.S., *Korolko A.S.*, *Sheiko A.V.*, *Svoikin F.V.*, *Rossikhin K.V.* Construction of a cableway route by mathematical and software methods. *Collection of articles based on the*

mat. of the sci.-tech. conf. of the Institute of Technological Machines and Forest Transport on the results of research work in 2023. St. Petersburg, 2024, pp. 77–86. (In Russ.)

Korolko N.S., *Svoykin F.V.*, *Rego G.E.*, *Korolko A.S.*, *Rossikhin K.V.*, *Kretinin V.I.* The optimal scheme for the development of a cutting area with a rope skidding system. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025a, iss. 252, pp. 317–334. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.317-334. (In Russ.)

Korolko N.S., *Korolko A.S.*, *Rossikhin K.V.* Efficiency of cutting areas development with a carriage of a new design. *Improving the efficiency of the forest complex*: mat. of the Tenth All-Russ. nat. sci.-pract. conf. Petrozavodsk, 2025b, pp. 81–86. EDN OBDZCR. (In Russ.)

Korotky A.A., *Lagerev A.V.*, *Meskhi B.C.*, *Prikhodko V.M.*, *Kustarev G.V.*, *Maslov V.B.*, *Korotky D.A.*, *Kirsanov M.V.*, *Panfilov A.V.*, *Lagerev I.A.* Patent No. 2506182 C1 Russian Federation, IPC B61B 7/00. Transport system ("Cable metro"). No. 2012121358/11. Appl. 05/23/2012, publ. 02/10/2014. (In Russ.)

Lagerev A.V. Patent No. 2818434 C1 Russian Federation, IPC B61B 7/00. Modular mobile cable car: No. 2023131421. Appl. 11/28/2023, publ. 05/02/2024. (In Russ.)

Lagerev A.V., *Lagerev I.A.* A general approach to creating digital twins of mobile cableways based on mobile transport and reloading rope complexes. *Scientific and Technical Bulletin of Bryansk State University*, 2022, no. 1, pp. 38-60. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-01-38-60. (In Russ.)

Lagerev A.V., *Lagerev I.A.* Mobile cable cars based on airmobile rope installations. Bryansk: Bryansk State University named after academician I.G. Petrovsky, 2023. 201 p. (In Russ.)

Marchenko Yu.V., *Popov S.I.*, *Kobtseva Yu.I.* Waste transportation system using cargo rope transport in the Arctic and continental shelf conditions. *Young researcher of the Don*, 2022, no. 3 (36), pp. 53-57. (In Russ.)

Mikhailov E G. Freight aerial ropeway in the Pitkyaranta mines in 1897–1920. Pages of Vyborg history. Vyborg, 2023, book 7, pp. 217-231. (In Russ.)

Mironova B.A. The history of development and the role of cable-drawn transport in US cities. *Socio-economic problems of development and functioning of transport systems of cities and their zones of influence*: proc. of the XXIV int. (XXVII Yekaterinburg, II Minsk) sci.-pract. conf. Minsk, 2018, pp. 142-152. (In Russ.)

Mizgirev D.S., *Vlasov V.N.*, *Tutynin T.D.* Mechanisms of cargo transfer by ships of the transport and fishing fleet without using existing port facilities. *Marine technologies: problems and solutions-2023*: proc. based on the mat. of sci.-pract. conf. of teachers, graduate students and staff of KSMU. Kerch, 2023, pp. 73–78. (In Russ.)

Mizgirev D.S., *Vlasov V.N.*, *Tutynin T.D.* Analysis of methods and technical means used for cargo transfer between ships. *Current solutions to problems of water transport*: proc. of the III int. sci.-pract. conf. Astrakhan, 2024, pp. 49–54. (In Russ.)

Nefedov V.N., *Svoikin F.V.*, *Garibyan B.A.*, *Ryapukhin A.V.*, *Korolko N.S.* Methods for approximating two-dimensional sets by finite sets and their application to some geometric optimization problems. *Bulletin of the Samara State Technical University. Ser.: Physical and Mathematical Sciences*, 2025, vol. 29, no. 1, pp. 129–157. DOI: 10.14498/vsgtu2131. (In Russ.)

Samset I. Winch and cable systems. Dordrecht: Springer, 1985. 534 p.

Suslov V.F. Development and optimization of marine engineering equipment: author's abstract. Diss. … Dr. Tech. Sci. St. Petersburg, 2005. 49 p. (In Russ.)

Svoikin F.V., *Katsadze V.A.* Current domestic forest machines in the Russian Federation. *Improving the efficiency of the forest complex*: mat. of the Tenth All-Russ. nat. sci.-pract. conf. Petrozavodsk, 2025, pp. 139-140. (In Russ.)

Svoikin F.V., *Korolko N.S.* Manufacturers of logging equipment in the Russian Federation. *February readings*: collection of mat. of the sci.-pract. conf. on the results of research work in 2024 of the teachers of the Syktyvkar Forest Institute. Syktyvkar, 2025, pp. 217-220. (In Russ.)

Svoikin V.F., *Svoikin F.V.*, *Katsadze V.A.*, *Korolko N.S.*, *Korolko A.S.*, *Birman A.R.*, *Mekhrentsev A.V.* Utility Model Patent No. 207117 U1 Russian Federation, IPC B61B 7/00. Carriage for a rope skidding system. No. 2021112780. Appl. 04/30/2021, publ. 10/13/2021, bull, no. 29. (In Russ.)

Svoikin F.V., *Korolko N.S.*, *Svoikin V.F.*, *Ugryumov S.A.*, *Kretinin V.I.*, *Taraban M.V.* Improvements of the rope skidding system by upgrading the carriage. *Repair. Reconstruction. Modernization*, 2022, no. 8, pp. 3-8. (In Russ.)

Svoikin F.V., *Korolko N.S.*, *Ugryumov S.A.*, *Rossikhin K.V.* Construction of a cableway route by mathematical and software methods. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2024, iss. 250, pp. 252-272. (In Russ.)

Svojkin F.V., *Korolko N.S.*, *Korolko A.S.*, *Borozna A.A.*, *Sorokin K.E.* Construction of a cable yarding track by mathematical and software methods. *E3S Web of Conferences*, 2024, vol. 515, art. no. 01013. DOI: 10.1051/e3sconf/202451501013.

Toporov A.V., *Kravets D.Yu.*, *Kravets Yu.D.* Method of cargo transfer in off-port conditions by cable car. *Issues of defense technology. Ser. 16: Technical means of countering terrorism*, 2019, no. 11-12 (137-138), pp. 121-124. (In Russ.)

Zemskov A.N., *Becher A.V.* Prospects for the use of cargo suspension cable cars for the conditions of the North. *BHEI. Mining Journal*, 2019, no. 8, pp. 5-13. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-8-5-13. (In Russ.)

Zemskov A.N., *Overin A.A.*, *Becher A.V.* The second life of cargo suspended cable cars in the mining industry of Russia and Central Asia. *Mining Information and Analytical Bulletin* (sci.-tech. journal), 2019, no. 3, pp. 175-183. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-03-0-175-183. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 04.03.2026

Королько А.С., Королько Н.С., Свойкин Ф.В., Игнатова Е.И., Россихин К.В., Денисова Е.В., Божбов В.Е. Исторические аспекты и современное состояние канатных установок для разных отраслей промышленности // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2026. Вып. 259. С. 215–236. DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.215-236

Канатные установки используются давно и имеют принадлежность не только к лесозаготовкам. В мире и в России имеется богатый опыт применения канатных установок. Несомненным преимуществом КТУ является лояльность к рельефу местности и почвенно-грунтовым условиям. Развитие техники позволяет использовать канатные установки на другом технологическом уровне, в том числе при трелёвке древесины на труднодоступных лесосеках, при строительстве и эксплуатации линейных объектов. В статье отражена проблематика транспортирования грузов в труднодоступных условиях с помощью канатных установок. Проведен историко-технический анализ и обзор современных научных разработок. Выявлены общие технологические тренды, оценены перспективные направления развития и использования канатных систем.

Ключевые слова : канатные установки, шарнирно-сочленённая каретка, трелевка леса, военно-инженерное обеспечение, канатные переправы.

Korolko A.S., Korolko N.S., Svoikin F.V., Ignatova E.I., Rossikhin K.V., Denisova E.V., Bozhbov V.E. Historical aspects and current state of rope systems for various industries. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2026, iss. 259, pp. 215–236 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.215-236

Rope installations have been used for a long time and belong not only to logging. There is a wealth of experience in the use of rope installations in the world and in Russia. The undoubted advantage of KTU is its loyalty to the terrain and soil conditions. The development of technology makes it possible to use rope installations at a different technological level, including when skidding wood in hard-to-reach cutting areas. During the construction and operation of linear objects. The article reflects the problems of transporting goods in inaccessible conditions using rope installations. The historical and technical analysis and review of modern scientific developments are carried out. General technological trends have been identified, promising directions for the development and use of rope systems have been assessed.

Keywords: rope installations, articulated carriage, timber skidding, military engineering support, rope crossings.

КОРОЛЬКО Александр Сергеевич – аспирант Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: korolko2008@mail.ru

KOROLKO Aleksandr S. – PhD student, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: korolko2008@mail.ru

КОРОЛЬКО Николай Сергеевич – и.о. главного лесничего СПБ ГКУ «Курортный лесопарк», кандидат технических наук.

195197, Лабораторная ул., д. 15, корп. 2Б, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: kns89lta@mail.ru

KOROLKO Nikolay S. – PhD (Technical), Acting Chief Forester of the St. Petersburg State Institution “Kurortny Forest Park”.

195197. Laboratornaya str. 15, build. 2B. St. Petersburg. Russia. E-mail: kns89lta@mail.ru

СВОЙКИН Федор Владимирович – доцент кафедры компьютерной графики и геометрического моделирования 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

SVOIKIN Fedor V. – PhD (Technical), Associate Professor, Department of Computer Graphics and Geometric Modeling, 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

ИГНАТОВА Елена Ивановна – заведующий кафедрой компьютерной графики и геометрического моделирования Санкт-Петербургского государственного морского технического университета, кандидат технических наук, доцент. SPIN-код: 4064-8597. ORCID: 0000-0003-3121-037X .

190121, ул. Лоцманская, д. 3, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: ivanovaei@mail.ru

IGNATOVA Elena I. – PhD (Technical), Head of the Department of Computer Graphics and Geometric Modeling, St. Petersburg State Marine Technical University, Associate Professor. SPIN-code: 4064-8597. ORCID: 0000-0003-3121-037X .

190121. Lotsmanskaya str. 3. St. Petersburg, Russia. E-mail: ivanovaei@mail.ru

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

ДЕНИСОВА Елена Васильевна – заведующий кафедрой начертательной геометрии и инженерной графики Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университет университета, кандидат технических наук, доцент. SPIN-код: 3913-0954. ORCID: 0000-0001-5058-1200.

190005, 2-я Красноармейская ул., д. 4, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: deni_sovaev@mail.ru

DENISOVA Elena V. – PhD (Technical), Head of the Department of Descriptive Geometry and Engineering Graphics, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Associate Professor. SPIN-code: 3913-0954. ORCID: 0000-0001-5058-1200.

190005. 2nd Krasnoarmeyskaya str. 4. St. Petersburg. Russia. E-mail: deni_sovaev@mail.ru

БОЖБОВ Владимир Евгеньевич – доцент кафедры геодезии, землеустройства и кадастров Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук, доцент. SPIN-код: 1820-4686. ORCID: 0000-0003-0881-2911.

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

BOZHBOV Vladimir E. – PhD (Technical), Associate Professor, Department of Geodesy, Land Management and Cadastre, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 1820-4686. ORCID: 0000-0003-0881-2911.

194021. Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: v-b@mail.ru

УДК 630.320.06

О.Н. Галактионов, Р.А. Шадрин, И.С. Алешин

О ВЛИЯНИИ НАСЫЩЕННОСТИ ЛЕСОСЕКИ ОБЪЕКТАМИ БИОРАЗНООБРАЗИЯ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Введение. Производительность лесных машин – это наиболее важный показатель их работы, определяющийся количеством работы, выполняемой машиной или механизмом в единицу времени. В лесозаготовительной промышленности показатель производительности измеряется в кубометрах в час или в кубометрах в смену ($м^3$/ч, $м^3$/см.).

Существует производительность машины, механизма и поточной линии (технологического потока). Производительность подъемно-транспортных машин и механизмов измеряется объемом (массой) деревьев, хлыстов или сортиментов, перемещаемых за единицу времени.

Производительность лесозаготовительной техники определяется большим числом факторов, которые можно сгруппировать следующим образом:

- лесорастительные и природные (средний объем хлыста, ликвидный запас леса на 1 га, породный состав насаждений, бонитет, тип леса, тип условий местопроизрастания и др.);
- назначение и конструктивные особенности машины (число и характер выполняемых операций), способ выполнения операций, надежность машины и ее технологического оборудования и др.;
- технологические (размер и конфигурация лесосек, способ формирования пачек деревьев, среднее расстояние трелевки, совершенство схем разработки лесосек и др.);
- технологические параметры машин (мощность двигателя, скорость, ширина захвата, грузоподъемность, маневренность и др.);
- совершенство технологической и производственной эксплуатации машины (квалификация оператора, совершенство технологического оборудования, техническое состояние машины и др.).

Существует целый ряд научных исследований, посвящённых производительности лесных машин [Мехренцев и др., 2007; Белодедова, Сидорова, 2012; Герасимов и др., 2012; Герц и др., 2012; Дербин, Дербин, 2015; Коломинова, 2015; Андронов, Пегов, 2018; Безгина и др., 2018; Хитров и др.,

2020; Савиных, 2021; Свойкин и др., 2021; Ширнин и др., 2022; Соколов и др., 2023; Дудко и др., 2024; Кузнецов, Гайда, 2024; Сергеева и др., 2024; Лопатин и др., 2025; Лукашевич и др., 2025], однако в них не уделяется внимания влиянию насыщенности лесосеки объектами биоразнообразия на производительность лесозаготовительной техники.

Цель и задачи исследования. Целью настоящего научного исследования служит анализ влияния насыщенности лесосеки объектами биоразнообразия на производительность лесозаготовительной техники в условиях лесничеств Северо-Запада Российской Федерации для определения его количественных характеристик.

Задачи исследования:

- проанализировать современную нормативно-методическую основу сохранения биоразнообразия при производстве лесосечных работ;
- проанализировать практику сохранения биоразнообразия при производстве лесосечных работ в условиях лесничеств Северо-Запада Российской Федерации;
- на основании этого анализа сформулировать предложения по определению количественных характеристик влияния насыщенности лесосеки объектами биоразнообразия на производительность лесозаготовительной техники в условиях лесничеств Северо-Запада Российской Федерации.

Материалы и методика исследования. Методической основой настоящего научного исследования послужили Приказ Минприроды России от 17.01.2022 №23 «Об утверждении видов лесосечных работ, порядка и последовательности их выполнения, формы технологической карты лесосечных работ, формы акта заключительного осмотра лесосеки и порядка заключительного осмотра лесосеки», а также основы теории производительности машин и механизмов [Виногоров, 1984; Технология…, 2012; Шегельман и др., 2015].

В настоящем научном исследовании также были использованы следующие нормативно-методические документы:

1. Лесной кодекс Российской Федерации (от 04.12.2006 №200-ФЗ);

2. Приказ Минприроды России №993 от 01.12.2020 «Об утверждении Правил заготовки древесины и особенностей заготовки древесины в лесничествах, указанных в статье 23 Лесного кодекса Российской Федерации»;

3. Приказ Минприроды России №534 от 30.07.2020 «Об утверждении Правил ухода за лесами»;

4. Приказ Минприроды России от 16.11.2021 №864 «Об утверждении Состава проекта освоения лесов, порядка его разработки и внесения в него изменений, требований к формату проекта освоения лесов в форме электронного документа»;

5. Приказ Минприроды России от 27.02.2017 №72 «Об утверждении состава лесохозяйственных регламентов, порядка их разработки, сроков их действия и порядка внесения в них изменений»;

6. Постановление Правительства РФ от 31.05.2025 №813 «Об утверждении требований к предотвращению гибели объектов животного мира при осуществлении производственных процессов, а также при эксплуатации транспортных магистралей, трубопроводов и линий связи и электропередачи».

В состав материалов настоящего научного исследования также входят технологические карты лесосечных работ, разработанные инженерами лесозаготовительных предприятий, ведущих лесозаготовки в условиях лесничеств Северо-Запада Российской Федерации.

Результаты исследования. Анализ современных нормативно-методических основ сохранения биоразнообразия при производстве лесосечных работ был начат с Приказа Минприроды России от 27.02.2017 №72 «Об утверждении состава лесохозяйственных регламентов, порядка их разработки, сроков их действия и порядка внесения в них изменений», п. 6 которого определяет, что гл. 1 лесохозяйственного регламента должна содержать, среди прочего, характеристику имеющихся и проектируемых особо охраняемых природных территорий и объектов, планов по их организации, развитию экологических сетей, сохранению биоразнообразия.

В свою очередь, Приказ Минприроды России от 16.11.2021 №864 «Об утверждении Состава проекта освоения лесов, порядка его разработки и внесения в него изменений, требований к формату проекта освоения лесов в форме электронного документа» содержит требование, чтобы раздел «Сведения о лесном участке» общей части проекта освоения лесов включал в себя в том числе:

- характеристику имеющихся в границах лесного участка (земельного участка из земель сельскохозяйственного назначения) особо охраняемых природных территорий и объектов (границы и режим особой охраны), мероприятия по сохранению объектов биоразнообразия;
- сведения о наличии мест обитания редких и находящихся под угрозой исчезновения видов животных и мест произрастания редких и находящихся под угрозой исчезновения видов деревьев, кустарников, лиан и иных лесных растений.

Для анализа практики сохранения биоразнообразия при производстве лесосечных работ в условиях лесничеств Северо-Запада Российской Федерации в качестве примера авторы обратились к Лесохозяйственному регламенту Приозерного лесничества Архангельской области, утвержденному Постановлением Министерства природных ресурсов и лесопромышленного комплекса Архангельской области от 19 ноября 2018 г. №41п.

Этот регламент разработан с учётом требований, содержащихся в Распоряжении Министерства природных ресурсов и лесопромышленного комплекса Архангельской области от 16 августа 2017 г. №1336р, которым утверждены «Методические рекомендации по сохранению биологического разнообразия при заготовке древесины в Архангельской области, применяемые при рубках спелых и перестойных лесных насаждений и уходе за лесом в эксплуатационных и защитных лесах».

В табл. 1 приведены нормативы и параметры объектов биологического разнообразия и буферных зон, подлежащих сохранению при осуществлении лесосечных работ. Таким образом, информация, содержащаяся в табл. 1, позволяет судить о том, какой может быть насыщенность лесосеки объектами биоразнообразия на примере конкретного лесничества.

Таблица 1

Нормативы и параметры объектов биологического разнообразия и буферных зон, подлежащих сохранению при осуществлении лесосечных работ

Standards and parameters of biological diversity objects and buffer zones to be preserved during logging operations

Наименование объектов биологического разнообразия	Характеристика объектов биологического разнообразия	Размер буферных зон (при необходимости)
Участки, относящиеся к экотонным зонам с высоким биоразнообразием, сохранение которых позволит поддержать разнообразие типичных и редких лесных видов после рубки		
1. Участки около болот (если вокруг болота не выделен особо защитный участок (ОЗУ))	Участки леса шириной: не менее 30 м около выделов, протаксированных как переходное или низинное болото*; не менее 20 м около выделов, протаксированных как верховое болото. *Если в таксационном описании отмечено, что болото поросло деревьями на 20% и более, то около выделов, протаксированных как переходное болото, ширина участка – не менее 20 м	Буферная зона не устанавливается. В границах объекта рубки не проводятся, не прокладываются волока, не размещаются погрузочные площадки
2. Участки около небольших озер	Участки леса шириной не менее 20 м около озер площадью менее 50 га	Буферная зона не устанавливается. В границах объекта рубки не проводятся, не прокладываются волока, не размещаются погрузочные площадки
Уязвимые участки, которые легко могут быть нарушены в результате хозяйственной деятельности и очень долго восстанавливаются		
3. Участки леса вокруг природных выходов подземных вод (родников)	Сохраняются участки леса шириной не менее 50 м вокруг природных выходов подземных вод (родников)*. Для участков характерны: наличие родников; постоянно стоящая вода, часто с ржавым налетом; хорошо развитое высокотравье. *если не выделена водоохранная зона	Буферная зона не устанавливается. В границах объекта рубки не проводятся, не прокладываются волока, не размещаются погрузочные площадки.

Продолжение табл. 1

Наименование объектов биологического разнообразия	Характеристика объектов биологического разнообразия	Размер буферных зон (при необходимости)
4. Небольшие заболоченные понижения	Обычно составляют часть выдела, расположены в локальных бессточных или слабопроточных понижениях рельефа. Для участков характерны: низкий класс бонитета (5-5б); низкая полнота древостоя (0,5 и ниже); избыточно увлажненные почвы (болотные, торфяные); индикаторные виды: сфагнум, осоки, кукушкин лен, багульник болотный, белокрыльник болотный, калужница болотная, сабельник болотный	Вокруг объекта устанавливается буферная зона шириной, равной полупасеке. В буферной зоне не прокладываются волока, не размещаются погрузочные площадки, сохраняются ветроустойчивые деревья, подрост, подлесок, молодняк. В границах объекта рубки не проводятся, не прокладываются волока, не размещаются погрузочные площадки
5. Временные водотоки	Временные (пересыхающие) водотоки с выраженным руслом	Вдоль объекта в обе стороны от русла устанавливается буферная зона шириной, равной полупасеке. В буферной зоне не прокладываются волока, не размещаются погрузочные площадки, сохраняются ветроустойчивые деревья, подрост, подлесок, молодняк. В границах лесосеки допускается оборудование переездов через объект не более двух раз. После разработки лесосеки переезды необходимо разобрать, чтобы обеспечить ток воды и незахламление русла
6. Каменистые россыпи, скальные обрывы, скалы	не встречаются	
7. Карстовые образования	не встречаются	
Деревья пород, редких для Архангельской области в силу своих биологических особенностей, или ставшие редкими в результате хозяйственной деятельности человека		
8. Деревья пород, редких для Архангельской области в силу своих биологических особенностей, или ставшие редкими в результате хозяйственной деятельности человека	Наличие в насаждении деревьев следующих пород: вяз гладкий; вяз шершавый; липа сердцелистная; ольха черная; лиственница сибирская; пихта сибирская; можжевельник обыкновенный (древовидная жизненная форма)	Буферная зона не устанавливается. Сохраняются все объекты вне технологической сети. При компактном произрастании возможно сохранение в виде куртины
Ключевые элементы древостоя, присутствие которых является обязательным условием устойчивого существования лесных экосистем и связанных с ними организмов		
9. Старовозрастные деревья всех пород	Для деревьев характерны: толстые ствол, сучья и ветви; крона неравномерная, раскидистая, разреженная, притупленная,	Буферная зона не устанавливается. Сохраняются не менее 5 старых деревьев каждой породы на 1 га*.

Продолжение табл. 1

Наименование объектов биологического разнообразия	Характеристика объектов биологического разнообразия	Размер буферных зон (при необходимости)
	зонтиковидная, часто многовершинная; кора грубая, с глубокими трещинами в нижней части ствола; ствол и часто ветви покрыты мхами, лишайниками; наличие фаутности – естественных полостей в стволе, ветвях и под корневой системой, наличие плодовых тел грибов, наростов, дупел, следов кормежки дятлов; следы физических повреждений – пожаров, молний, подсочки; искривленные или наклоненные стволы	В общей сложности на лесосеке должно сохраняться не менее 10 старых деревьев на 1 гектар. Если в насаждении до рубки количество старых деревьев меньше 10 штук на гектар, то они сохраняются все вне технологической сети. *Старовозрастные деревья неветроустойчивых пород на слабых почвах рекомендуется сохранять в площадных объектах
10. Мертвая древесина всех пород на разных стадиях разложения – сухостой, высокие пни, валеж	Сохраняются объекты, диаметром более 25 см. Сохраняемые объекты не должны представлять опасности для жизни и здоровья работников при разработке лесосеки.	
	10а. Планируется естественное лесовосстановление путем сохранения подроста древесных пород.	Буферная зона не устанавливается. Высокие пни и валеж сохраняются все вне технологической сети. Сухостойные деревья сохраняются в количестве 3 шт./га каждой породы. Если в насаждении до рубки количество сухостойных деревьев менее 3 шт./га, они сохраняются все вне технологической сети
	10б. Планируется искусственное лесовосстановление, минерализация почвы	Буферная зона не устанавливается. Объекты по возможности сохраняются в других ключевых биотопах или специально выделенных для сохранения элементов мертвой древесины
	10в. Участок скопления мертвой древесины. Возраст распада древостоя менее 3 лет. Максимальная площадь объекта 0,1 га. Возраст распада древостоя 3 и более лет. Площадь объекта не ограничивается при условии, что в границах объекта количество жизнеспособного подроста хозяйственно-ценных пород соответствует требованиям таблиц 2 приложений к Правилам лесовосстановления для естественного лесовосстановления	Буферная зона не устанавливается. В границах объекта рубки не проводятся, не прокладываются волока, не размещаются погрузочные площадки
11. Деревья с гнездами и дуплами	11а. Деревья с крупными гнездами (диаметр гнезда 1 м и более)	В гнездовой период (апрель-сентябрь) устанавливается буферная зона вокруг дерева с гнездом радиусом не менее 300 м. Во внегнездовой

Окончание табл. 1

Наименование объектов биологического разнообразия	Характеристика объектов биологического разнообразия	Размер буферных зон (при необходимости)
		период (октябрь-март) устанавливается буферная зона вокруг дерева с гнездом радиусом не менее 30 м. В буферной зоне рубки не проводятся, не прокладываются волока, не размещаются погрузочные площадки.
	11б. Деревья с гнездами, диаметром менее 1 м, деревья с дуплами	Буферная зона не устанавливается. Сохраняются все вне технологической сети по возможности в окружении 2-5 других ветроустойчивых деревьев, подроста, подлеска, молодняка
Места обитания редких видов, которые могут быть выявлены и определены работниками предприятия во время отвода или разработки лесосеки, и должны быть сохранены в соответствии с требованиями законодательства.		
12. Места обитания редких видов	Выделяются при обнаружении редких видов животных (и/или следов их жизнедеятельности, убежищ, мест гнездования), растений и других организмов, включенных в Красные книги Российской Федерации и Архангельской области, если нет возможности выделить соответствующий ОЗУ	Буферная зона, ее ширина и режим пользования устанавливаются в зависимости от особенностей биологии и экологии редких видов и сохранения устойчивости оставленного участка леса после рубки

Примечание: местоположение объектов биологического разнообразия и площадь буферных зон указываются при их проектировании, при лесоустройстве и специальных обследованиях

Нужно понимать, что в условиях других субъектов Северо-Западного Федерального округа насыщенность лесосеки объектами биоразнообразия может быть и больше. Всё будет зависеть от фантазии разработчиков региональных нормативных актов и лесохозяйственных регламентов.

Исследования производительности лесозаготовительной техники также нашли своё отражение в работах целого ряда авторов [Коломинова, 2013; Бурмистрова и др., 2021; Савиных и др., 2021].

Прежде, чем сформулировать предложения по определению количественных характеристик влияния насыщенности лесосеки объектами биоразнообразия на производительность лесозаготовительной техники в условиях лесничеств Северо-Запада Российской Федерации, необходимо привести формулы расчёта производительности харвестера (рис. 1) [Шегельман и др., 2015].

Рис. 1. Валочно-сучкорезно-раскряжевочная машина (харвестер) на лесосеке
Fig. 1. Harvester in the cutting area

Сменная производительность харвестера $П_{см}$:

$$П_{см} = П_ч \left(T_{см} - t_{пз}\right) f, \quad (1)$$

где $П_ч$ – часовая производительность харвестера, м^3/ч; $T_{см}$ – время смены, ч; $t_{пз}$ – время предварительно-заключительных работ, ч; f – коэффициент использования рабочего времени.

Часовую производительность харвестера $П_ч$ определим по формуле:

$$П_ч = \frac{3600 V_{хл}}{T_ц}, \quad (2)$$

где $V_{хл}$ – объём хлыста, м^3; $T_ц$ – время технологического цикла, с. Время технологического цикла $T_ц$ находится по формуле:

$$T_ц = t_{нав} + t_{зах} + t_{ср} + t_{подт} + t_{раск} + t_{пер} + t_{прот}, \quad (3)$$

где $t_{нав}$, $t_{зах}$ – время, необходимое для наведения ЗСУ и захвата дерева ($t_{нав} + t_{зах} = 10$ с), с; $t_{ср}$ – время на срезание и сталкивание дерева с пня, с;

$t_{подт}$ – время на подтаскивание дерева к машине ($t_{подт}$ = 7 с), с; $t_{раск}$ – время выполнения пропилов, с; $t_{пер}$ – время на смену рабочей стоянки, с; $t_{прот}$ – время протаскивания дерева через ножевую головку, с.

Время срезания и сталкивания дерева с пня $t_{ср}$ рассчитаем по формуле:

$$t_{ср} = \frac{d_{ср}^2 \pi}{4П_{чп}} + 3{,}15, \quad (4)$$

где $d_{ср}$ – средний диаметр дерева на высоте срезания, см; $П_{чп}$ – производительность чистого пиления, см^2/с.

Время раскряжевки дерева (выполнения пропилов) $t_{раск}$ определяют следующим образом:

$$t_{раск} = \frac{\pi\left(d_{ср} + d_{вер}\right)^2}{4П_{чп}} \frac{H_{ср}}{l_{сорт}}, \quad (5)$$

где $H_{ср}$ – средняя длина хлыста, м; $l_{сорт}$ – средняя длина сортимента, м; $d_{вер}$ – диаметр дерева в верхнем отрезе, см.

Время смены рабочей стоянки:

$$t_{пер} = \frac{l_{\max}}{v}, \quad (6)$$

где v – рабочая скорость харвестера, м/с; $l_{\max}$ – максимальное расстояние между рабочими стоянками, м.

Время на протаскивание дерева:

$$t_{прот} = \frac{H_{ср} - 2}{v_{прот}}, \quad (7)$$

где $v_{прот}$ – скорость протаскивания дерева, м/с.

Из всех приведенных параметров влияние изменения структуры лесосеки будет сказываться на времени, необходимом для наведения харвестерной головки и захвата дерева, а также на времени смены рабочей стоянки.

Для выполнения нормативов, приведенных выше (табл. 1), и создания зоны опушечного эффекта вдоль границы лесосеки предположим, что количество вырубаемых деревьев меняется от крайнего волока до стены леса, не отведенного в рубку. Для удобства оценки комплекса мероприятий следует разработать коэффициент «влияния», который будет характеризовать технологический процесс, ведущийся в условиях создания необходимых местообитаний таежной фауны и без него.

Оценки изменения производительности проведем для харвестера John Deere 1270.

Считаем, что работы ведутся в условиях сплошных рубок. Тогда на участке между крайним волоком и стеной леса создаем полосу разреженного леса, локальная полнота которого равномерно нарастает по прямолинейному закону к стене леса. Ширина указанной полосы равна максимальному вылету манипулятора.

Роль создаваемой полосы состоит в формировании зоны опушечного эффекта с более широким разнообразием местообитаний таежной фауны и организацией плавного перехода от нетронутой лесной среды до территории сплошной рубки. Дополнительно решается проблема ветровала деревьев по краям лесосеки.

Снижение производительности харвестера будет происходить по следующим причинам:

1. Снижение объема заготовленной древесины;
2. Снижение производительности;
3. Затраты времени на наведение и захват очередного дерева;
4. Увеличенные затраты времени на смену рабочей стоянки.

На реализацию мероприятий по сохранению местообитаний требуется оставлять нетронутые участки леса, соответствующие требованиям, приведенным в табл. 1 или характеристикам лесов, обусловливающим выживание того или иного сохраняемого вида.

Низкая выборка древесины напрямую снижает производительность харвестера из-за снижения количества стволов, отбираемых в рубку, в зоне доступа манипулятора.

Большие затраты времени обусловлены необходимостью огибать ЗСУ стволы деревьев, оставляемые на формирование опушечной зоны лесосеки.

Увеличение затраты времени на смену рабочей стоянки обусловлено увеличением доли перемещений в технологическом цикле по отношению к его обычной длительности.

Рассмотрим более подробно указанные эффекты.

Расчет будем вести для лесосеки среднего размера. Например, для Республики Карелия ее площадь $S = 11$ га (по данным, предоставленным работниками лесозаготовительных организаций и лесничеств), форма квадратная с размером стороны $a = 330$ м, с системой волоков шириной $b_{вол} = 4$ м. Средний запас на лесосеке $q = 110$/га, средний объем ствола $v_{ст} = 0.22$ м^3, интенсивность рубок в опушечной полосе зададим на уровне $i = 0{,}5$.

Количество стволов на 1 га составит [Лукашевич, 2010]:

$$N = q / v_{ст} = 110 / 0{,}22 = 500 \text{ шт.} \quad (8)$$

Доступный объем заготовляемой древесины составляет следующую величину:

$$V = \left(S - 4 \cdot a \cdot l_{\max} \cdot i\right) \cdot q = \left(110\,000 - 4 \cdot 330 \cdot 10 \cdot 0{,}5\right) \cdot \frac{110}{10000} = 1137\,\text{м}^3. \quad (9)$$

Разница в объеме заготовляемой древесины по сравнению с исходным объемом

$$S \cdot q = 11 * 110 = 1210\ \text{м}^3 \quad (10)$$

составляет 72,6 м^3 (6,0%). Указанная величина изменения заготовляемого объема будет зависеть от величины изреживания в создаваемой полосе биоразнообразия и формы лесосеки: чем больше периметр лесосеки, тем выше потери.

Увеличение времени заготовки древесины, находящейся на лесосеке, при данных условиях и создаваемой опушечной полосе шириной 10 м в общем виде для средней лесосеки составит:

$$\Delta T = \frac{T_{\text{баз}} - T_{\text{стц}}}{T_{\text{баз}}}, \quad (11)$$

где $T_{\text{баз}}$ – базовое время разработки лесосеки, ч; $T_{\text{стц}}$ – время разработки лесосеки с учетом создания полосы для организации местообитаний, ч.

Производительность харвестера John Deere 1270 $П_ч$ в условиях Республики Карелия, по данным [Кузнецов, Гайда, 2024], составляет 15,5 м^3/ч.

Базовое время разработки лесосеки составит:

$$T_{\text{баз}} = \frac{S \cdot q}{П_{\text{ч}}} = \frac{11 \cdot 110}{15{,}5} = 78{,}1\ \text{ч}. \quad (12)$$

Время разработки лесосеки с учетом создания полосы для организации местообитаний составит:

$$T_{\text{стц}} = \frac{\left(S - 4 \cdot a \cdot l_{\max} \cdot i\right) \cdot q}{П_{\text{ч}}} = \frac{\left(11 - 4 \cdot 330 \cdot 10 \cdot 0{,}5\right) \cdot 110}{15{,}5} = 73{,}4\ \text{ч}. \quad (13)$$

Необходимо учитывать, что снижение общего времени разработки лесосеки кажущееся. При работе на лесосеке мгновенный переход на следующую лесосеку практически невозможен, и полученная разница во времени освоения лесосеки не принесет дополнительного эффекта, т. к. фактически в формуле (1) снизится коэффициент использования рабочего времени *f*. С учетом сказанного изменение времени составит:

$$\Delta T = \frac{T_{\text{баз}} - T_{\text{стц}}}{T_{\text{баз}}} = \frac{78{,}1 - 73{,}4}{73{,}4} = 0{,}06\ (6{,}4\%).$$

Затраты времени на наведение и захват очередного дерева будут увеличиваться в указанной полосе биоразнообразия из-за необходимости огибать оставляемые деревья или перемещаться для захвата очередного дерева.

Считаем, что обход мешающего дерева требует перемещения манипулятора на величину раскрытия захвата $l_{зах}$ (для John Deere 1270 с харвестерной головкой WARATAH H425 $l_{зах}$ составляет 1720 мм), необходимый угол поворота ($\alpha_{0,5}$) на середине максимального вылета манипулятора составит 19,7°, угловая скорость поворота манипулятора $\omega_{ман}$ = 10°/с, по данным [Лагерев и др., 2024], рабочая скорость движения харвестера, по данным [Хитров и др., 2024], $v_{раб}$ = 1,1 м/с. С учетом сказанного дополнительное время наведения харвестерной головки на дерево составит:

$$t_{нав} = \frac{\frac{l_{зах}}{\alpha_{0,5}}}{\omega_{ман}} \cdot N \cdot i \cdot \frac{\pi l_{max}^2 - 2 l_{max} b_{вол}}{10\,000} = \frac{1720}{\frac{19,7}{10}} \cdot 500 \cdot 0,5 \cdot \frac{\pi \cdot 10^2 - 2 \cdot 10 \cdot 4}{10\,000} = 4,1 \text{ с}. \quad (14)$$

Необходимо учитывать, что затраты времени на смену рабочей стоянки ($t_{ст}$) увеличатся не непосредственно, а в пересчете на кубический метр или дерево ($t_{ст}^{уд}$).

Определим затраты времени на смену рабочей стоянки харвестера в целом для разработки лесосеки. Длину волока ($l_{вол}$) принимаем равной длине стороны лесосеки за вычетом двух вылетов манипулятора в начале и конце волока, ширину пасеки $b_{пас}$ = 20 м. С учетом сказанного длина волоков составит:

$$\sum l_{вол} = \frac{a}{b_{пас} + b_{вол}} \cdot \left(a - 2 \cdot l_{max}\right) = \frac{330}{\left(20 + 4\right)} \cdot \left(330 - 2 \cdot 10\right) = 4263\,м \quad (15)$$

Примем, что следующая рабочая стоянка находится на расстоянии меньшем, чем максимальный вылет манипулятора, в среднем на 1 м, тогда общее их количество:

$$N_{ст} = \frac{\sum l_{вол}}{l_{max} - 1} = \frac{4263}{10 - 1} = 474. \quad (16)$$

Удельные затраты времени при работе в стандартном режиме составят:

$$\sum t_{ст} = \frac{N_{ст} \cdot \frac{l_{max} - 1}{v_{раб}}}{V} = \frac{426 \frac{10 - 1}{1,1}}{1210} = 2,9 \text{ с/м}^3. \quad (17)$$

Удельные затраты времени при работе в режиме сохранения биоразнообразия составят:

$$\sum t_{ст} = \frac{N_{ст} \cdot \frac{l_{max} - 1}{v_{раб}}}{V} = \frac{426 \frac{10-1}{1{,}1}}{1137} = 3{,}1 \text{ с/м}^3. \quad (18)$$

В абсолютных величинах изменение незначительно, в относительных оно составляет 6,9%.

Обсуждение. В статье [Рукомойников и др., 2024] в результате проведенного производственного эксперимента доказано, что продолжительность всех анализируемых элементов цикла работы харвестера: наведения манипулятора на дерево, подтаскивания хлыста в зону обработки, перемещения харвестера между рабочими позициями – напрямую зависит от факторов, характеризующих состав древостоя в условиях конкретных лесосек, таких как доля вырубаемого компонента и количество деревьев на 1 га.

В то же время, анализируя экспериментальные результаты исследования продолжительности наведения манипулятора, можно отметить рост трудозатрат при снижении доли вырубаемого компонента. Это связано с тем, что остающиеся на доращивание деревья создают препятствия на пути движения манипулятора. Чем больше густота древостоя, тем сложнее оператору при выборе направления падения дерева, а, следовательно, увеличивается продолжительность анализа ситуации при наведении на него манипулятора. С повышением густоты древостоя оператору сложнее обеспечить передвижение поваленного дерева без повреждения растущих [Рукомойников и др., 2024].

Увеличение средней продолжительности перемещения харвестера на каждую новую рабочую позицию при снижении числа вырубаемых деревьев на площади и росте расстояния между ними не вызывает сомнения. Однако в ходе эксперимента отмечено, что при выборочных рубках с целью минимизации повреждений оставляемых на доращивание деревьев при перемещении хлыстов в зону обработки оператору харвестера в ряде случаев приходится одновременно с движением манипулятора осуществлять движение харвестера по волоку в обратном направлении, что в последующем повышает расстояние, проходимое харвестером при перемещении вперед до следующей рабочей позиции, и в целом суммарные расстояния передвижений машины по лесосеке. Это показывает, что влияние на среднюю продолжительность перемещения харвестера между рабочими позициями имеет не только количество вырубаемых деревьев, но и количество деревьев, оставляемых на доращивание [Рукомойников и др., 2024].

В настоящем научном исследовании авторы считают необходимым дополнить проблему затрат времени на технологические операции при выборочных и постепенных рубках тем обстоятельством, что оператору харвестера дополнительно понадобится учитывать необходимость сохранения объектов биологического разнообразия (табл. 1) и помнить о выполнении мероприятий по охране объектов животного мира и среды их обитания.

Необходимость и важность проектирования и выполнения мероприятий по охране объектов животного мира и среды их обитания при осуществлении лесопромышленных и лесохозяйственных производственных процессов в очередной раз подтверждены: с 01.09.2025 вступило в силу Постановление Правительства РФ от 31.05.2025 №813 «Об утверждении требований к предотвращению гибели объектов животного мира при осуществлении производственных процессов, а также при эксплуатации транспортных магистралей, трубопроводов и линий связи и электропередачи», где и содержится это требование:

«12. При использовании лесов, планировании и осуществлении мероприятий по их охране, защите и воспроизводству необходимо предусматривать меры по охране объектов животного мира и среды их обитания, включая сохранение условий размножения объектов животного мира, нагула, отдыха и путей миграции в соответствии с целевым назначением защитных лесов и правовым режимом особо защитных участков лесов».

Основываясь на вышесказанном, авторы настоящего научного исследования вносят предложение сконцентрировать все действия природоохранного характера, которые необходимо осуществлять при проведении лесосечных работ, в новую технологическую операцию, которую авторы предлагают назвать «биосохранение».

Тогда формулу расчёта времени технологического цикла (3) авторы предлагают дополнить ещё одним слагаемым $t_{биосохр}$:

$$T_ц = t_{нав} + t_{зах} + t_{ср} + t_{подт} + t_{раск} + t_{пер} + t_{прот} + t_{биосохр}, \quad (19)$$

где $t_{нав}$, $t_{зах}$ – время, необходимое для наведения ЗСУ и захвата дерева ($t_{нав} + t_{зах} = 10\ с$), с; $t_{ср}$ – время на срезание и сталкивание дерева, с; $t_{подт}$ – время на подтаскивание дерева к машине ($t_{подт} = 7\ с$), с; $t_{раск}$ – время выполнения пропилов, с; $t_{пер}$ – время на смену рабочей стоянки, с; $t_{прот}$ – время протаскивания дерева через ножевую головку, с; $t_{биосохр}$ – время биосохранения, с.

Из формул (1) и (2) очевидно, что чем больше лесосека будет насыщена объектами биоразнообразия, чем мельче по размерам будут эти объекты и чем более разбросанными они будут по территории лесосеки, тем больше

времени оператор харвестера будет тратить на биосохранение и тем больше будет величина предлагаемого авторами настоящего исследования времени биосохранения $t_{биосохр.}$

Составляющие технологического цикла при выполнении операций по формированию площадей по биосохранению при средних показателях древостоя составят:

- Снижение объема заготовленной древесины – 6,0%;
- Снижение производительности харвестеров – 6,4%;
- Затраты времени на наведение и захват очередного дерева увеличатся в среднем на 4,1 с;
- Затраты времени на смену рабочей стоянки – на 6,9%.

Так как в зависимости от принятой схемы разработки лесосеки данные факторы будут сочетаться в разных комбинациях, то предельное изменение производительности составит приблизительно 19,3%, а минимальное – приблизительно 6,0%. Таким образом, можно считать, что снижение производительности в большинстве случаев будет укладываться в диапазон 10±2% и составит приемлемую величину для применения на практике.

Чтобы понять важность этого слагаемого в формуле (20), достаточно в табл. 1 прочитать характеристику такого объекта биологического разнообразия, как старовозрастные деревья всех пород (п. 9), и представить себе, сколько времени потратит оператор харвестера на принятие решения, соответствует ли данное конкретное дерево вышеназванным характеристикам или нет, и оставлять ли это дерево на корню или не оставлять.

Заключение. Проблему снижения производительности харвестера по причине увеличения затрат времени на сохранение объектов биологического разнообразия (табл. 1) и на мероприятия по охране объектов животного мира и среды их обитания при проведении лесосечных работ авторы предлагают решать следующим образом:

1. Сконцентрировать все действия природоохранного характера, которые необходимо осуществлять при проведении лесосечных работ, в новую технологическую операцию, которую авторы предлагают назвать «биосохранение»;

2. Отказаться от единичных, мелких по размеру, разбросанных по территории лесосеки, часто занесённых снегом, малозаметных оператору харвестера объектов биоразнообразия, увеличивающих затраты его времени на принятие решения, а вместо них сохранять на лесосеке компактные куртины жизнеспособных деревьев и кустарников, чётко обозначенные при отводе лесосеки и хорошо видные оператору из кабины харвестера;

3. Там, где это возможно, отказаться от прямолинейных границ лесосеки в пользу криволинейных, что позволит увеличить протяженность опушечной линии, необходимой для сохранения биоразнообразия лесов.

Чётко обозначенная в технологической карте лесосечных работ технологическая операция «биосохранение» с указанием технологии выполнения, применяемых машин и оборудования станет неотъемлемой частью оптимального технологического решения для данной конкретной лесосеки.

Лесозаготовки – это основополагающая часть лесного комплекса, на результатах работы которой базируются все последующие мероприятия по транспортировке и переработке древесины.

От качества проведения рубок зависит успешное лесовосстановление и сохранение биоразнообразия лесной среды. С другой стороны, высокое качество рубок состоит в максимальном использовании имеющихся на лесосеке древесных ресурсов. Поэтому необходим грамотный выбор такого характера лесозаготовительного процесса, который позволил бы реализовать высококачественное освоение лесного фонда на основе умения подбирать технологические комплексы, наиболее полно соответствующие сортиментному плану и конкретным природно-производственным условиям.

Успешность деятельности лесоинженера оценивается в том числе по достигнутой производительности и ритмичности работы лесозаготовительной техники. В настоящем научном исследовании предпринята попытка показать влияние различных характеристик древостоя и машины друг на друга, а главное – на возможно достижимую производительность имеющегося оборудования.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Андронов А.В., *Пегов В.Ю.* Анализ влияния стажа работы оператора на производительность харвестера // Научно-техническая конференция института технологических машин и транспорта леса Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета по итогам научно-исследовательских работ 2017 г.: сб. ст. по мат. науч.-техн. конф. СПб., 2018. С. 59-65.

Безгина Ю.Н., *Герц Э.Ф.*, *Залесов С.В.*, *Теринов Н.Н.*, *Уразова А.Ф.* Рациональные параметры технических элементов пасеки для манипуляторных лесозаготовительных машин // Хвойные бореальной зоны. 2018. Т. 36, №4. С. 338-343.

Белодедова А.А., *Сидорова М.В.* Хронометражное исследование лесозаготовительных операций // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. 2012. Т. 9, №1. С. 4-7. DOI: 10.15393/j2.art.2012.1701.

Бурмистрова О.Н., *Просужих А.А.*, *Хитров Е.Г.*, *Куницкая О.А.*, *Лунева Е.Н.* Теоретические исследования производительности форвардеров при ограничениях воздействия на почвогрунты // ИВУЗ. Лесной журнал. 2021. №3 (381). С. 101-116. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-101-116.

Виногоров Г.К. Технология лесозаготовок. Учебник для техникумов. М.: Лесная промышленность, 1984. 296 с.

Герасимов, *Ю.Ю.*, *Сенькин В.А.*, *Вяятайнен К.* Производительность харвестеров на сплошных рубках // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. 2012. Т. 9, №2. С. 82-93. DOI: 10.15393/j2.art.2012.1642.

Герц Э.Ф., *Мехренцев А.В.*, *Якимович С.Б.* Сравнительная оценка эффективности технологических схем работы систем машин «харвестер-форвадер» по критериям площади технологических коридоров и производительности // Вестник МГУЛ. 2012. №4. С. 63-67.

Дербин В.М., *Дербин М.В.* Технология работы харвестера при выборочных рубках // Системы. Методы. Технологии. 2015. №4 (28). С. 120-124.

Дудко А.А., *Уразова А.Ф.*, *Демидова А.В.*, *Абишев К.Б.*, *Садыгов Ф.А.*, *Диметренко С.В.* Пример расчета производительности харвестера John Deere 803MH с учетом природно-производственных условий Октябрьского района, ХМАО-Югры // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2024. №65. С. 169-174.

Коломинова М.В. К вопросу повышения производительности харвестеров и форвардеров // Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса: мат. II межд. науч.-техн. конф. Кострома, 2013. С. 118-121.

Коломинова М.В. Пути повышения эффективности технологических процессов лесозаготовок с использованием многооперационных машин // Ресурсы Европейского Севера. Технологии и экономика освоения. 2015. №2 (2). С. 11-17.

Кузнецов А.В., *Гайда А.А.* Сравнительный анализ эффективности харвестеров зарубежного производства // Resources and Technology. 2024. Т. 21, №1. С. 100–112. DOI: 10.15393/j2.art.2024.7543.

Лагерев А.В., *Лагерев И.А.*, *Макулина А.В.* Динамическая модель харвестера, оснащенного канатной анкерной системой, при проведении лесозаготовительных работ на крутом склоне // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2024. №3. С. 188-206. DOI: 10.22281/2413-9920-2024-10-03-188-206.

Лопатин С.Д., *Семенов Е.А.*, *Чернышев Д.О.* Лесозаготовительная техника на службе лесной промышленности // Парадигма. 2025. №7. С. 206-211.

Лукашевич В.М. Обоснование комплектов и режимов работы лесосечных и лесотранспортных машин с учетом сезонности лесозаготовительных работ: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Петрозаводск, 2010. 18 с.

Лукашевич В.М., *Кузнецов А.В.*, *Викторова Т.В.* Оценка эффективности внедрения рубок ухода высокой интенсивности // Resources and Technology. 2025. Т. 22, №1. С. 72-89. DOI: 10.15393/j2.art.2025.8323.

Мехренцев А.В., *Беляйков Ф.Г.*, *Полукаров М.В.* Оценка влияния продолжительности рабочей смены оператора харвестера на производительность и состояние природной среды // Вестник МГУЛ. 2007. №8. С. 130-132.

Рукомойников К.П., *Сергеева Т.В.*, *Гилязова Т.А.*, *Царев Е.М.*, *Анисимов П.Н.* Влияние состава древостоя на временной цикл работы харвестера // ИВУЗ. Лесной журнал. 2024. №3 (399). С. 153-165. DOI: 10.37482/0536-1036-2024-3-153-165.

Савиных Т.И. Разработка методики определения производительности харвестера и ее расчет при выборочных рубках // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: мат. XVII Всерос. (нац.) науч.-техн. конф. Екатеринбург, 2021. С. 44-47.

Савиных Т.И., *Савиных М.А.*, *Якимович С.Б.* Сравнительный анализ способов заготовки древесины харвестером по критерию производительности и удельной энергоемкости // Леса России и хозяйство в них. 2021. №4 (79). С. 69-74. DOI: 10.51318/FRET.2021.95.37.006.

Свойкин Ф.В., *Свойкин В.Ф.*, *Соколова В.А.*, *Локштанов Б.М.*, *Орлов В.В.*, *Гусева Т.А*, Повышение производительности неспециализированной техники на лесозаготовках на базе математического анализа показателей лесосеки // Системы. Методы. Технологии. 2021. №3 (51). С. 135-142. DOI: 10.18324/2077-5415-2021-3-135-142.

Сергеева Т.В., *Гилязова Т.А.*, *Рукомойников К.П.* Результаты имитационного моделирования работы харвестера при выборочных рубках леса // Лесной вестник. 2024. Т. 28, №2. С. 136-149.

Соколов А.П., *Селиверстов А.А.*, *Суханов Ю.В.*, *Сенькин В.А.* О влиянии частичной автоматизации управления манипуляторами на эргономические показатели лесозаготовительных машин // Лесной вестник. 2023. Т. 27, №1. С. 139-152. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-139-152.

Технология и машины лесосечных работ: учебник. СПб.: СПбГЛТУ, 2012. 362 с.

Хитров Е.Г., *Григорьев Г.В.*, *Дмитриева И.Н.* Пример расчета производительности харвестера с учетом природно-производственных условий // Актуальные вопросы транспорта в лесном комплексе: мат. Всерос. науч.-практ. конф. СПб., 2020. С. 76-80.

Шегельман И.Р., *Скрыпник В.И.*, *Питухин А.В.*, *Галактионов О.Н.* Производство лесосечных работ: технология и техника: учеб. пособие для студентов вузов лесоинженерного профиля. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2015. 367 с.

Ширнин Ю.А., *Ширнин А.Ю.*, *Денисов С.А.*, *Волдаев М.Н.*, *Шарнин И.В.* Разработка повреждённых низовым пожаром горельников системой машин «харвестер + форвардер» // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2022. №2 (54). С. 55-63.

References

Andronov A.V., *Pegov V.Yu.* Analysis of the influence of the operator's work experience on harvester performance. *Scientific and Technical Conference of the Institute of Technological Machines and Forest Transport of the St. Petersburg State*

Forestry University based on the results of scientific research in 2017: collection of art. based on the mat. of the sci.-tech. conf. St. Petersburg, 2018, pp. 59-65. (In Russ.)

Belodedova A.A., *Sidorova M.V.* Timekeeping study of logging operations. *Proceedings of the Faculty of Forestry Engineering of PetrSU*, 2012, vol. 9, no. 1, pp. 4-7. DOI: 10.15393/j2.art.2012.1701. (In Russ.)

Bezgina Yu.N., *Hertz E.F.*, *Zalesov S.V.*, *Terinov N.N.*, *Urazova A.F.* Rational parameters of the technical elements of the apiary for manipulator logging machines. *Conifers of the boreal zone*, 2018, vol. 36, no. 4, pp. 338-343. (In Russ.)

Burmistrova O.N., *Prosuzhikh A.A.*, *Khitrov E.G.*, *Kunitskaya O.A.*, *Luneva E.N.* Theoretical studies of forwarders' productivity with limited impact on soils. *Russian forestry journal*, 2021, no. 3 (381), pp. 101-116. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-101-116. (In Russ.)

Derbin V.M., *Derbin M.V.* Harvester technology for selective logging. *Systems. Methods. Technologies*, 2015, no. 4 (28), pp. 120-124. (In Russ.)

Dudko A.A., *Urazova A.F.*, *Demidova A.V.*, *Abishev K.B.*, *Sadygov F.A.*, *Dimetrenko S.V.* An example of calculating the productivity of a John Deere 803MH harvester, taking into account the natural and industrial conditions of the Oktyabrsky district, Khanty-Mansi Autonomous Okrug-Yugra. *Actual problems of the forest complex*, 2024, no. 65, pp. 169-174. (In Russ.)

Gerasimov Yu.Yu., *Senkin V.A.*, *Vyayataynen K.* Productivity of harvesters on continuous logging. *Proceedings of the Faculty of Forestry Engineering of PetrSU*, 2012, vol. 9, no. 2, pp. 82-93. DOI: 10.15393/j2.art.2012.1642. (In Russ.)

Hertz E.F., *Mekhrentsev A.V.*, *Yakimovich S.B.* Comparative assessment of the effectiveness of technological schemes for the operation of harvester-forwarder machine systems according to the criteria of the area of technological corridors and productivity. *Bulletin of the Moscow State University of Forest*, 2012, no. 4, pp. 63-67. (In Russ.)

Khitrov E.G., *Grigoriev G.V.*, *Dmitrieva I.N.* An example of calculating harvester productivity taking into account natural and industrial conditions. *Current issues of transport in the forest complex*: proc. of the All-Russ.sci.-pract. conf. St. Petersburg, 2020, pp. 76-80. (In Russ.)

Kolominova M.V. On the issue of increasing the productivity of harvesters and forwarders. *Actual problems and prospects of the timber industry development*: proc. of the II int.sci.-tech. conf. Kostroma, 2013, pp. 118-121. (In Russ.)

Kolominova M.V. Ways to increase the efficiency of technological processes of logging using multi-operational machines. *Resources of the European North. Technologies and economics of development*, 2015, no. 2 (2), pp. 11-17. (In Russ.)

Kuznetsov A.V., *Gaida A.A.* Comparative analysis of the effectiveness of harvesters of foreign production. *Resources and Technology*, 2024, vol. 21, no. 1, pp. 100–112. DOI: 10.15393/j2.art.2024.7543. (In Russ.)

Lagerev A.V., *Lagerev I.A.*, *Makulina A.V.* Dynamic model of a harvester equipped with a rope anchor system during logging operations on a steep slope. *Nauchno-*

tekhnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta, 2024, no. 3, pp. 188-206. DOI: 10.22281/2413-9920-2024-10-03-188-206. (In Russ.)

Lopatin S.D., *Semenov E.A.*, *Chernyshev D.O.* Logging equipment in the service of the forest industry. *Paradigm*, 2025, no. 7, pp. 206-211. (In Russ.)

Lukashevich V.M. Justification of sets and modes of operation of logging and forest transport machines taking into account the seasonality of logging operations: author's abstract. Diss. ... Cand. Tech. Sci. Petrozavodsk, 2010. 18 p. (In Russ.)

Lukashevich V.M., *Kuznetsov A.V.*, *Viktorova T.V.* Evaluation of the effectiveness of the introduction of high-intensity logging. *Resources and Technology*, 2025, vol. 22, no. 1, pp. 72-89. DOI: 10.15393/j2.art.2025.8323. (In Russ.)

Mehrentsev A.V., *Belyaykov F.G.*, *Polukarov M.G.* Assessment of the impact of the duration of the harvester operator's work shift on productivity and the state of the natural environment. *Bulletin of the Moscow State University of Forest*, 2007, no. 8, pp. 130-132. (In Russ.)

Rukomoynikov K.P., *Sergeeva T.V.*, *Gilyazova T.A.*, *Tsarev E.M.*, *Anisimov P.N.* The influence of tree stand composition on the time cycle of harvester operation. Russian forestry journal, 2024, no. 3 (399), pp. 153-165. DOI: 10.37482/0536-1036-2024-3-153-165. (In Russ.)

Savinykh T.I. Development of a methodology for determining harvester productivity and its calculation during selective logging. *Scientific creativity of youth – to the Russian forest complex*: proc. of the XVII All-Russ. (nat.) sci.-tech. conf. Yekaterinburg, 2021, pp. 44-47. (In Russ.)

Savinykh T.I., *Savinykh M.A.*, *Yakimovich S.B.* Comparative analysis of wood harvesting methods by harvester according to the criterion of productivity and specific energy intensity. *Forests of Russia and their management*, 2021, no. 4 (79), pp. 69-74. DOI: 10.51318/FRET.2021.95.37.006. (In Russ.)

Sergeeva T.V., *Gilyazova T.A.*, *Rukomoynikov K.P.* Results of simulation modeling of harvester operation during selective logging. *Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 2, pp. 136-149. (In Russ.)

Shegelman I.R., *Skrypnik V.I.*, *Pitukhin A.V.*, *Galaktionov O.N.* Logging operations: technology and technique: a textbook for university students of forestry engineering. Petrozavodsk: PetrSU Publishing House, 2015. 367 p. (In Russ.)

Shirnin Yu.A., *Shirnin A.Yu.*, *Denisov S.A.*, *Voldaev M.N.*, *Sharnin I.V.* Development of the harvester + forwarder machine system damaged by a low-level fire. *Bulletin of the Volga State Technological University. Ser.: Forest. Ecology. Environmental management*, 2022, no. 2 (54), pp. 55-63. (In Russ.)

Sokolov A.P., *Seliverstov A.A.*, *Sukhanov Yu.V.*, *Senkin V.A.* On the influence of partial automation of manipulator control on the ergonomic performance of logging machines. *Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 139-152. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-139-152. (In Russ.)

Svoikin F.V., *Svoikin V.F.*, *Sokolova V.A.*, *Lokshtanov B.M.*, *Orlov V.V.*, *Guseva T.A.* Improving the productivity of non-specialized equipment in logging based on

mathematical analysis of cutting area indicators. *Systems. Methods. Technologies*, 2021, no. 3 (51), pp. 135-142. DOI: 10.18324/2077-5415-2021-3-135-142. (In Russ.)

Technology and machines of logging operations: textbook. St. Petersburg: St. Petersburg State Technical University, 2012. 362 p. (In Russ.)

Vinogorov G.K. Technology of logging. Textbook for technical schools. Moscow: Lesnaya promyshlennost, 1984. 296 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 14.04.2026

Галактионов О.Н., Шадрин Р.А., Алешин И.С. О влиянии насыщенности лесосеки объектами биоразнообразия на производительность лесозаготовительной техники // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2026. Вып. 259. С. 237–259. DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.237-259

Работа посвящена вопросу влияния насыщенности лесосеки объектами биоразнообразия на производительность лесозаготовительной техники. Производительность лесных машин – это наиболее важный показатель их работы, определяющийся количеством работы, выполняемой машиной или механизмом в единицу времени. Существует целый ряд научных исследований, посвящённых изучению производительности лесных машин. К сожалению, в них не уделяется внимания влиянию насыщенности лесосеки объектами биоразнообразия на производительность лесозаготовительной техники. Целью настоящего научного исследования служит анализ влияния насыщенности лесосеки объектами биоразнообразия на производительность лесозаготовительной техники в условиях лесничеств Северо-Запада Российской Федерации для определения его количественных характеристик. Задачи исследования сформулированы следующим образом: проанализировать современную нормативно-методическую основу сохранения биоразнообразия при производстве лесосечных работ; проанализировать практику сохранения биоразнообразия при производстве лесосечных работ в условиях лесничеств Северо-Запада Российской Федерации; на основании этого анализа сформулировать предложения по определению количественных характеристик влияния насыщенности лесосеки объектами биоразнообразия на производительность лесозаготовительной техники в условиях лесничеств Северо-Запада Российской Федерации. Авторы настоящего научного исследования вносят предложение сконцентрировать все действия природоохранного характера, которые необходимо осуществлять при проведении лесосечных работ, в новую технологическую операцию, которую предлагается назвать «биосохранение». Чем больше будет лесосека насыщена объектами биоразнообразия, чем мельче по размерам будут эти объекты и чем более разбросанными они будут по территории лесосеки, тем больше времени оператор харвестера будет тратить на биосохранение и тем больше будет величина предлагаемого авторами настоящего научного исследования времени

биосохранения $t_{биосохр.}$ Чтобы понять важность этого слагаемого в формуле расчёта производительности харвестера, достаточно прочитать характеристику такого важного объекта биологического разнообразия, как старовозрастные деревья всех пород и представить себе, сколько времени потратит оператор харвестера на принятие решения, соответствует ли данное конкретное дерево вышеназванным характеристикам или нет.

Ключевые слова: лесные машины, производительность, технология, объекты биологического разнообразия, насыщенность, лесосека.

Galaktionov O.N., Shadrin R.A., Alyoshin I.S. On the effect of saturation of a cutting area with biodiversity objects on the productivity of logging equipment. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2026, iss. 259, pp. 237–259 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.237-259

The work is devoted to the issue of the impact of the saturation of the cutting area with biodiversity objects on the productivity of logging equipment. The productivity of forest machines is the most important indicator of their work, determined by the amount of work performed by a machine or mechanism per unit of time. There are a number of scientific studies devoted to the study of the productivity of forest machinery, unfortunately, they do not pay attention to the impact of the saturation of the cutting area with biodiversity objects on the productivity of logging equipment. The purpose of this scientific study is to analyze the impact of the saturation of the cutting area with biodiversity objects on the productivity of logging equipment in the conditions of forestry in the North-West of the Russian Federation to determine its quantitative characteristics. The objectives of the study are formulated as follows: to analyze the modern regulatory and methodological framework for the conservation of biodiversity in the production of logging operations; to analyze the practice of conservation of biodiversity in the production of logging operations in the conditions of forestry in the North-West of the Russian Federation; Based on this analysis, to formulate proposals for determining the quantitative characteristics of the impact of the saturation of the cutting area with biodiversity objects on the productivity of logging equipment in the conditions of forestry in the North-West of the Russian Federation. The authors of this scientific study propose to concentrate all environmental protection actions that need to be carried out during logging operations into a new technological operation, which is proposed to be called "bio saving". The more a cutting area is saturated with biodiversity objects, the smaller these objects will be and the more scattered they will be across the cutting area, the more time the harvester operator will spend on bio saving, the greater the value of the bio saving time proposed by the authors of this scientific study. To understand the importance of this term in the harvester productivity calculation formula, it is enough to read the characteristics of such an important object of biological diversity as old-age trees of all breeds and imagine how much time the harvester operator will spend deciding whether this particular tree meets the above-mentioned characteristics or not.

K e y w o r d s: forest machinery, productivity, technology, biodiversity objects, saturation, cutting area.

ГАЛАКТИОНОВ Олег Николаевич – профессор Петрозаводского государственного университета, доктор технических наук. SPIN-код: 3419-8438.

185910, пр. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Россия. E-mail: galakt@petrsu.ru

GALAKTIONOV Oleg N. – DSc (Technical), Petrozavodsk State University. SPIN-code: 3419-8438.

185910. Lenina av. 33. Petrozavodsk. Russia. E-mail: galakt@petrsu.ru

ШАДРИН Роман Александрович – старший преподаватель Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 1768-1512.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: shadrin-ra1976@yandex.ru

SHADRIN Roman A. – Senior Lecturer, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 1768-1512.

194021. Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: shadrin-ra1976@yandex.ru

АЛЕШИН Илья Сергеевич – аспирант Петрозаводского государственного университета.

185910, пр. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Россия.

ALYOSHIN Ilya S. – PhD student, Petrozavodsk State University.

185910. Lenina av. 33. Petrozavodsk. Russia.

УДК 338.001.36

Р.С. Рогулин

ЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ ДВУХЭШЕЛОННОЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ В ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ НА ТРАНСПОРТНОМ ГРАФЕ С ТРАНЗИТНЫМИ ВЕРШИНАМИ

Введение. Лесопромышленный комплекс характеризуется высокой зависимостью от транспортной логистики, что обусловлено пространственной разобщенностью ресурсов, многоэтапностью доставки через промежуточные пункты и значительной долей транспортных издержек в себестоимости. Это формирует необходимость оптимизации двухэшелонных задач, сочетающих магистральную доставку от предприятия к хабам и последующую дистрибуцию потребителям. Однако классические модели, использующие упрощенные схемы и агрегированные данные, оказываются неадекватны, так как игнорируют сложную топологию реальных дорожных сетей с транзитными узлами, что критично для согласованного планирования.

В связи с этим в работе предлагается новая модель двухэшелонной транспортной задачи для лесопромышленного комплекса, явно учитывающая инфраструктуру в виде взвешенного графа с транзитными вершинами. Её ключевое отличие – расчет стоимости маршрутов на основе кратчайших путей в исходном графе, что позволяет без упрощений оптимизировать согласованную работу магистрального и распределительного эшелонов с учетом ограничений по вместимости транспорта и спросу, повышая практическую применимость решений.

Формулировка задачи. Лесопромышленный комплекс сталкивается со сложной логистической задачей, связанной с многоэтапной доставкой продукции от предприятия к конечным потребителям. Этот процесс организован в виде двух эшелонов – магистрального (от депо к промежуточным хабам) и распределительного (от хабов непосредственно к потребителям). Ключевой проблемой является необходимость совместной оптимизации этих этапов с учетом реальной, сложной топологии транспортной сети, а не упрощенных схем.

Транспортная система моделируется как взвешенный ориентированный граф $G = (V, E)$, где V – множество вершин, E – множество дуг. Его вершины включают депо (предприятие I_0), хабы (множество пунктов перераспределения

I_1), потребителей (с заданным спросом I_2) и транзитные узлы (развязки, станции (I_T)). Транзитные вершины, не являясь пунктами погрузки или выгрузки, критически важны, так как определяют реальные доступные маршруты и затраты на перемещение. На систему наложены ограничения по вместимости транспортных средств и пропускной способности хабов.

Первый эшелон решает задачу маршрутизации: одно транспортное средство стартует из депо, посещает все или часть хабов, разгружая в них определенный объем продукции, и возвращается обратно. Объем груза, доставляемый в каждый хаб, является переменной оптимизации, ограниченной вместимостью транспортного средства.

Второй эшелон представляет собой классическую задачу маршрутизации с ограниченной вместимостью, но привязанную к конкретным хабам. Несколько транспортных средств, стартующих из каждого хаба, должны обслужить всех прикрепленных потребителей, полностью удовлетворив их спрос. Маршруты строятся с учетом той же сетевой топологии, включая транзитные узлы.

Эшелоны связаны балансовым ограничением: объем продукции, распределенный от хаба потребителям, не может превышать объем, доставленный в этот хаб на первом эшелоне. Целевая функция модели – минимизация суммарных транспортных издержек, которые рассчитываются на основе длин кратчайших путей в исходном транспортном графе, что позволяет точно учитывать реальную инфраструктуру.

Таким образом, предложенная модель обеспечивает комплексную оптимизацию двухуровневой логистики, согласуя решения магистральной доставки и финальной дистрибуции в условиях реальной сети с транзитными вершинами, что повышает ее адекватность и практическую применимость для лесопромышленного комплекса.

Цель и задачи исследования. Исследование направлено на разработку двухэшелонной модели оптимизации транспортной логистики для лесопромышленного комплекса, учитывающей реальную топологию сети. Ключевая цель – согласованное планирование магистральной доставки от предприятия к хабам и последующей дистрибуции к потребителям. Для этого требуется формализовать транспортную структуру в виде взвешенного графа, включающего депо, хабы, потребителей и транзитные вершины (развязки, узлы), которые критически влияют на построение маршрутов и затраты.

Математическая постановка задачи разделяет логику эшелонов: первый эшелон – это маршрутизация с посещением хабов, второй – распределение потоков с ограничениями по вместимости транспорта и спросу. Основная

методологическая задача – интегрировать полный транспортный граф с транзитными вершинами в линейную оптимизационную модель (MILP). Это достигается путем расчета стоимости маршрутов на основе кратчайших путей в графе, что сохраняет адекватность модели без потери линейности структуры.

Заключительные этапы работы включают численную апробацию модели на тестовых данных, приближенных к реальным условиям, для проверки корректности и анализа решений. Результаты позволят оценить практическую применимость модели для планирования в лесопромышленном комплексе и определить направления ее развития, в том числе с учетом факторов неопределенности.

Материалы исследования. Транспортные задачи и их многоэшелонные модификации составляют один из центральных разделов теории оптимизации, широко применяемый в логистике и управлении цепями поставок [Zoran, Drašković, 2024; Chen et al., 2025]. В двух- и трёхэшелонных постановках процесс доставки разделяется на последовательные уровни с промежуточными пунктами консолидации и перераспределения, что позволяет моделировать реальную структуру распределительных сетей [Aryza et al., 2024; He, 2024]. Однако агрегированный подход, традиционно используемый при описании связи между эшелонами, приводит к потере информации о взаимном влиянии решений на разных уровнях [Deliktaş et al., 2023]. Задачи маршрутизации транспортных средств (VRP), являющиеся NP-трудными, решаются преимущественно эвристическими методами [Shehab et al., 2024], при этом транспортная сеть, как правило, аппроксимируется полным графом или матрицей расстояний, что становится критическим ограничением для пространственно распределённых комплексов.

В последние годы возрастает интерес к моделированию транспортных процессов непосредственно на графах инфраструктуры, где вершины соответствуют реальным объектам, а рёбра – допустимым направлениям движения [Sun et al., 2024; Nunes, 2025]. Тем не менее транзитные вершины (развязки, станции, промежуточные узлы) в оптимизационных постановках обычно не учитываются явно, а используются лишь для предварительного расчёта кратчайших путей [Albalawi et al., 2023]. Для лесопромышленного комплекса, характеризующегося разреженной и неоднородной транспортной сетью, высокой долей логистических издержек в себестоимости и зависимостью маршрутов от конкретных элементов инфраструктуры, такое упрощение существенно ограничивает практическую ценность решений

[Helo, Rouzafzoon, 2023]. При этом двухэшелонная структура доставки в лесной логистике, как правило, рассматривается неявно или упрощается до одной укрупнённой транспортной схемы [Nunes, 2025]. Экономические аспекты формирования цепочек поставок сырья и управления ценовой политикой лесопромышленного предприятия, в том числе в условиях неопределённости, рассматривались автором ранее [Рогулин, 2024].

Таким образом, в существующих работах двухэшелонная структура доставки рассматривается в агрегированном виде, транзитные вершины не включаются в оптимизационную модель явно, а согласованная оптимизация решений разных уровней либо отсутствует, либо осуществляется эвристически. Это обуславливает необходимость разработки моделей, одновременно учитывающих реальную топологию транспортной сети, различную логистическую природу эшелонов и строгие ограничения по ресурсам. Смежные постановки, учитывающие факторы неопределённости в задачах лесопромышленного комплекса, рассматривались автором ранее [Рогулин, 2023].

Методика исследования.

1. Множества и индексы.

$G = (V, E)$ – исходный транспортный граф. $V = I_0 \cup I_1 \cup I_2 \cup I_T$, $I_0 = \{0\}$ – депо (одно), I_1 – множество хабов, I_2 – множество потребителей, I_T – множество транзитных вершин. $H := I_1$ – хабы, индекс h. $C := I_2$ – потребители, индекс c. $N_1 := I_0 \cup H$ – узлы 1-го эшелона (депо+хабы), индексы $i,j \in N_1$. $N_2 := H \cup C$ – узлы 2-го эшелона (хабы+потребители), индексы $i,j \in N_2$. $K := \{1, ..., m\}$ – доступные транспортные средства (ТС) второго эшелона, индекс k.

2. Параметры.

$d_c \geq 0$ – спрос потребителя $c \in C$. $Q > 0$ – вместимость состава/перевозки первого эшелона (общее количество, которое можно развести по хабам). $q > 0$ – вместимость одного ТС второго эшелона. $m \in \mathbb{N}$ – максимальное число ТС второго эшелона. $d_{i,j} \geq 0$ – стоимость/длина кратчайшего пути между вершинами i и j в исходном графе G. Практически: D = distances(G), где G построен по E, а веса рёбер – по стоимости/длине.

3. Переменные.

1.1. *Переменные 1-го эшелона* (*маршрут по хабам*)*:*

• $x_{ij}^{(1)} \in \{0,1\}$ для $i \neq j$, $i, j \in N_1$: $x_{ij}^{(1)} = 1$, если дуга $i \to j$ входит в тур 1-го эшелона;

• $u_i \in \left[0, |H|\right]$ для $i \in N_1$: порядковая переменная для устранения подтуров (MTZ);

• $s_h \geq 0$ для $h \in H$: объем, доставленный на хаб h первым эшелоном.

1.2. Переменные 2-го эшелона (*маршруты ТС от хабов*)*:*

• $a_{kh} \in \{0,1\}$ для $k \in K$, $h \in H$: $a_{kh} = 1$, если ТС k назначено (стартует и возвращается) на хаб h;

• $x_{kij}^{(2)} \in \{0,1\}$ для $k \in K$, $i \neq j$, $i,j \in N_2$: $x_{kij}^{(2)} = 1$, если ТС k проходит дугу $i \to j$;

• $y_{kc} \in \{0, 1\}$ для $k \in K$, $c \in C$: $y_{kc} = 1$, если потребитель c обслуживается ТС k;

• $f_{kij} \geq 0$ для $k \in K$, $i \neq j$, $i,j \in N_2$: поток груза на дуге $i \to j$ в маршруте ТС k (используется для вместимости и устранения подтуров).

2. Целевая функция (*минимизация суммарной стоимости*)*.*

$$\min Z = \sum_{i \in N_1} \sum_{\substack{j \in N_1 \\ j \neq i}} D_{ij} x_{ij}^{(1)} + \sum_{k \in K} \sum_{i \in N_2} \sum_{\substack{j \in N_2 \\ j \neq i}} D_{ij} x_{kij}^{(2)}. \quad (1)$$

3. Ограничения.

3.1. *Первый эшелон: один тур по всем хабам с возвратом в депо.*

(1) Ровно один выход и один вход для каждого узла $i \in N_1$:

$$\sum_{\substack{j \in N_1 \\ j \neq i}} x_{ij}^{(1)} = 1, \forall i \in N_1, \sum_{\substack{j \in N_1 \\ j \neq i}} x_{ji}^{(1)} = 1, \ \forall i \in N_1$$

(2) Устранение подтуров:

Зафиксируем $u_0 = 0$ для депо $0 \in I_0$, а для хабов $h \in H$:

$$1 \leq u_h \leq |H|, \ \forall h \in H,$$

$$u_i - u_j + |H| x_{ij}^{(1)} \leq |H| - 1, \ \forall i \in H, \ \forall j \in H, \ i \neq j.$$

Это обеспечивает связность тура и исключает циклы, не содержащие депо.

(3) Баланс объемов первого эшелона:

$$\sum_{h \in H} s_h \leq Q, \ s_h \geq 0, \ \forall h \in H.$$

3.2. Второй эшелон: маршруты ТС от хабов к потребителям (*CVRP-тип*)*.*

3.2.1. *Назначение ТС по хабам.*

(4) Каждое ТС либо не используется, либо назначается ровно одному хабу:

$$\sum_{h \in H} a_{kh} \leq 1, \ \forall k \in K$$

3.2.2. *Обслуживание потребителей.*

(5) Каждый потребитель обслуживается ровно одним ТС (полное обслуживание):

$$\sum_{k \in K} y_{kc} = 1, \ \forall c \in C$$

3.2.3. Связь y_{kc} и дуг маршрута.

Для каждого ТС k и потребителя c требуем ровно один вход и один выход, если он обслуживается.

(6) Степенные ограничения на потребителях:

$$\sum_{\substack{j \in N_2 \\ j \neq c}} x^{(2)}_{kcj} = y_{kc}, \ \forall k \in K, \ \forall c \in C. \tag{2}$$

$$\sum_{\substack{i \in N_2 \\ i \neq c}} x^{(2)}_{kic} = y_{kc}, \ \forall k \in K, \ \forall c \in C. \tag{3}$$

3.2.4. *Маршрут начинается и заканчивается в выбранном хабе.*

(7) Для каждого ТС k: число выходов из хабов равно числу входов в хабы и равно факту использования ТС:

$$\sum_{h \in H} \sum_{\substack{j \in N_2 \\ j \neq h}} x^{(2)}_{khj} = \sum_{h \in H} a_{kh}, \ \forall k \in K, \tag{4}$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{\substack{i \in N_2 \\ i \neq h}} x^{(2)}_{kih} = \sum_{h \in H} a_{kh}, \ \forall k \in K. \tag{5}$$

(8) Запрещаем посещение хабов без назначения:

$$\sum_{\substack{j \in N_2 \\ j \neq h}} x^{(2)}_{khj} \leq a_{kh}, \ \forall k \in K, \ \forall h \in H,$$

$$\sum_{\substack{i \in N_2 \\ i \neq h}} x^{(2)}_{kih} \leq a_{kh}, \ \forall k \in K, \ \forall h \in H.$$

Эти ограничения делают так, что ТС k может выходить/входить только в «свой» хаб.

3.2.5. Ограничения по вместимости и устранение подтуров через поток f.

Идея: поток f_{kij} – это количество груза, перевозимого ТС k по дуге $i \to j$. Он обеспечивает вместимость (на дугах нельзя везти больше q), связность маршрута (нельзя получить отдельный цикл потребителей без хаба), доставку спросов.

(9) Вместимость на дугах:

$$0 \le f_{kij} \le q x^{(2)}_{kij},\ \forall k \in K,\ \forall i \ne j, i,\ j \in N_2.$$

(10) Баланс потока на потребителях (если потребитель обслуживается ТС k, то из потока «вычитается» d_c):

$$\sum_{\substack{i \in N_2 \\ i \ne c}} f_{kic} - \sum_{\substack{j \in N_2 \\ j \ne c}} f_{kcj} = d_c y_{kc},\ \forall k \in K,\ \forall c \in C. \quad (6)$$

(11) Стартовый поток на хабе:

Пусть хаб h выбран для ТС k. Тогда суммарный «выходящий» поток из h равен сумме спросов клиентов, обслуженных ТС k:

$$\sum_{\substack{j \in N_2 \\ j \ne h}} f_{khj} - \sum_{\substack{i \in N_2 \\ i \ne h}} f_{kih} = \sum_{c \in C} d_c y_{kc} \cdot a_{kh},\ \forall k \in k,\ \forall h \in H. \quad (7)$$

Чтобы это осталось линейным, заменяем правую часть линейной связкой через вспомогательные переменные $w_{kch} \in \{0, 1\}$, означающие «потребитель c обслужен ТС k и хаб h выбран»: $w_{kch} \le y_{kc}$, $w_{kch} \le a_{kh}$, $w_{kch} \ge y_{kc} + a_{kh} - 1$, и тогда:

$$\sum_{\substack{j \in N_2 \\ j \ne h}} f_{khj} - \sum_{\substack{i \in N_2 \\ i \ne h}} f_{kih} = \sum_{c \in C} d_c w_{kch},\ \forall k \in K,\ \forall h \in H. \quad (8)$$

3.3. Связь эшелонов: сколько завезли в хабы и сколько из них развезли.

Суммарный спрос клиентов, закрепленных за хабом h (через все ТС, стартующие в h), не должен превышать завезенный объем s_h, а при полной доставке равен ему.

(12) Баланс в хабе (полная доставка спроса):

$$s_h = \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} d_c w_{kch},\ \forall h \in H. \quad (9)$$

Тогда автоматически:

$$\sum_{h \in H} s_h = \sum_{c \in C} d_c. \quad (10)$$

И совместно с $\Sigma_h\, s_h \le Q$ получаем условие выполнимости: $\Sigma_c\, d_c \le Q$.

4. Домены переменных.

$$x^{(1)}_{ij} \in \{0,1\},\ a_{kh} \in \{0,1\},\ x^{(2)}_{kij} \in \{0,1\},\ y_{kc} \in \{0,1\},\ w_{kch} \in \{0,1\},$$

$$s_h \ge 0,\ \ f_{kij} \ge 0, u_0 = 0,\ 1 \le u_h \le |H|.$$

Результаты исследования. Экспериментальные исследования были направлены на проверку корректности предложенной двухэшелонной модели транспортировки, а также на анализ структуры оптимальных решений, формируемых в условиях сложной транспортной сети с транзитными вершинами.

В качестве тестового примера использован транспортный граф, построенный на основе реальной инфраструктуры Приморского края – региона с развитой лесной промышленностью. Вершины графа соответствуют реальным объектам: депо, хабам, потребителям и транзитным узлам; рёбра – существующим автомобильным и железнодорожным маршрутам (рис. 1). Веса рёбер определены как длины кратчайших путей, что позволяет точно учитывать топологию сети.

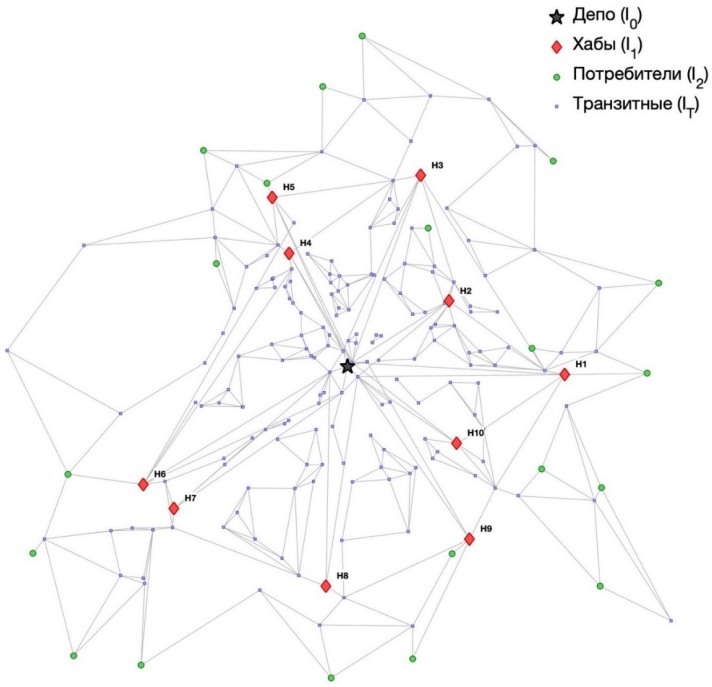


Рис. 1. Визуализация распределения депо, хабов, потребителей, транзитных пунктов и их смежность

Fig. 1. Visualization of the distribution of depots, hubs, consumers, transit points and their adjacency

Параметры тестового примера, используемого для апробации модели, приведены в табл. 1. Транспортный граф построен на основе реальной инфраструктуры Приморского края и содержит около 150 вершин, включая 1 депо, 10 хабов (H1–H10), 20 потребителей и около 120 транзитных вершин. Вместимость транспортного средства второго эшелона составляет $q = 80$ единиц, что обеспечивает необходимость использования нескольких ТС для полного удовлетворения суммарного спроса (730,0 единиц).

Таблица 1

Параметры экспериментальной постановки

Parameters of the experimental setup

Параметр	Значение
Число вершин графа $G = (V, E)$	≈ 150
Депо (I_0)	1
Хабы (I_1)	10 (H1–H10)
Потребители (I_2)	20
Транзитные вершины ($I_т$)	≈ 120
Вместимость 1-го эшелона (Q)	≥ 730
Вместимость ТС 2-го эшелона (q)	80
Число доступных ТС (m)	10
Суммарный спрос потребителей	730,0

Результаты решения задачи суммированы в табл. 2. Оптимальное значение целевой функции составило $Z^* = 1619{,}0$, при этом стоимость маршрута первого эшелона равна 247,4 (15,3% от общей стоимости), а суммарная стоимость маршрутов второго эшелона – 1371,6 (84,7%). Такое соотношение характерно для двухэшелонных систем: магистральный маршрут формирует единый замкнутый цикл по хабам, тогда как распределительные маршруты суммарно покрывают значительно большее число дуг графа, обслуживая 20 потребителей с различным пространственным размещением.

Полное удовлетворение спроса (730,0 из 730,0 единиц, 100%) и отсутствие необслуженных потребителей подтверждают корректность балансовых ограничений модели: объём, доставленный в каждый хаб на первом эшелоне (s_h), в точности соответствует суммарному спросу прикреплённых к нему потребителей, а суммарный объём доставки не превышает вместимости первого эшелона Q.

Детализация маршрутов второго эшелона представлена в табл. 3. Каждое транспортное средство стартует из назначенного хаба, обслуживает прикреплённых потребителей и возвращается обратно. Стоимость каждого

маршрута рассчитана на основе кратчайших путей в исходном транспортном графе *G*, что обеспечивает точный учёт реальной инфраструктуры, включая транзитные вершины.

Таблица 2

Сводные результаты оптимизации

Summary optimization results

Показатель	Значение
Общая стоимость (*Z**)	1619,0
Стоимость 1-го эшелона	247,4 (15,3%)
Стоимость 2-го эшелона	1371,6 (84,7%)
Использовано ТС 2-го эшелона	10 из 10
Обслужено потребителей	20 из 20 (100%)
Доставлено единиц продукции	730,0 из 730,0 (100%)
Необслуженные потребители	0

Таблица 3

Характеристики маршрутов ТС второго эшелона

Route characteristics of second echelon vehicles

Номер ТС	Число потребителей	Объём доставки	Стоимость маршрута
ТС 1	2	79,0	98,4
ТС 2	2	70,0	162,6
ТС 3	2	72,0	129,6
ТС 4	2	80,0	143,8
ТС 5	2	80,0	192,7
ТС 6	2	75,0	54,5
ТС 7	3	77,0	317,6
ТС 8	2	71,0	61,6
ТС 9	1	54,0	57,4
ТС 10	2	72,0	153,5
Итого	20	730,0	1371,6

Анализ данных табл. 3 позволяет выявить ряд закономерностей. Объём доставки каждого ТС не превышает вместимости q = 80, что подтверждает выполнение ограничений по вместимости (ограничение 9). При этом наблюдается существенная дифференциация стоимости маршрутов – от 54,5 (ТС 6) до 317,6 (ТС 7). Наиболее затратный маршрут ТС 7 обслуживает 3 потребителей, что указывает на их значительную пространственную разнесённость в графе и необходимость прохождения через множество транзитных

вершин. Напротив, ТС 6 и ТС 8 демонстрируют наименьшую стоимость (54,5 и 61,6 соответственно), что свидетельствует о компактном расположении обслуживаемых потребителей относительно хабов.

Средняя стоимость на единицу доставленной продукции для второго эшелона составляет 1371,6 / 730,0 ≈ 1,88, что характеризует удельную транспортную нагрузку распределительного этапа. Данный показатель может быть использован при сравнении эффективности различных конфигураций хабов.

Визуализация решения представлена на рис. 2, где синим цветом отображён маршрут первого эшелона (замкнутый цикл через все хабы), а оранжевым – маршруты второго эшелона. Маршрут первого эшелона проходит через транзитные вершины транспортного графа, что подтверждает корректную интеграцию сетевой топологии в процедуру оптимизации: стоимость дуг определяется длинами кратчайших путей в графе G, а не евклидовыми расстояниями.

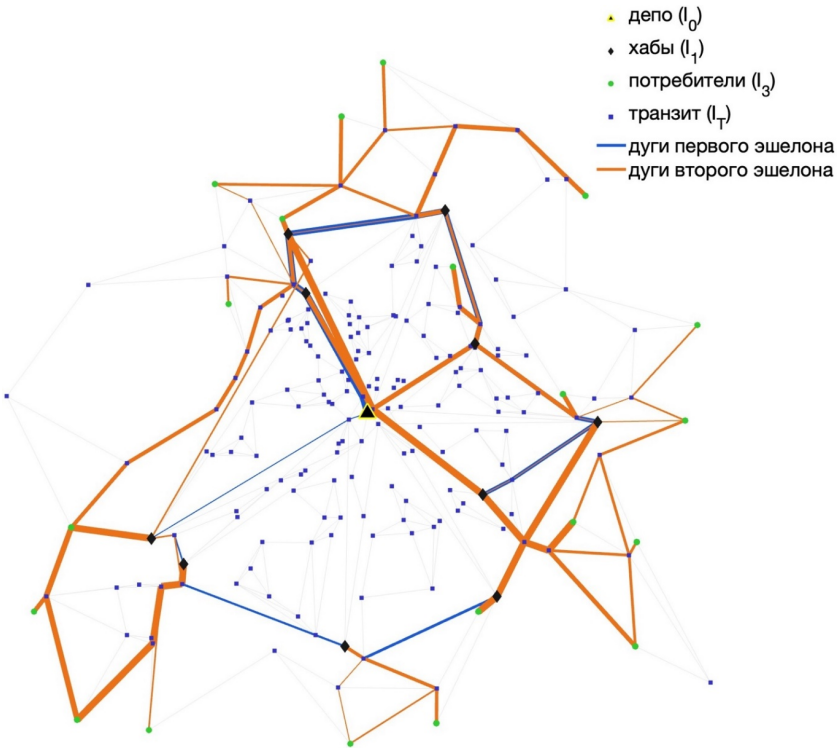


Рис. 2. Визуализация графа решения поставленной задачи
Fig. 2. Visualization of the solution graph for the given problem

Заключение. Разработана и исследована двухэшелонная модель транспортной логистики лесопромышленного комплекса, ориентированная на согласованную оптимизацию магистральных и распределительных перевозок с учётом реальной топологии транспортной инфраструктуры. В отличие от традиционных подходов, использующих укрупнённые схемы расстояний и агрегированные представления транспортной сети, предложенная модель основывается на графовом описании инфраструктуры с явным включением транзитных вершин, что позволяет более адекватно отражать реальные условия функционирования логистических систем лесопромышленного комплекса.

Ключевой научный результат исследования заключается в формализации двухэшелонной транспортной задачи, в которой различная логистическая природа эшелонов сохранена и учтена в рамках единой оптимизационной постановки. Первый эшелон моделируется как задача маршрутизации с обязательным охватом заданного множества распределительных пунктов, тогда как второй эшелон описывает распределение потоков от хабов к конечным потребителям с ограничениями по вместимости транспортных средств и полному удовлетворению спроса.

Результаты вычислительных экспериментов на транспортном графе Приморского края (≈150 вершин, 10 хабов, 20 потребителей) подтверждают корректность предложенной модели. Оптимальное значение целевой функции составило $Z^* = 1619{,}0$, из которых 247,4 (15,3%) приходится на магистральный маршрут первого эшелона и 1371,6 (84,7%) – на распределительные маршруты второго эшелона. Достигнуто полное удовлетворение спроса всех 20 потребителей (730,0 единиц, 100%), при этом стоимость каждого маршрута рассчитана на основе кратчайших путей в исходном транспортном графе. Показано, что оптимальные маршруты формируются с учётом инфраструктурных узлов, не являющихся логистическими объектами, но существенно влияющих на структуру перевозок. Выявлена значительная дифференциация стоимости маршрутов второго эшелона (от 54,5 до 317,6), обусловленная различиями в пространственном размещении потребителей относительно хабов и структурой транспортного графа.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Рогулин Р.С. Математическая модель формирования цепочек поставок сырья с товарно-сырьевой биржи в условиях неопределенности // Бизнес-информатика. 2023. Т. 17, №4. С. 41–56. DOI: 10.17323/2587-814X.2023.4.41.56.

Рогулин Р.С. Модель формирования цепочки поставок и управления ценовой политикой лесопромышленного предприятия // Бизнес-информатика. 2024. Т. 18, №4. С. 98–111. DOI: 10.17323/2587-814X.2024.4.98.111.

Albalawi H., *Zaid S.A.*, *El-Shimy M.E.*, *Kassem A.M.* Ant Colony Optimized Controller for Fast Direct Torque Control of Induction Motor // Sustainability. 2023. Vol. 15. Art. no. 3740. DOI: 10.3390/su15043740.

Aryza S., *Efendi S.*, *Sihombing P.*, *Sawaluddin.* A robust optimization to dynamic supplier decisions and supply allocation problems in the multi-retail industry // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. Vol. 3, no. 3. P. 67–73. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.305111.

Chen G., *Gao J.*, *Chen D.* Research on Vehicle Routing Problem with Time Windows Based on Improved Genetic Algorithm and Ant Colony Algorithm // Electronics. 2025. Vol. 14. Art. no. 647. DOI: 10.3390/electronics14040647.

Deliktaş D., *Karagoz S.*, *Simić V.*, *Aydin N.* A stochastic Fermatean fuzzy-based multi-choice conic goal programming approach for sustainable supply chain management in end-of-life buildings // Journal of Cleaner Production. 2023. Vol. 382. Art. no. 135305. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.135305.

He S.H. Coordination of production planning in multi- echelon supply chains: a simulation approach // International Journal of Simulation Modelling. 2024. Vol. 23, iss. 4. P. 728–739. DOI: 10.2507/IJSIMM23-4-CO20.

Helo P., *Rouzafzoon J.* An agent-based simulation and logistics optimization model for managing uncertain demand in forest supply chains // Supply Chain Analytics. 2023. Vol. 2. Art. no. 100042. DOI: 10.1016/j.sca.2023.100042.

Nunes L.J.R. The Role of Artificial Intelligence (AI) in the Future of Forestry Sector Logistics // Future Transportation. 2025. Vol. 5. Art. no. 63. DOI: 10.3390/futuretransp5020063.

Shehab W.A.-A., *Muhsan H.*, *Alrikabi B.*, *Abdul-Razaq A.-A.*, *Nasser H.K.*, *Hameed A.S.* Comparative Analysis of New Solutions for the Capacitated Vehicle Routing Problem Against CVRPLIB Benchmark // International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering. 2024. Vol. 10, no. 4. P. 1450–1457. DOI: 10.22399/ijcesen.626.

Sun Y., *Zhang C.*, *Sun G.* An Interval Fuzzy Programming Approach to Solve a Green Intermodal Routing Problem for Timber Transportation Under Uncertain Information // Forests. 2024. Vol. 15. Art. no. 2003. DOI: 10.3390/f15112003.

Zoran I., *Drašković D.* Classification of vehicle routing problem // Journal of traffic and transport theory and practice. 2024. Vol. 12, iss. 1. P. 36-41.

References

Albalawi H., *Zaid S.A.*, *El-Shimy M.E.*, *Kassem A.M.* Ant Colony Optimized Controller for Fast Direct Torque Control of Induction Motor. *Sustainability*, 2023, vol. 15, art. no. 3740. DOI: 10.3390/su15043740.

Aryza S., *Efendi S.*, *Sihombing P.*, *Sawaluddin.* A robust optimization to dynamic supplier decisions and supply allocation problems in the multi-retail industry. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2024, vol. 3, no. 3, pp. 67–73. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.305111.

Chen G., *Gao J.*, *Chen D.* Research on Vehicle Routing Problem with Time Windows Based on Improved Genetic Algorithm and Ant Colony Algorithm. *Electronics*, 2025, vol. 14, art. no. 647. DOI: 10.3390/electronics14040647.

Deliktaş D., *Karagoz S.*, *Simić V.*, *Aydin N.* A stochastic Fermatean fuzzy-based multi-choice conic goal programming approach for sustainable supply chain management in end-of-life buildings. *Journal of Cleaner Production*, 2023, vol. 382, art. no. 135305. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.135305.

He S.H. Coordination of production planning in multi- echelon supply chains: a simulation approach. *International Journal of Simulation Modelling*, 2024, vol. 23, iss. 4, pp. 728-739. DOI: 10.2507/IJSIMM23-4-CO20.

Helo P., *Rouzafzoon J.* An agent-based simulation and logistics optimization model for managing uncertain demand in forest supply chains. *Supply Chain Analytics*, 2023, vol. 2, art. no. 100042. DOI: 10.1016/j.sca.2023.100042.

Nunes L.J.R. The Role of Artificial Intelligence (AI) in the Future of Forestry Sector Logistics. *Future Transportation*, 2025, vol. 5, art. no. 63. DOI: 10.3390/futuretransp5020063.

Rogulin R.S. Mathematical model for the formation of supply chains of raw materials from the commodity exchange under risk based on the profit trajectory for previous periods redundancy. *Business Informatics*, 2023, vol. 17, no. 4, pp. 41–56. (In Russ.)

Rogulin R.S. Management of pricing policy of a timber enterprise considering the problems of formation of raw material supply chains and determining production volumes. *Business Informatics*, 2024, vol. 18, no. 4, pp. 98–111. (In Russ.)

Shehab W.A.-A., *Muhsan H.*, *Alrikabi B.*, *Abdul-Razaq A.-A.*, *Nasser H.K.*, *Hameed A.S.* Comparative Analysis of New Solutions for the Capacitated Vehicle Routing Problem Against CVRPLIB Benchmark. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*, 2024, vol. 10, no. 4, pp. 1450-1457. DOI: 10.22399/ijcesen.626.

Sun Y., *Zhang C.*, *Sun G.* An Interval Fuzzy Programming Approach to Solve a Green Intermodal Routing Problem for Timber Transportation Under Uncertain Information. *Forests*, 2024, vol. 15, art. no. 2003. DOI: 10.3390/f15112003.

Zoran I., *Drašković D.* Classification of vehicle routing problem. *Journal of traffic and transport theory and practice*, 2024, vol. 12, iss. 1, pp. 36-41.

Материал поступил в редакцию 16.12.2025

Рогулин Р.С. Линейная модель двухэшелонной транспортировки в лесопромышленном комплексе на транспортном графе с транзитными вершинами // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2026. Вып. 259. С. 260–275. DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.260-275

В статье разработана математическая модель для оптимизации двухэшелонной транспортной логистики в лесопромышленном комплексе, где процесс доставки разделён на магистральные перевозки от предприятия к хабам и последующую дистрибуцию к потребителям. Ключевая особенность модели – представление транспортной инфраструктуры в виде взвешенного ориентированного графа, включающего не только пункты отправления, перевалки и назначения, но и транзитные вершины, соответствующие узлам дорожной сети (развязки, станции, промежуточные пункты). Такое представление позволяет рассчитывать стоимость маршрутов на основе кратчайших путей в графе, учитывая реальную топологию сети, в отличие от упрощённых подходов с агрегированными расстояниями. Модель формализуется как задача смешанного целочисленного линейного программирования (MILP) с балансовыми ограничениями, связывающими объёмы грузов между эшелонами, ограничениями по вместимости транспортных средств и полному удовлетворению спроса потребителей. Апробация модели проведена на транспортном графе Приморского края, включающем около 150 вершин, 10 хабов и 20 потребителей. Оптимальное значение целевой функции составило 1619,0 условных единиц, из которых 15,3% приходится на магистральный эшелон и 84,7% – на распределительный. Достигнуто полное удовлетворение спроса всех потребителей (730,0 единиц). Стоимость маршрутов второго эшелона варьируется от 54,5 до 317,6, отражая пространственную неоднородность размещения потребителей. Результаты подтверждают корректность модели и демонстрируют формирование согласованных маршрутов, явно учитывающих транзитные узлы инфраструктуры. Предложенный подход применим для планирования перевозок в лесной и других отраслях с пространственно распределённой инфраструктурой.

Ключевые слова: двухэшелонная транспортная задача, муравьиный алгоритм, транспортный граф, лесопромышленный комплекс, логистика.

Rogulin R.S. Linear Model of Two-Echelon Transportation in the Forest Industry on a Transport Graph with Transit Nodes. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2026, iss. 259, pp. 260–275 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.260-275

This paper develops a mathematical model for optimizing two-echelon transport logistics in the forest industry, where the delivery process is divided into mainline transportation from an enterprise to hubs and subsequent distribution to consumers. The key feature of the model is the representation of the transport infrastructure as a weighted graph that includes not only departure, transshipment, and destination points, but also transit vertices representing road network nodes. This enables route cost calculation based on shortest paths in the graph, accounting for the real network topology, unlike simplified approaches using aggregated distances. The model is

formalized as a mixed-integer linear programming problem (MILP) with balance constraints linking cargo volumes between echelons and vehicle capacity constraints. The model was tested on a transport graph of Primorsky Krai comprising approximately 150 vertices, 10 hubs, and 20 consumers. The optimal objective function value was 1619.0 cost units, with 15.3% attributed to the mainline echelon and 84.7% to the distribution echelon. Full demand satisfaction was achieved for all consumers (730.0 units). Second-echelon route costs ranged from 54.5 to 317.6, reflecting spatial heterogeneity in consumer distribution relative to hubs and the graph structure. The results confirm the model's correctness and demonstrate coordinated route formation that explicitly accounts for transit infrastructure nodes. The proposed approach is applicable to transportation planning in forestry and other industries with spatially distributed infrastructure.

K e y w o r d s : two-echelon transport problem, ant colony algorithm, transport graph, forestry complex, logistics.

РОГУЛИН Родион Сергеевич – старший научный сотрудник кафедры технологий управления Института экономики Новгородского государственного университета имени Ярослава Мудрого, кандидат экономических наук. SPIN-код: 4125-0948. ORCID: 0000-0002-3235-6429.

173003, ул. Большая Санкт-Петербургская, д. 41, г. Великий Новгород, Новгородская область, Россия. E-mail: rafassiaofusa@mail.ru

ROGULIN Rodion S. – PhD (Economics), Senior Researcher, Department of Management Technologies, Institute of Economics, Yaroslav-the-Wise Novgorod State University. SPIN-code: 4125-0948. ORCID: 0000-0002-3235-6429.

173003. Bolshaya Sankt-Peterburgskaya str. 41. Veliky Novgorod. Novgorod Region. Russia. E-mail: rafassiaofusa@mail.ru

УДК 004.94: 630.3

Т.А. Гилязова, К.П. Рукомойников

УЧЕТ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ И НЕДОСТУПНОСТИ ДЕРЕВЬЕВ В АГЕНТНОЙ МОДЕЛИ ВАЛОЧНО-ПАКЕТИРУЮЩЕЙ МАШИНЫ ДЛЯ НЕСПЛОШНЫХ РУБОК

Введение. Современное лесопользование всё чаще обращается к выборочным и постепенным рубкам [Чайка, Журавлев, 2022; Белов и др., 2025], которые позволяют сохранить экологические функции леса и обеспечить его непрерывное воспроизводство. Однако механизация таких рубок сопряжена с рядом принципиальных трудностей [Каляшов, Смирнова, 2008; Гасымов, 2009; Бурмистрова и др., 2010; Чайка, 2018], отсутствующих при сплошных рубках. Главная из них заключается в том, что на лесосеке одновременно присутствуют два типа деревьев – целевые (подлежащие рубке) и оставляемые на доращивание. Оставляемые деревья выступают не как пассивные элементы среды, а как активные технологические препятствия, ограничивающие маневренность валочно-пакетирующей машины (ВПМ) [Грязин, Багаутдинов, 2008; Мамматов и др., 2018; Андронов и др., 2021], доступность целевых деревьев для захватно-срезающего устройства (ЗСУ) и возможность поворота платформы при наведении на дерево или при укладке сформированной пачки [Гасымов, Александров, 2008; Мохирев и др., 2018]. Анализ литературных источников [Матвейко, 1989; Сидыганов и др., 2008; Андронов, Зверев, 2020; Богданов, 2024] показывает, что существующие методы нормирования труда и оценки производительности лесосечных машин, разработанные преимущественно для сплошных рубок, не учитывают эти кинематические ограничения. В работах, посвященных агентному моделированию лесозаготовительных процессов, основное внимание уделяется логистическим и транспортным задачам [Соколов, Осипов, 2018; Соколов, 2023], тогда как поведение отдельной машины в пространстве с «непрозрачными» препятствиями (оставляемыми деревьями) проработано недостаточно. Попытки аналитического описания доступности деревьев при выборочных рубках сталкиваются с комбинаторной сложностью: взаимное расположение целевого дерева, оставляемых деревьев, текущее положение ВПМ и кинематическая схема манипулятора образуют множество вариантов, каждый из которых требует отдельной проверки [Рукомойников и др., 2025; Sergeeva et al., 2024]. Таким образом, актуальность

исследования определяется необходимостью создания имитационного инструмента, который позволяет на этапе проектирования лесосечных работ оценивать долю доступных для рубки деревьев с учетом реальных кинематических ограничений ВПМ и пространственного распределения оставляемых деревьев. Целью настоящего исследования является разработка и алгоритмическая реализация имитационной модели, учитывающей кинематические ограничения поворота платформы ВПМ и механизм идентификации недоступных деревьев при выборочных и постепенных рубках. Для достижения цели решались следующие задачи: создание многоагентной структуры, включающей агенты «вырубаемые деревья», «остающиеся деревья», «подлесок» и «недоступные деревья»; разработка алгоритма пошаговой расчистки волока с дискретизацией расстояния; реализация процедур проверки доступности дерева с учетом неустранимых препятствий на всей траектории движения ЗСУ; учет кинематических ограничений при повороте платформы как при наведении на растущее дерево, так и при укладке сформированной пачки на волоке.

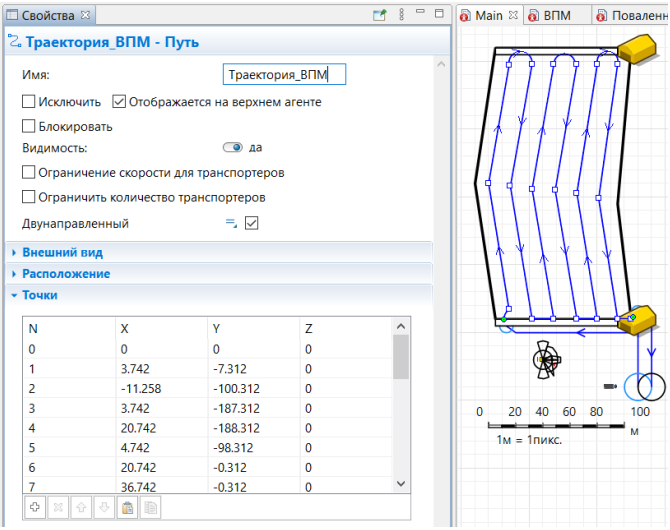


Рис. 1. Технологическая схема разработки делянки

Условные обозначения: — граница делянки; – погрузочный пункт; – магистральный волок; – траектория движения ВПМ

Fig. 1. Technological scheme of cutting area development

Symbols: — boundary of the plot; – loading point; – main skidding portage; – the trajectory of the fulling and packing machine

Материалы и методика исследования. В качестве основного метода имитации работы ВПМ в течение рабочей смены принято агентное моделирование, реализованное в среде AnyLogic. Агентный подход позволяет исследовать децентрализованные системы, где поведение на макроуровне формируется из множества индивидуальных решений автономных агентов. Разработанная авторами имитационная модель позволяет на этапе инициализации задавать границы лесосеки путем ввода координат поворотных точек, что дает возможность моделировать делянки любой геометрической формы. Траектория движения ВПМ, включая магистральные волоки, пасечные волоки и технологические коридоры, также может иметь произвольную конфигурацию и задается либо вводом координат, либо графическим редактированием (рис. 1). Для визуализации процесса используется трехмерный режим симуляции (рис. 2.).

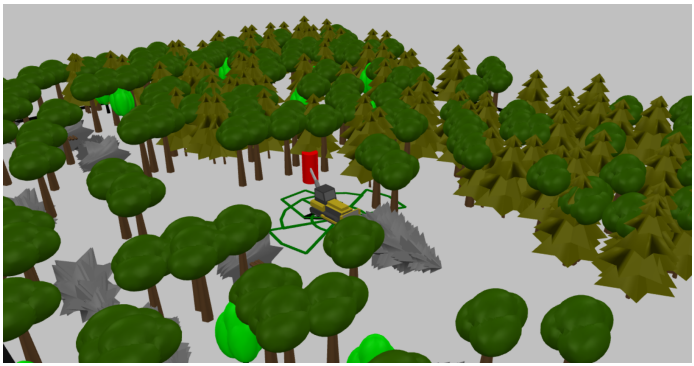


Рис. 2. 3D симуляция в программе имитационного моделирования
Fig. 2. 3D simulation in the simulation program

В модели реализована многоагентная структура, включающая следующие типы агентов: «Вырубаемые деревья» – целевой компонент древостоя, назначенный в рубку; «Остающиеся деревья» – деревья нецелевого компонента, сохраняемые на доращивание; «Подлесок» – низкорослые древесные породы, не представляющие товарной ценности, но создающие технологические помехи; «Недоступные деревья» – деревья целевого компонента, которые с текущей рабочей позиции не могут быть свалены из-за наличия неустранимых препятствий или кинематических ограничений. Для каждого типа агентов предусмотрены окна ввода параметров. Исследователь задает породный состав, диаметр ствола, на основе которого по статистическим зависимостям автоматически рассчитываются объем, высота и коэффициент формы. Численность каждого типа деревьев на всей лесосеке также задается

исследователем. Распределение всех агентов-деревьев по площади делянки осуществляется случайным образом при каждом запуске модели. Технические характеристики ВПМ, вводимые перед началом имитации, включают ширину машины, скорости перемещения на лесосеку и между рабочими позициями, эффективный и минимальный вылет ЗСУ, скорости прямолинейного и углового движения манипулятора, производительность чистого пиления, а также указание на наличие или отсутствие накопителя в составе ЗСУ.

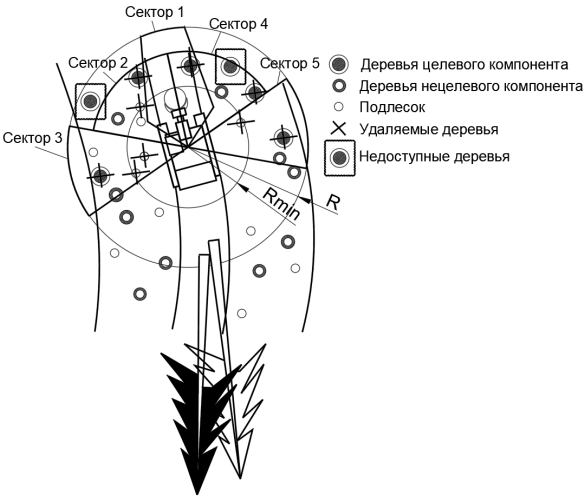


Рис. 3. Разделение рабочей зоны на секторы
Fig. 3. Division of the working area into sectors

Вся рабочая зона перед ВПМ и по бокам от нее разделяется на пять последовательно осваиваемых секторов (рис. 3**)**. В первом секторе (непосредственно перед машиной по ходу движения) вырубаются все деревья: целевые, остающиеся и подлесок – поскольку расчистка пути является обязательным условием движения. В остальных секторах вырубаются только деревья целевого компонента и подлесок, тогда как остающиеся деревья рассматриваются как неустранимые препятствия, ограничивающие доступность целевых деревьев. Ключевым элементом модели является пошаговый алгоритм расчистки волока (рис. 4), при котором расстояние от ВПМ до анализируемого препятствия разделяется на дискретные участки, на каждом из которых последовательно удаляются все обнаруженные деревья целевого компонента и подлесок. Оценка доступности конкретного дерева целевого компонента выполняется аналогичным образом: вся траектория движения

ЗСУ от ВПМ до дерева дискретизируется, и, если на любом шаге обнаруживается дерево нецелевого компонента, целевое дерево признается недоступным с данной рабочей позиции и переводится в категорию агента «недоступные деревья». При смене рабочей позиции все деревья из этой категории возвращаются в пул доступных для повторной оценки.

Рис. 4. Визуализация пошагового алгоритма работы при расчистке рабочих позиций. $D_в$, $D_о$, $D_п$ – соответственно, диаметры деревьев целевого, нецелевого компонента и подлеска, м.

Fig. 4. Visualization of a step-by-step algorithm for clearing working positions. $D_в$, $D_о$, $D_п$ – diameters of trees of target and non-target component, and undergrowth, respectively, m

Особое место в модели занимает учет кинематических ограничений поворота платформы ВПМ. При наведении ЗСУ на растущее дерево проверяются две зоны (рис. 5a) – зона движения манипулятора по минимальному радиусу поворота (ограниченная точками MM"F) и зона движения корпуса ВПМ при повороте платформы (ограниченная точками RL'F). Если в любой из этих зон обнаруживается дерево (целевое, остающееся или подлесок), наведение считается невозможным, и дерево признается недоступным. Аналогичная проверка выполняется при укладке поваленного дерева или накопленной группы деревьев на волок позади ВПМ (рис. 5b). Если в

указанных секторах присутствуют препятствия, модель предусматривает корректировку рабочей позиции: ВПМ перемещается задним ходом с одновременным вертикальным выносом спиленного дерева в новую точку рабочего пространства (рис. 6).

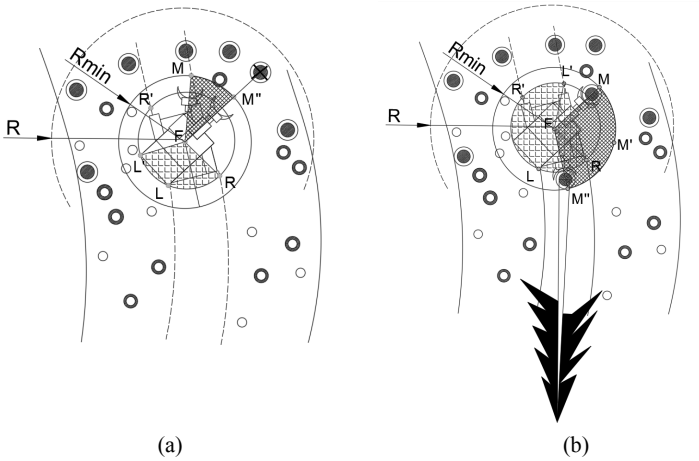


Рис. 5. Проверка возможности беспрепятственного поворота платформы: (a) при наведении захватно-срезающего устройства на дерево; (b) при укладке дерева позади машины на волок

Fig. 5. Checking the possibility of unhindered rotation of the platform: (a) when pointing the gripper-cutting device at a tree; (b) when laying wood behind the machine on the portage

Результаты исследования. В результате выполненной работы разработана имитационная модель, позволяющая на этапе инициализации задавать произвольную геометрию делянки и любую траекторию движения ВПМ, включая магистральные волоки, пасечные волоки и технологические коридоры, с визуализацией в 2D и 3D режимах. Реализована многоагентная структура, включающая четыре типа агентов: «вырубаемые деревья», «остающиеся деревья», «подлесок» и «недоступные деревья». Для каждого типа предусмотрено задание породного состава, размерных характеристик и численности, причем распределение деревьев по площади делянки осуществляется случайным образом, что обеспечивает адаптацию модели к любым лесорастительным условиям.

Разработан и алгоритмически реализован пошаговый метод расчистки волока с дискретизацией расстояния до препятствия, позволяющий последовательно удалять все деревья целевого компонента и подлесок на пути

движения ВПМ. Создан механизм оценки доступности дерева целевого компонента с рабочей позиции, который учитывает наличие деревьев нецелевого компонента на всей траектории движения ЗСУ. Деревья, признанные недоступными, переводятся в отдельную категорию агентов, а при смене рабочей позиции возвращаются в пул доступных для повторной оценки.

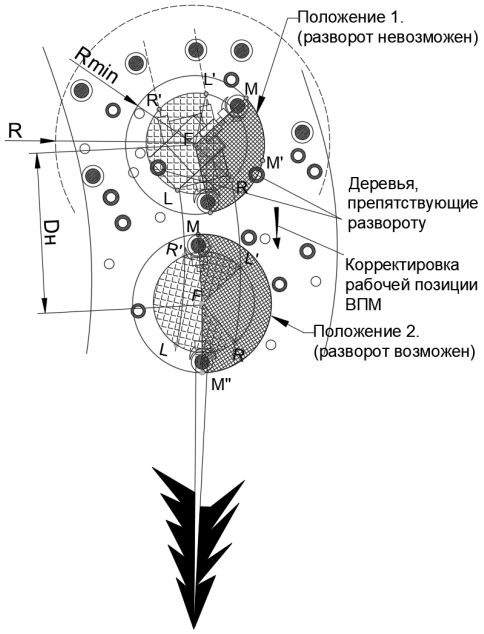


Рис. 6. Корректировка рабочей позиции
для беспрепятственного поворота платформы
валочно-пакетирующей машины

Fig. 6. Adjustment of the working position
for unhindered rotation of the fulling machine platform

Введен и реализован учет кинематических ограничений двух типов. Первый тип связан с поворотом платформы ВПМ при наведении ЗСУ на растущее дерево: проверяются зона движения манипулятора по минимальному радиусу поворота и зона движения корпуса машины. Второй тип связан с поворотом платформы при укладке поваленного дерева в формируемую пачку на волоке позади машины. Для случаев, когда в этих зонах обнаруживаются препятствия, предусмотрена корректировка рабочей позиции задним

ходом с вертикальным выносом поваленного дерева. Все перечисленные алгоритмы апробированы в среде AnyLogic и показали работоспособность для делянок различной конфигурации и при различных схемах движения ВПМ.

Обсуждение. Полученные результаты позволяют по-новому подойти к проблеме нормирования труда при выборочных и постепенных рубках. Традиционные аналитические методы, основанные на средних значениях расстояния трелевки и средних запасах на гектар, не могут учесть, какая доля целевых деревьев окажется недоступной из-за кинематических ограничений и оставляемых деревьев. Разработанная модель объединяет в одном инструменте три критически важных аспекта: пространственное распределение агентов-деревьев, пошаговую оценку доступности с дискретизацией траектории, проверку кинематической возможности поворота платформы. Принципиальным отличием от существующих подходов является введение категории «недоступные деревья» с возможностью их повторной оценки после смены рабочей позиции. Это отражает реальную практику: оператор ВПМ, переместившись вдоль волока, может получить доступ к дереву, которое ранее было заслонено оставляемым стволом. Предложенный механизм дискретизации расстояния при расчистке волока и оценке доступности имитирует последовательный обзор пространства оператором, который не может видеть «сквозь» деревья. Следует отметить, что в настоящей работе не рассматривались временные характеристики выполнения операций цикла валки и пакетирования, а также влияние накопителя ЗСУ на производительность. Эти аспекты требуют отдельного исследования с использованием дополненной модели, включающей временные зависимости. Также за рамками работы остались вопросы оптимизации траектории движения ВПМ при заданной конфигурации оставляемых деревьев – это может стать направлением дальнейших исследований. Ограничением модели является предположение о статичности оставляемых деревьев (они не удаляются и не перемещаются в процессе работы), что соответствует технологии выборочных рубок, но может быть пересмотрено для других видов рубок. Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что модель позволяет на этапе проектирования лесосечных работ оценивать реальную доступность запаса древесины с учетом конкретной схемы движения ВПМ и расположения оставляемых деревьев, что дает возможность корректировать нормативы выработки еще до выхода техники на лесосеку.

Заключение. В результате исследования разработана имитационная модель, позволяющая задавать на этапе инициализации любые сочетания породного состава, количественных и размерных характеристик вырубаемых

и оставляемых деревьев, а также подлеска, с распределением всех агентов-деревьев по площади делянки случайным образом. Реализована многоагентная структура, включающая агентов «вырубаемые деревья», «остающиеся деревья», «подлесок», «недоступные деревья» с возможностью перевода деревьев из категории недоступных в доступные при смене рабочей позиции; в модели реализован пошаговый алгоритм расчистки волока с дискретизацией расстояния до препятствия. Введен и алгоритмически реализован учет кинематических ограничений поворота платформы ВПМ при наведении ЗСУ на растущее дерево и при укладке поваленного дерева в формируемую пачку, включая возможность корректировки рабочей позиции задним ходом с вертикальным выносом поваленного дерева. Предусмотрена возможность задания произвольной геометрии делянки и любой траектории движения ВПМ с визуализацией в 2D и 3D режимах. Предложенная модель создает основу для последующей оценки временных затрат и производительности ВПМ, которая должна выполняться с использованием дополненного алгоритма, включающего временные зависимости операций захвата, спиливания, накопления и укладки деревьев.

Вклад авторов. Гилязова Т.А. – 55%; Рукомойников К.П. – 45%.

Сведения о финансировании исследования. Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 26-16-00106, https://rscf.ru/project/26-16-00106/

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Андронов А.В., *Зверев И.А.* Исследование параметров, определяющих значение сменной производительности валочно-пакетирующих машин // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020. Выпю 233. С. 126-138. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.233.126-138.

Андронов А.В., *Зверев И.А.*, *Михайлов О.А.*, *Тарадин Г.С.* Модель определения времени наведения захватно-срезающего устройства валочно-пакетирующих машин на растущее дерево // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2021. Вып. 237. С. 183-195. DOI: 10.21266/2079-4304.2021.237.183-195.

Белов Л.А., *Башегуров К.А.*, *Безденежных И.В.*, *Залесов С.В.*, *Итешина Н.М.* Лесоводственная эффективность использования валочно-пакетирующей машины ЛП-19 при проведении чересполосных постепенных рубок в производных березняках // Лесной вестник. 2025. Т. 29, №2. С. 18-29.

Богданов Е.Н. Повышение производительности валочно-пакетирующей машины типа ЛП-19 за счёт совершенствования траектории движения рабочего органа // Resources and Technology. 2024. Т. 21, №1. С. 26-39. DOI: 10.15393/j2.art.2024.7564.

Бурмистрова О.Н., *Шоль Н.Р.*, *Травин Н.Н.* Методика экспериментальных исследований валочно-пакетирующей машины // Вестник Московского государственного университета леса. 2010. №5. С. 101-102.

Гасымов Г.Ш. Оценка возможности применения валочно-пакетирующих машин для ведения постепенных и выборочных рубок леса с позиции нагруженности // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2009. Вып. 188. С. 147-155.

Гасымов Г.Ш., *Александров В.А.* Компоновочно-кинематические схемы валочно-пакетирующих машин для ведения постепенных и выборочных рубок леса // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2008. Вып. 184. С. 71-79.

Грязин В.А., *Багаутдинов И.Н.* Оценка энергоемкости работы валочно-пакетирующих машин // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2008. Вып. 185. С. 109-114.

Каляшов В.А., *Смирнова А.И.* Исследование эффективности технологических процессов лесосечных работ с применением валочно-пакетирующих машин // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2008. Вып. 184. С. 103-111.

Маматов В.О., *Мохирев А.П.*, *Медведев С.О.*, *Ившина А.В.* Анализ технологических параметров валочно-пакетирующей машины при различных природных условиях // Инженерный вестник Дона. 2018. №2 (49). С. 75.

Матвейко А.П. Расчет производительности валочных и валочно-пакетирующих машин // ИВУЗ. Лесной журнал. 1989. №4. С. 36-38.

Мохирев А.П., *Григорьев И.В.*, *Куницкая О.А.*, *Григорьева О.И.*, *Войнаш С.А.* Совершенствование конструкции полноповоротных лесозаготовительных машин на экскаваторных базах // Строительные и дорожные машины. 2018. №6. С. 43-49.

Рукомойников К.П., *Сергеева Т.В.*, *Гилязова Т.А.*, *Царев Е.М.*, *Комисар В.П.* Имитационное моделирование технологических процессов лесозаготовки // ИВУЗ. Лесной журнал. 2025. №1. С. 145-163.

Сидыганов Ю.Н., *Онучин Е.М.*, *Ласточкин Д.М.*, *Шемякин А.В.* Математическое моделирование работы малогабаритной валочно-пакетирующей машины // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2008. Вып. 185. С. 123-133.

Соколов А.П. Имитационное моделирование процессов заготовки древесины // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. Вып. 245. С. 244-260. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.245.244-260.

Соколов А.П., *Осипов Е.В.* Обоснование технологии заготовки древесины с помощью имитационного моделирования на сетях Петри // Лесотехнический журнал. 2018. Т. 8, №1 (29). С. 111-119. DOI: 10.12737/article_5ab0dfc0247508.69266095.

Чайка О.Р. Моделирование работы валочно-пакетирующей машины на несплошных рубках леса // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2018. Т. 6, №4 (40). С. 223-226.

Чайка О.Р., *Журавлев В.В.* Обоснование параметров валочно-пакетирующих машин для рубок ухода в искусственных лесных насаждениях // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2022. №7. С. 25-29.

Sergeeva T., *Gilyazova T.*, *Rukomojnikov K.* Simulation modeling of time for moving a fallen tree by harvester to the zone of its bucking // European Journal of Forest Engineering. 2024. Vol. 10, no. 2. P. 142-148. DOI: 10.33904/ejfe.1457710.

References

Andronov A.V., *Zverev I.A.* Investigation of the parameters determining the value of the shift productivity of a feller-bunchers. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2020, iss. 233, pp. 126-138. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.233.126-138. (In Russ.)

Andronov A.V., *Zverev I.A.*, *Mikhaylov O.A.*, *Taradin G.S.* A model for determining the time of pointing a grip-cutting device of feller buncher machines on a growing tree. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2021, iss. 237, pp. 183-195. DOI: 10.21266/2079-4304.2021.237.183-195. (In Russ.)

Belov L.A., *Basheguro v K.A.*, *Bezdenezhnykh I.V.*, *Zalesov S.V.*, *Iteshina N.M.* Feller-buncher LP-19 silvicultural efficiency for alternate strip fellings in secondary growth birch forests. *Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 2, pp. 18-29. (In Russ.)

Bogdanov E.N. Increasing the productivity of the felling-and-bunching machine lp-19 by improving the trajectory of the working tool. *Resources and Technology*, 2024, vol. 21, no. 1, pp. 26-39. DOI: 10.15393/j2.art.2024.7564. (In Russ.)

Burmistrova O.N., *Shol N.R.*, *Travin N.N.* Methodology of experimental studies of a feller-buncher machine. *Forest Bulletin*, 2010, no. 5, pp. 101-102. (In Russ.)

Chayka O.R. Simulation of feller buncher to partial felling of the forest. *Current research trends in the 21st century: theory and practice*, 2018, vol. 6, no. 4 (40), pp. 223-226. (In Russ.)

Chayka O.R., *Zhuravlev V.V.* Justification of parameters of felling-packing machines for improvement felling in artificial forest plantations. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya*, 2022, no. 7, pp. 25-29. (In Russ.)

Gasymov G.Sh. Evaluation of the possibility of felling and packaging machines usage for carrying out gradual and selective forest cut. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2009, iss. 188, pp. 147-155. (In Russ.)

Gasymov G.Sh., *Aleksandrov V.A.* Component-kinematical schemes of forest cutting and packing machines for partial and selective forest cuttings. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2008, iss. 184, pp. 71-79. (In Russ.)

Gryazin V.A., *Bagautdinov I.N.* Influence of energy-consume the work of felling-packetizing machines. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2008, iss. 185, pp. 109-114. (In Russ.)

Kalyashov V.A., *Smirnova A.I.* Research of efficiency of technological processes of the wood exploitation with application of fall-packaging machines. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2008, iss. 184, pp. 103-111. (In Russ.)

Mammatov V.O., *Mokhirev A.P.*, *Medvedev S.O.*, *Ivshina A.V.* Analysis of technological parameters of feller buncher under different environmental conditions. *Engineering journal of Don*, 2018, no. 2 (49), p. 75. (In Russ.)

Matveyko A.P. Calculation of the productivity of felling and feller-bunching machines. *Russian forestry journal*, 1989, no. 4, pp. 36-38. (In Russ.)

Mokhirev A.P., *Grigoryev I.V.*, *Kunitskaya O.A.*, *Grigoryeva O.I.*, *Voynash S.A.* Improving the design of multi-logging equipment on excavator bases. *Construction and road machines*, 2018, no. 6, pp. 43-49. (In Russ.)

Rukomojnikov K.P., *Sergeeva T.V.*, *Gilyazova T.A.*, *Tsarev E.M.*, *Komisar V.P.* Simulation modeling of technological processes of logging. *Russian Forestry Journal*, 2025, no. 1 (403), pp. 145-163. (In Russ.)

Sergeeva T., *Gilyazova T.*, *Rukomojnikov K.* Simulation modeling of time for moving a fallen tree by harvester to the zone of its bucking. *European Journal of Forest Engineering*, 2024, vol. 10, no. 2, pp. 142-148. DOI: 10.33904/ejfe.1457710.

Sidyganov U.N., *Onuchin E.M.*, *Lastochkin D.M.*, *Shemyakin A.V.* Mathematical modeling of work of the small-sized feller-buncher. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2008, iss. 185, pp. 123-133. (In Russ.)

Sokolov A.P. Simulation modeling of wood harvesting processes. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2023, iss. 245, pp. 244-260. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.245.244-260. (In Russ.)

Sokolov A.P., *Osipov E.V.* Substantiation of the technology of wood harvesting with the help of imitation modeling on Petri net. *Forestry journal*, 2018, vol. 8, no. 1 (29), pp. 111-119. DOI: 10.12737/article_5ab0dfc0247508.69266095. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 18.06.2026

Гилязова Т.А., Рукомойников К.П. Учет кинематических ограничений и недоступности деревьев в агентной модели валочно-пакетирующей машины для несплошных рубок // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2026. Вып. 259. С. 276–289. DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.276-289

Разработана имитационная агентная модель валочно-пакетирующей машины для выборочных и постепенных рубок леса, учитывающая кинематические ограничения поворота платформы и недоступность деревьев из-за оставляемых препятствий. Модель реализована в среде AnyLogic. На этапе инициализации пользователем задаются границы делянки путём ввода координат поворотных точек, что позволяет моделировать участки любой геометрической формы, а также траектория движения машины, включая магистральные и пасечные волоки. Создана многоагентная структура, включающая вырубаемые деревья, оставляемые деревья, подлесок и категорию недоступных деревьев. Пользователь задаёт породный состав, диаметр ствола, численность каждого типа деревьев. Распределение деревьев по площади делянки выполняется случайным образом. Технические характеристики машины, включая вылет захватно-срезающего устройства, скорости перемещения и поворота, также вводятся перед началом имитации. Разработан алгоритм расчистки волока и механизм оценки

доступности целевых деревьев с рабочей позиции, предусматривающий перевод недоступных деревьев в отдельную категорию с возможностью их повторной оценки после смены позиции. Учтены кинематические ограничения поворота платформы при наведении захватно-срезающего устройства на растущее дерево и при укладке поваленного дерева в пачку на волоке, включая корректировку рабочей позиции задним ходом с вертикальным выносом дерева при обнаружении препятствий. Модель обеспечивает 2D и 3D визуализацию технологического процесса. Практическая значимость заключается в возможности на этапе проектирования лесосечных работ оценивать реальную доступность запаса древесины с учётом кинематических ограничений и расположения оставляемых деревьев, что позволяет корректировать нормативы выработки до выхода техники на лесосеку. Модель создаёт основу для последующей оценки временных затрат и производительности.

Ключевые слова: имитационное моделирование, агентное моделирование, валочно-пакетирующая машина, выборочные рубки, постепенные рубки, кинематические ограничения, недоступность деревьев, оставляемые деревья, расчистка волока, рабочая позиция, поворот платформы, захватно-срезающее устройство, AnyLogic.

Gilyazova T.A., Rukomojnikov K.P. Incorporating Kinematic Constraints and Tree Inaccessibility into an Agent-Based Model of a Feller-Buncher Operating under Partial Harvesting Regimes. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2026, iss. 259, pp. 276–289 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.276-289

A simulation agent-based model of a feller-buncher for selective and gradual felling is developed, accounting for kinematic constraints of platform rotation and tree inaccessibility due to retained obstacles. The model is implemented in the AnyLogic environment. At the initialization stage, the user specifies cutting area boundaries by entering coordinates of turning points, which allows modeling sites of any geometric shape, as well as the machine trajectory, including main and strip skidding trails. A multi-agent structure is created, including harvested trees, retained trees, undergrowth, and an inaccessible trees category. The user specifies species composition, stem diameter, and the number of trees of each type. Tree distribution over the cutting area is random. Technical characteristics of the machine, including felling head reach, travel and rotation speeds, are also entered before simulation. An algorithm for trail clearance and a mechanism for assessing target tree accessibility from a working position are developed, providing for the transfer of inaccessible trees to a separate category with the possibility of their reassessment after a position change. Kinematic constraints of platform rotation are considered when pointing the felling head at a standing tree and when placing a felled tree into a bunch on the trail, including correction of the working position by reverse movement with vertical lifting of the tree when obstacles are

detected. The model provides 2D and 3D visualization of the technological process. The practical significance lies in the ability to assess the real accessibility of timber stock at the logging design stage, considering kinematic constraints and the location of retained trees, which allows adjusting production standards before equipment enters the cutting area. The model provides a basis for subsequent assessment of time consumption and productivity.

Keywords: simulation modeling, agent-based modeling, feller-buncher, selective felling, gradual felling, kinematic constraints, tree inaccessibility, retained trees, trail clearance, working position, platform rotation, felling head, AnyLogic.

ГИЛЯЗОВА Татьяна Аркадьевна – аспирант кафедры лесопромышленных и химических технологий Поволжского государственного технологического университета. SPIN-код: 1817-6448. ORCID: 0000-0001-6067-7185.

424000, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия. E-mail: tat-gilyazova@yandex.ru

GILYAZOVA Tatiana A.– PhD student, Department of Forestry and Chemical Technologies, Volga State University of Technology. SPIN-code: 1817-6448. ORCID: 0000-0001-6067-7185.

424000. Lenina sq. 3. Yoshkar-Ola. Russia. E-mail: tat-gilyazova@yandex.ru

РУКОМОЙНИКОВ Константин Павлович – профессор кафедры лесопромышленных и химических технологий Поволжского государственного технологического университета, доктор технических наук, доцент. SPIN-код: 9119-8261. ORCID: 0000-0002-9956-5081.

424000, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия. E-mail: rukomojnikovkp@volgatech.net

RUKOMOJNIKOV Konstantin P. – DSc (Technical), Professor, Department of Forestry and Chemical Technologies, Volga State University of Technology, Associate Professor. SPIN-code: 9119-8261. ORCID: 0000-0002-9956-5081.

424000. Lenina sq. 3. Yoshkar-Ola. Russia. E-mail: rukomojnikovkp@volgatech.net

УДК 631.312.3

М.А. Гнусов, С.В. Зимарин, Д.Ю. Дручинин, Д.С. Черенков

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОМБИНИРОВАННОГО ЛЕСНОГО ПЛУГА ДЛЯ НЕРАСКОРЧЕВАННЫХ ВЫРУБОК

Введение. Вспашка лесной почвы является трудоемкой и энергозатратной операцией, качество выполнения которой во многом определяет приживаемость и дальнейший рост посеянного или посаженного растительного материала. В лесном комплексе разработаны различные орудия для основной обработки лесной почвы. В настоящее время широко применяют серийные модели лемешных и дисковых плугов: ПКЛ-70, ПД-0,7 и пр. [Казаков и др., 2025]. Нераскорчеванная вырубка, как объект лесовосстановления, вследствие наличия большого числа различных препятствий является сложной территорией для проведения механизированных работ [Зеликов, 2019]. Используемые конструкции лемешных орудий зачастую малоэффективны на нераскорчеванных вырубках, так как испытывают большие ударные нагрузки при встрече с препятствиями, что приводит к поломкам их рабочих органов. При этом дисковые орудия в таких условиях работы не обеспечивают требуемого качества обработки почвы в плане оборота и сохранности почвенного пласта, что отражено в проведенных теоретических и экспериментальных исследованиях целого ряда авторов.

Анализ работы в условиях вырубок лесных комбинированных почвообрабатывающих орудий проведен С.В. Зимариным и Д.Ю. Дручининым [Зимарин и др., 2014; Лягоскин и др., 2017], агрегатов с пассивными рабочими органами – В.И. Посметьевым и В.А. Зеликовым [2015]. С.Н. Долматов и Н.В. Сухенко [2022] установили требования к работе дисковых плугов на вырубках, выполнив анализ влияния параметров дисковых рабочих органов на эффективность нарезки борозд на лесных площадях. М.Н. Лысыч [2014] обосновал форму рабочих органов в зависимости от условий применения орудия, сделав заключение об эффективности эксплуатации сферических дисков в тяжелых условиях каменистых почв и вырубок. S. Almaliki [2018], рассмотрев рабочие органы различных почвообрабатывающих орудий, показал, что наименьшим тяговым сопротивлением обработки обладают сферические диски. В.Н. Коротких рекомендовал для улучшения оборота пласта принудительное вращение рабочего органа сферического дискового

корпуса [Коротких и др., 2010; Лысыч и др., 2015]. С.В. Малюков рекомендовал к разработке орудия с комбинированными рабочими органами, проанализировав достоинства и недостатки на лесных почвах дисковых рабочих органов [Малюков и др., 2023]. В своих работах Hallsby et al. [2015] и Collet et al. [2024] отмечают, что в различных странах с учётом их природно-производственных условий, характеристик участков лесовосстановления и целей лесоводства разработаны разнообразные методы механической подготовки почвы, отличающиеся используемыми орудиями и способами их применения. [Löf et al., 2012] сделали вывод о необходимости разработки современных средств механизации для интенсивной механической подготовки почвы и положительном влиянии такой обработки на продуктивность развития лесных культур. Коллективом ученых под руководством U. Sikström сделаны выводы об эффективности применения в бореальной зоне на восстанавливаемых участках различных способов механической обработки почвы [Sikström et al., 2020]. Зарубежные авторы, рассматривая экономическую эффективность процесса лесовосстановления в целом, отмечают важную роль технологии механического воздействия на почву в общих затратах подготовки лесной почвы [Uotila et al., 2010].

Качество основной подготовки задернелых почв определяют такие критерии как оборот, крошение и рыхление почвенного пласта. При этом полностью обернутый почвенный пласт, сохранивший свою целостность в виде сплошной ленты, обеспечит глубокую заделку растительных остатков, что будет способствовать перегниванию сорной растительности и невозможности прорастания сорняков.

Активный оборот пласта при вспашке сухих твердых почв с последующим их крошением рассматривал И.М. Бартенев [2013]. Оборот пласта дисковым корпусом с полувинтовым отвалом с последующим рассмотрением зависимостей угла неустойчивого равновесия пласта от параметров орудия изучал С.В. Зимарин [Зимарин, Хорольский, 2015]. Совершенствованием процесса оборота пласта лемешным плужным корпусом за счет постановки дополнительных щитков, расширяющих дно борозды, занимались В.В. Василенко и А.Н. Хахулин [2014]. Теорию оборота почвенного пласта при бороздной подготовке задернелых почв с построением уравнения движения точек пласта развивал коллектив авторов [Лобачевский и др., 2024]. Вопрос оборота задернелого пласта плужным корпусом с винтовым отвалом рассмотрен в работе [Ценч и др., 2024].

На основании анализа приведенных аналитических и экспериментальных исследований можно сделать вывод о перспективности использования для основной обработки почвы на нераскорчеванных вырубках комбинированных

ресурсосберегающих орудий. Такие орудия должны содержать сферические дисковые корпуса, оснащенные отвалом как дополнительным рабочим органом. Они будут способны путем перекатывания преодолевать препятствия в виде пней и порубочных остатков и обеспечивать требуемое технологией качество обработки почвы.

Материалы и методика исследования. В качестве объекта исследования предлагается лесной плуг для нераскорчеванных вырубок, оснащенный комбинированными корпусами. Такой комбинированный корпус (рис. 1) состоит из стойки 1, сферического диска 2, гиперболоидного отвала 3, при этом сферический диск и отвал свободно на подшипниках установлены на оси 4. Таким образом, в процессе обработки почвы комбинированным корпусом сферический диск подрезает почвенный пласт, который под воздействием отвала оборачивается и, сохраняя свою целостность, укладывается рядом с бороздой в виде ленты.

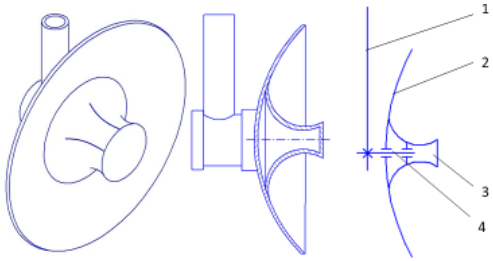


Рис. 1. Дисковый корпус плуга с гиперболоидным отвалом:
1 – стойка; 2 – сферический диск; 3 – гиперболоидный отвал; 4 – ось

Fig. 1. Disk body of a plow with a hyperboloid blade:
1 – rack; 2 – spherical disk; 3 – hyperboloid blade; 4 – axis

На рис. 2 представлена разработанная в ВГЛТУ конструкция лесного плуга, оснащенная предлагаемыми корпусами 1, которая, кроме дисковых рабочих органов, включает сварную раму 2 с системой навески на трактор 3 и опорное колесо 4, обеспечивающее заданную глубину обработки.

Исследование направлено на обоснование оптимальных конструктивно-технологических параметров орудия с целью повышения эффективности подготовки почвы, снижения энергозатрат и улучшения условий для последующего лесовосстановления в сложных условиях с наличием пней, корней и порубочных остатков.

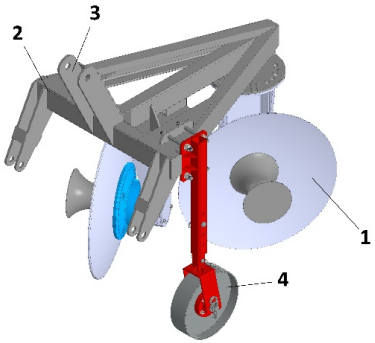


Рис. 2. Дисковый плуг с гиперболоидными отвалами
Fig. 2. Disk plow with hyperboloid dumps

Методика исследования предполагает проведение теоретического анализа взаимодействия рабочего органа с почвой и растительными остатками с построением аналитических выражений влияния геометрических параметров плуга на качество обработки и проходимость на нераскорчеванных вырубках.

Результаты исследования и обсуждение. Определение параметров предлагаемого плуга для нераскорчеванных вырубок необходимо начать с определения величин диаметров сферических дисков, как основных рабочих органов плужных корпусов.

Обоснование минимальной величины диаметра диска необходимо провести исходя из способности преодоления встречающихся препятствий, максимальными по высоте из которых являются пни (рис. 3).

Условие преодоления препятствия дисковым рабочим органом:

$$D > \frac{2h_{\text{пр}}}{\cos\beta + \cos\alpha \cdot \operatorname{tg}\sigma} = \frac{2(h_{\text{пня}} + a)}{\cos\beta + \cos\alpha \cdot \operatorname{tg}\sigma}, \quad (1)$$

где D – диаметр диска, мм; α – угол атаки диска, °; β – угол наклона диска относительно вертикали, °; σ – угол наклона к горизонту линии тяги, °; $h_{\text{пр}}$ – высота препятствия, мм; $h_{\text{пня}}$ – высота пня, мм; a – глубина обработки при подходе к пню, принимается от 0 до 100 мм, так как при подходе к пню диски, накатываясь на корни, выглубляются из почвы.

Применительно к предлагаемому орудию принимаем: $\alpha = 40°$; $\beta = 0°$; $\sigma = 20°$; $h_{\text{пня}} = 350$ мм; $a_{\text{п}} = 80$ мм. Тогда диаметр диска должен быть не менее 673 мм. Для обеспечения надежного перекатывания орудия через препятствия и снижения его металлоемкости выбираем ближайший по величине диаметр диска серийно выпускаемых орудий ($D = 710$ мм).

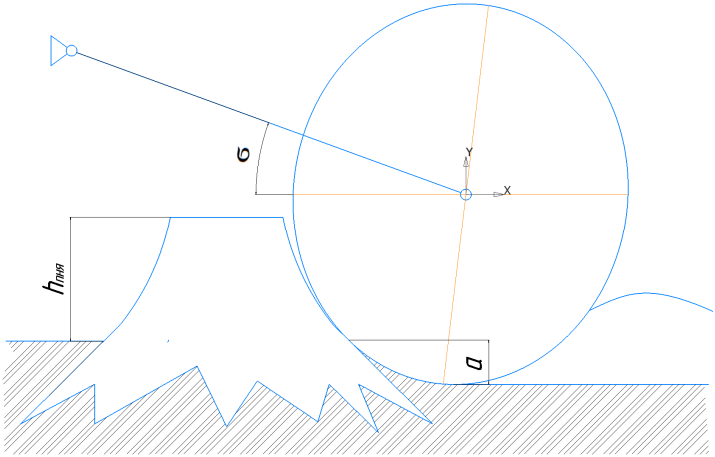


Рис. 3. Схема перекатывания дискового рабочего органа через препятствие
Fig. 3. The scheme of rolling the disk working body through the obstacl

Обоснование поперечного расстояния между центрами дисковых корпусов (L) проведем исходя из агротехнических требований по обработке почвы: плуг должен обеспечивать глубину обработки (a) в 150 мм и ширину борозды (B) в 700 мм, при этом должна быть соблюдена допускаемая гребнистость дна борозды (рис. 4).

Допустимая фактическая высота гребня на дне борозды ($h_ф$), вследствие скалывания вершины гребня определится по выражению:

$$h_ф = (0{,}5\ldots0{,}6)h, \tag{2}$$

где h – расчетная высота гребня дна борозды (для дисковых плугов $h \le 0{,}4a$).

Ширина борозды двухкорпусного плуга определится по выражению:

$$B = b_1 + b_2, \tag{3}$$

где b_1 – ширина борозды, образуемая первым дисковым корпусом, определяется по выражению:

$$b_1 = 2\sin\alpha\sqrt{\frac{a}{\cos\beta}\left(D - \frac{a}{\cos\beta}\right)}; \tag{4}$$

b_2 – ширина борозды, образуемая вторым дисковым корпусом, определяется по выражению:

$$b_2 = 2\sin\alpha\sqrt{\frac{h}{\cos\beta}\left(D - \frac{h}{\cos\beta}\right)}. \tag{5}$$

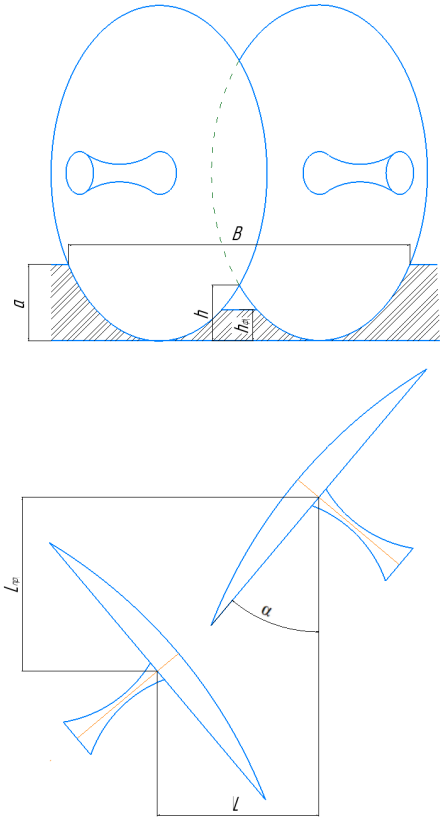


Рис. 4. Схема обработки почвы двухкорпусным плугом
Fig. 4. Scheme of tillage with a two-body plow

Приняв $h_ф = 0{,}55h$, $D = 710$ мм и одинаковые углы атаки и наклона к вертикали для обоих корпусов ($\alpha = 40°$; $\beta = 0°$), определим поперечное расстояние между дисковыми корпусами величиной 330 мм, учитывая, что $L = b_2$ при $\beta = 0°$.

Продольное расстояние между центрами сферических дисков ($L_{пр}$, мм) определим по выражению:

$$L_{пр} = \frac{D(\sin\alpha - b_2)}{\mathrm{tg}\alpha} + \frac{R - \sqrt{R^2 - \dfrac{D^2}{4}}}{\sin\alpha} + (50\ldots100), \qquad (6)$$

где R – радиус кривизны сферического диска ($R = 1{,}4\ldots1{,}6D$).

Приняв $R = 1{,}41D = 1000$ мм, определим продольное расстояние между центрами сферических дисков величиной 300 мм.

Начальный подъем почвенного пласта происходит под воздействием на него сферической рабочей поверхности дискового корпуса плуга. При этом почвенный пласт стремится занять свое начальное положение под действием опрокидывающего момента и упругих свойств дернины. Полный оборот почвенного пласта будет обеспечен воздействием на него гиперболоидного отвала.

На основании исследований [Нартов, 1972] линию подъема связанного пласта по поверхности сферического диска (γ) с небольшой погрешностью можно считать прямой. Построим график зависимости угла подъема пласта от угла атаки сферического диска (рис. 5) и уравнение регрессии той же зависимости:

$$\gamma = -0{,}0325\alpha^2 + 2{,}56\alpha - 10{,}737. \quad (7)$$

Статистики полученного уравнения регрессии: коэффициент детерминации $R^2 = 0{,}989$; средняя относительная ошибка аппроксимации меньше 5% ($\varepsilon = 2{,}12\%$); критерий Фишера $F = 46{,}59$ (критическое значение F-критерия равно 18,51 при уровне значимости 0,05); критерии Стьюдента для коэффициентов уравнения регрессии $t(\alpha) = 5{,}39$ и $t(\alpha^2) = 4{,}15$ (критическое значение t-критерия равно 4,3 при уровне значимости 0,05). Расчетные значения критериев превосходят критические значения, следовательно, коэффициенты уравнения считаем значимыми, а уравнение регрессии – адекватным.

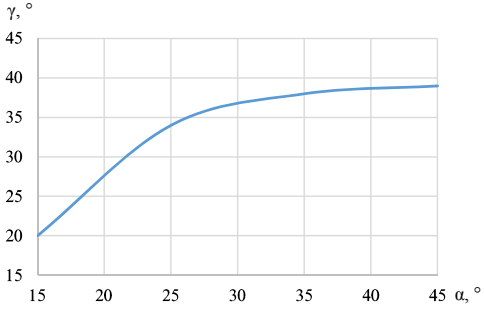


Рис. 5. Зависимость угла подъема пласта от угла атаки сферического диска

Fig. 5. Dependence of the angle of rise of the formation on the angle of attack of the spherical disk

При ранее принятых параметрах α = 40°, β = 0° угол подъема пласта по поверхности сферического диска (γ) составит 39°.

Для обоснования параметров гиперболоидного отвала рассмотрим схему его размещения на дисковом корпусе плуга (рис. 6).

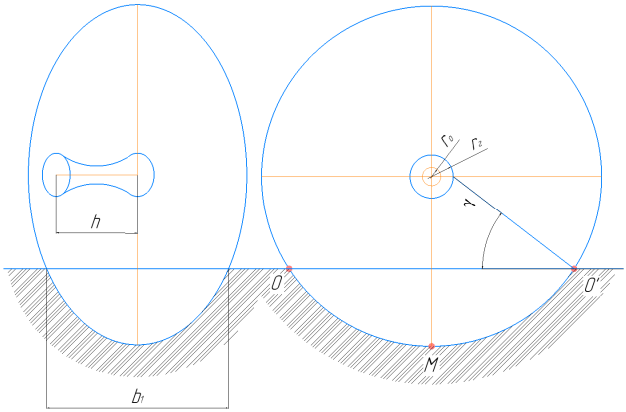


Рис. 6. Схема размещения гиперболоидного отвала на дисковом корпусе плуга

Fig. 6. The layout of the hyperboloid blade on the disk body of the plow

Почвенный пласт подрезается сферическим диском. В этом случае допускается рассмотрение оборота задернелого почвенного пласта как оборота сегмента эллипсоида. При вертикальном расположении диска сечение эллипсоида имеет форму сегмента эллипса (OMO' – проекция на плоскость диска). Таким образом, далее рассматриваем оборот сегмента эллипса. Уравнение эллипса в этом случае будет иметь вид:

$$\frac{z^2}{\frac{D^2}{4}} + \frac{y^2}{\frac{D^2}{4}\sin^2\alpha} = 1 \quad (8)$$

Наибольший радиус кривизны эллипса определяется выражением:

$$R_э = \frac{a_э^2}{b_э}, \quad (9)$$

где $a_э$ – большая полуось эллипса, в нашем случае:

$$a_э = D^2 / 4; \tag{10}$$

$b_э$ – малая полуось эллипса, в нашем случае:

$$b_э = \frac{D^2}{4}\sin^2\alpha. \tag{11}$$

Тогда наибольший радиус кривизны сегмента эллипса составит 553 мм.

Гиперболоидный отвал должен располагаться так, чтобы ограничивать подъем подрезанного пласта по поверхности сферического диска, задав ему траекторию движения, обеспечивающую полный оборот пласта. При этом радиус кривизны гиперболоидного отвала для снижения тягового сопротивления должен соответствовать радиусу кривизны сегмента эллипса.

Отсюда определим радиус основания гиперболоидного отвала:

$$r_o = \sqrt{a(D-a)} - \frac{\frac{D}{2} - a}{\operatorname{tg}\gamma}. \tag{12}$$

Приняв ранее определенные величины D = 710 мм, a = 150 мм, $\gamma = 39°$, определим r_0 = 37 мм.

Поверхность гиперболоидного отвала может быть получена путем вращения гиперболы вокруг её мнимой оси. Определим параметры такой гиперболы. Минимальный радиус её кривизны должен соответствовать ранее определенному наибольшему радиусу кривизны сегмента эллипса.

Уравнение минимального радиуса кривизны гиперболы имеет вид:

$$R_э = \frac{b_г^2}{a_г}, \tag{13}$$

где $a_г$ – действительная полуось гиперболы; $b_г$ – мнимая полуось гиперболы.

При этом должны выполняться следующие условия:

$$a_г = r_г, \tag{14}$$

$$r_o = r_г\sqrt{2}, \tag{15}$$

где $r_г$ – радиус горла гиперболоидного отвала.

Исходя из данных условий, определим $b_г$ = 120 мм и $r_г$ = 26 мм.

Длина гиперболоидного отвала (h) равна длине мнимой оси гиперболы и составит 240 мм.

Заключение. В результате проведенных исследований установлено, что перспективными для основной обработки почвы на нераскорчеванных вырубках являются комбинированные орудия, содержащие сферические дисковые корпуса, оснащенные отвалом как дополнительным рабочим органом, обеспечивающим полный оборот задернелого пласта и его укладку рядом с бороздой в виде сплошной ленты. Получено уравнение для определения угла подъема пласта по сферической рабочей поверхности дискового корпуса. Предложена новая конструкция лесного плуга для бороздной подготовки почвы на вырубках с обоснованием его конструктивных и технологических параметров. Установлено, что для создания борозды шириной 700 мм и глубиной 150 мм с допустимой гребнистостью её дна, обеспечения надежного преодоления орудием встречающихся пней и выполнения качественной обработки лесной почвы с минимизацией энергопотерь предложенный плуг должен иметь следующие характеристики: диаметр сферического диска – 710 мм; радиус кривизны сферического диска – 1000 мм; угол атаки дискового корпуса – 40°; угол наклона к вертикали дискового корпуса – 0°; продольное расстояние между центрами сферических дисковых корпусов – 330 мм; поперечное расстояние между центрами сферических дисковых корпусов – 300 мм; длина гиперболоидного отвала – 240 мм; его диаметр горла – 26 мм; его радиус основания – 37 мм.

Сведения о финансировании исследования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00876, https://rscf.ru/project/25-19-00876/.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Бартенев И.М. Ударное разрушение и активный оборот почвенного пласта при вспашке// Лесотехнический журнал. 2013. №1 (9). С. 98-110.

Василенко В.В., *Хахулин А.Н.* Способ расширения борозды для полного переворота пласта // Инновационные технологии и технические средства для АПК. 2014. Т. 3. С. 130-134.

Долматов С.Н., *Сухенко Н.В.* Влияние параметров рабочего органа дискового рыхлителя на технологический процесс нарезки борозд при лесовосстановлении // Хвойные бореальной зоны. 2022. Т. 40, №6. С. 529-537. DOI: 10.53374/1993-0135-2022-6-529-537.

Зеликов В.А. Состояние и особенности нераскорчеванных вырубок как объектов лесовосстановления // Проблемы и мониторинг природных экосистем: сб. ст. VI Всерос. науч.-практ. конф. Пенза, 2019. С. 83-85.

Зимарин С.В., *Хорольский Н.А.* Моделирование процесса оборота почвенного пласта // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, №9-2 (20-2). С. 335-338.

Зимарин С.В., *Попиков П.И.*, *Сердюкова Н.А.* Анализ способов повышения эффективности лесных дисковых почвообрабатывающих орудий на вырубках // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2, №2-2 (7-2). С. 219-224. DOI: 10.12737/3139.

Казаков И.В., *Зинин В.Ф.*, *Казаков В.И.*, *Проказин Н.Е.*, *Родин С.А.*, *Климов О.Г.* Механизация лесохозяйственных работ: учебник для вузов / под редакцией В. И. Казакова. М.: Юрайт, 2025. 342 с.

Коротких В.Н., *Попиков П.И.*, *Титов П.И.* Влияние принудительного вращения комбинированного рабочего органа лесного дискового плуга на энергетические и качественные показатели // Вестник КрасГАУ. 2010. №2 (41). С. 102-106.

Лобачевский Я.П., *Шаров В.В.*, *Алдошин Н.В.*, *Ценч Ю.С.*, *Золотарев А.С.* Теоретические аспекты оборота пласта в габаритах собственной борозды // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2024. Т. 18, №4. С. 4-9. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-4-9.

Лысыч М.Н. Анализ конструкций дисковых рабочих органов почвообрабатывающих орудий и возможностей их применения в условиях лесных вырубок // Современные проблемы науки и образования. 2014. №6. С. 209.

Лысыч М.Н., *Шабанов М.Л.*, *Никулин С.Н.* Современные орудия для нарезки посадочных борозд и создания противопожарных полос // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, №9-2 (20-2). С. 55-59. DOI: 10.12737/16430.

Лягоскин М.А., *Алиев Н.В.*, *Дручинин Д.Ю.* Особенности выполнения основной обработки почвы на вырубках // Молодой учёный. 2017. №14 (148). С. 92-96.

Малюков С.В., *Лысыч М.Н.*, *Бухтояров Л.Д.*, *Поздняков Е.В.*, *Гнусов М.А.*, *Шавков М.В.*, *Петков А.Ф.* Анализ дисковых рабочих органов лесных почвообрабатывающих орудий // Лесотехнический журнал. 2023. Т. 13, №2 (50). С. 128-141. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.2/7.

Нартов П.С. Дисковые почвообрабатывающие орудия: монография. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1972. 181 с.

Посметьев В.И, *Зеликов В.А.* Состояние и пути повышения эффективности почвообрабатывающих агрегатов при лесовосстановлении на вырубках: монография. Воронеж: ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, 2015. 236 с.

Ценч Ю.С., *Шаров В.В.*, *Миронова А.В.* Обоснование длины отвала плужного корпуса винтового типа // Технический сервис машин. 2024. Т. 62, №4. С. 123-129. DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-4-123-129.

Almaliki S. Simulation of draft force for three types of plow using response surface method under various field conditions // Iraqi Journal of Agricultural Sciences. 2018. Vol. 49, iss. 6. P. 1123-1124. DOI: 10.36103/ijas.v49i6.151.

Collet C., *Agro C.*, *Akroume E.*, *Bello J.*, *Berthelot A.*, *Boulanger V.*, *CAlas A.*, *Dumas N.*, *Pitaud J.*, *Puyal M.*, *Vast F.* Mechanical site preparation severity mediates one-year-survival response to summer drought in planted tree seedlings // New Forests. 2024. Vol. 55. P. 1581-1594. DOI: 10.21203/RS.3.RS-3796037/V1.

Hallsby G., *Ulvcrona K.A.*, *Karlsson A.*, *Elfving B.*, *Sjögren H.*, *Ulvcrona T.*, *Bergsten U.* Effects of intensity of forest regeneration measures on stand development in a nationwide Swedish field experiment // Forestry. 2015. Vol. 88, iss. 4. P. 441-453. DOI: 10.1093/forestry/cpv010.

Hawkins C.B.D., *Steele T.W.*, *Letchford T.* The economics of site preparation and the impacts of current forest policy: evidence from central British Columbia // Canadian Journal of Forest Research. 2006. Vol. 36, iss. 2. P. 482-494. DOI: 10.1139/x05-262.

Löf M., *Dey D.*, *Navarro R.*, *Jacobs D.* Mechanical site preparation for forest restoration // New Forests. 2012. Vol. 43, iss. 5-6. P. 825–848. DOI: 10.1007/s11056-012-9332-x.

Örlander G., *Nordboru F.*, *Gemmel P.* Effects of complete deen-soil cultivation on initial forest stand development // Studia Forestalia Suecica. 2002. Vol. 213. 20 p.

Sikström U., *Hjelm K.*, *Hanssen K.H.*, *Saksa T.*, *Wallertz K.* Influence of mechanical site preparation on regeneration success of planted conifers in clearcuts in Fennoscandia – A review // Silva Fennica. 2020. Vol. 54, iss. 2. Art. no. 10172. DOI: 10.14214/sf.10172.

Uotila K., *Rantala*, *J.*, *Saksa T.*, *Harstela P.* Effect of soil preparation method on economic result of Norway spruce regeneration chain // Silva Fennica. 2010. Vol. 44, no. 3. P. 511-524. DOI: 10.14214/sf.146.

References

Almaliki S. Simulation of draft force for three types of plow using response surface method under various field conditions. *Iraqi Journal of Agricultural Sciences*, 2018, vol. 49, iss. 6, pp. 1123-1124. DOI: 10.36103/ijas.v49i6.151.

Bartenev I.M. Impact destruction and active turnover of the soil layer during plowing. *Forestry journal*, 2013, no. 1 (9), pp. 98-110. (In Russ.)

Collet C., *Agro C.*, *Akroume E.*, *Bello J.*, *Berthelot A.*, *Boulanger V.*, *CAlas A.*, *Dumas N.*, *Pitaud J.*, *Puyal M.*, *Vast F.* Mechanical site preparation severity mediates one-year-survival response to summer drought in planted tree seedlings. *New Forests*, 2024, vol. 55, pp. 1581-1594. DOI: 10.21203/RS.3.RS-3796037/V1.

Dolmatov S.N., *Sukhenko N.V.* Influence of the parameters of the working body of the disc ripper on the technological process of cutting furrows during reforestation. *Conifers of the boreal zone*, 2022, vol. 40, no. 6, pp. 529-537. DOI: 10.53374/1993-0135-2022-6-529-537. (In Russ.)

Hallsby G., *Ulvcrona K.A.*, *Karlsson A.*, *Elfving B.*, *Sjögren H.*, *Ulvcrona T.*, *Bergsten U.* Effects of intensity of forest regeneration measures on stand development in a nationwide Swedish field experiment. *Forestry*, 2015, vol. 88, iss. 4, pp. 441-453. DOI: 10.1093/forestry/cpv010.

Hawkins C.B.D., *Steele T.W.*, *Letchford T.* The economics of site preparation and the impacts of current forest policy: evidence from central British Columbia. *Canadian Journal of Forest Research*, 2006, vol. 36, iss. 2, pp. 482-494. DOI: 10.1139/x05-262.

Kazakov I.V., *Zinin V.F.*, *Kazakov V.I.*, *Prokazin N.E.*, *Rodin S.A.*, *Klimov O.G.* Mechanization of forestry work: a textbook for universities / edited by V.I. Kazakov. Moscow: Yurait, 2025. 342 p. (In Russ.)

Korotkikh V.N., *Popikov P.I.*, *Titov P.I.* influence of forced rotation of the forest disk plough combined working element on power and quality indicators. *Bulletin of KrasGAU*, 2010, no. 2(41), pp. 102-106. (In Russ.)

Lobachevsky Ya.P., *Sharov V.V.*, *Aldoshin N.V.*, *Tsench Yu.S.*, *Zolotarev A.S.* Theoretical aspects of layer turnover in the dimensions of its own furrow. *Agricultural machinery and technologies*, 2024, vol. 18, no. 4, pp. 4-9. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-4-9. (In Russ.)

Löf M., *Dey D.*, *Navarro R.*, *Jacobs D.* Mechanical site preparation for forest restoration. *New Forests*, 2012, vol. 43, iss. 5-6, pp. 825–848. DOI: 10.1007/s11056-012-9332-x.

Lyagoskin M.A., *Aliev N.V.*, *Druchinin D.Yu.* Particularities of basic soil cultivation on cutting-down. *Young scientist*, 2017, no. 14 (148), pp. 92-96. (In Russ.)

Lysych M.N. The analysis of designs of disk soil-cultivating working bodies and possibilities of their application in the conditions of wood cutting areas. *Modern problems of science and education*, 2014, no. 6, p. 209. (In Russ.)

Lysych M.N., *Shabanov M.L.*, *Nikulin S.N.* Modern tools for cutting of furrows and creating fire protection strips. *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2015, vol. 3, no. 9-2 (20-2), pp. 55-59. DOI: 10.12737/16430. (In Russ.)

Malyukov S.V., *Lysych M.N.*, *Bukhtoyarov L.D.*, *Pozdnyakov E.V.*, *Gnusov M.A.*, *Shavkov M.V.*, *Petkov A.F.* Analysis of disk working bodies of forest soil-cultivating implements. *Forestry Engineering Journal*, 2023, vol. 13, no. 2 (50), pp. 128-141. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.2/7. (In Russ.)

Nartov P.S. Disc tillage tools: monograph. Voronezh: Voronezh State University Publishing House, 1972. 181 p. (In Russ.)

Örlander G., *Nordboru F.*, *Gemmel P.* Effects of complete deen-soil cultivation on initial forest stand development. *Studia Forestalia Suecica*, 2002, vol. 213, 20 p.

Posmetyev V.I., *Zelikov V.A.* The state and ways of increasing the efficiency of tillage units during reforestation in cuttings: monograph. Voronezh: VSUFT, 2015. 236 p. (In Russ.)

Sikström U., *Hjelm K.*, *Hanssen K.H.*, *Saksa T.*, *Wallertz K.* Influence of mechanical site preparation on regeneration success of planted conifers in clearcuts in Fennoscandia – A review. *Silva Fennica*, 2020, vol. 54, iss. 2, art. no. 10172. DOI: 10.14214/sf.10172.

Tsench Yu.S., *Sharov V.V.*, *Mironova A.V.* Justification of the moldboard length of a screw-type plow body. *Technical service of machines*, 2024, vol. 62, no. 4, pp. 123-129. DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-4-123-129. (In Russ.)

Uotila K., *Rantala*, *J.*, *Saksa T.*, *Harstela P.* Effect of soil preparation method on economic result of Norway spruce regeneration chain. *Silva Fennica*, 2010, vol. 44, no. 3, pp. 511-524. DOI: 10.14214/sf.146.

Vasilenko V.V., *Khakhulin A.N.* Method of widening a furrow for complete layer turnover. *Innovative technologies and technical means for the agro-industrial complex*, 2014, vol. 3, pp. 130-134. (In Russ.)

Zelikov V.A. Status and features of undisturbed felling as objects of reforestation. *Problems and monitoring of natural ecosystems*: collection of art. of the VI All-Russ. sci.-pract. conf. Penza, 2019, pp. 83-85. (In Russ.)

Zimarin S.V., *Khorolskiy N.A.* Modeling the process of soil layer turnover. *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2015, vol. 3, no. 9-2 (20-2), pp. 335-338. (In Russ.)

Zimarin S.V., *Popikov P.I.*, *Serdyukova N.A.* Analysis of ways to increase the efficiency of forest disk tillage tools in logging. *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2014, vol. 2, no. 2-2 (7-2), pp. 219-224. DOI: 10.12737/3139. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 21.11.2025

Гнусов М.А., Зимарин С.В., Дручинин Д.Ю., Черенков Д.С. Определение параметров комбинированного лесного плуга для нераскорчеванных вырубок // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2026. Вып. 259. С. 290–305. DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.290-305

Проанализированы рабочие процессы лемешных и дисковых почвообрабатывающих орудий для основной обработки почвы на лесных площадях. Предложена новая конструкция ресурсосберегающего лесного плуга для бороздной обработки почвы на нераскорчеванных вырубках, сферические дисковые корпусы которого оснащены гиперболоидными отвалами для обеспечения требуемого качества оборота задернелого пласта и его укладки рядом с бороздой в виде сплошной ленты. Такое орудие позволяет избежать материально затратной операции по корчевке пней и наряду с этим снизить отрицательное воздействие на почву и повысить приживаемость высаживаемых растений. Получено уравнение для определения угла подъема пласта по сферической рабочей поверхности дискового корпуса. Обоснованы конструктивные и технологические характеристики предлагаемого плуга, в частности геометрические параметры дополнительных рабочих органов – гиперболоидных отвалов. Установлено, что для создания борозды шириной 700 мм и глубиной 150 мм с допустимой гребнистостью её дна, обеспечения надежного преодоления орудием встречающихся пней и выполнения качественной обработки лесной почвы с минимизацией энергопотерь предложенный плуг должен иметь следующие характеристики: диаметр сферического диска – 710 мм; радиус кривизны сферического диска – 1000 мм; угол атаки дискового корпуса – 40°; угол наклона к вертикали дискового корпуса – 0°; продольное расстояние между центрами сферических дисковых корпусов –

330 мм; поперечное расстояние между центрами сферических дисковых корпусов – 300 мм; длина гиперболоидного отвала – 240 мм; его диаметр горла – 26 мм; его радиус основания – 37 мм.

Ключевые слова: лесное хозяйство, вспашка, борозда, лесной плуг, рабочий орган, конструктивно-технологические параметры, оборот пласта.

Gnusov M.A., Zimarin S.V., Druchinin D.Yu., Cherenkov D.S. Determination of parameters of a combined forest plow for unstumped clearings. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2026, iss. 259, pp. 290–305 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.290-305

The working processes of ploughshares and disk tillage tools for basic tillage in forest areas are analyzed. A new design of a resource-saving forest plow for extensive tillage in uncorrupted cuttings has been proposed, the spherical disc bodies of which are equipped with hyperboloid dumps to ensure the required quality of turnover of the blackened layer and its laying next to the furrow in the form of a continuous ribbon. Such a tool makes it possible to avoid the materially costly operation of uprooting stumps and, at the same time, reduce the negative impact on the soil and increase the survival rate of the planted plants. An equation is obtained for determining the angle of rise of the formation along the spherical working surface of the disk housing. The design and technological characteristics of the proposed plow are substantiated, in particular, the geometric parameters of additional working bodies – hyperbolic dumps. It has been established that in order to create a furrow 700 mm wide and 150 mm deep with an acceptable ridge of its bottom, ensure reliable overcoming of stumps with a tool and perform high-quality tillage of forest soil with minimizing energy loss, the proposed plow must have the following characteristics: diameter of a spherical disk – 710 mm; radius of curvature of a spherical disk – 1000 mm; angle of attack the disc case is 400; the angle of inclination to the vertical of the disc case is 00; the longitudinal distance between the centers of the spherical disc cases is 330 mm; the vertical distance between the centers of spherical disk housings is 300 mm; length of the hyperboloid blade – 240 mm; throat diameter of the hyperboloid blade – 26 mm; base radius of the hyperboloid blade – 37 mm.

Keywords: forestry, plowing, furrow, forest plow, working body, structural and technological parameters, reservoir turnover.

ГНУСОВ Максим Александрович – доцент кафедры безопасности жизнедеятельности и правовых отношений Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, кандидат технических наук. SPIN-код: 6242-1723.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: mgnusov@yandex.ru

GNUSOV Maksim A. – PhD (Technical), Associate Professor, Department of Life Safety and Legal Relations, Voronezh State University of Forestry and Technologies. SPIN-code: 6242-1723.

394087. Timiryazeva str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: mgnusov@yandex.ru

ЗИМАРИН Сергей Викторович – доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, кандидат технических наук. SPIN-код: 3401-8534.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: sezimarin@yandex.ru

ZIMARIN Sergey V. – PhD (Technical), Associate Professor, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies. SPIN-code: 3401-8534.

394087. Timiryazeva str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: sezimarin@yandex.ru

ДРУЧИНИН Денис Юрьевич – заведующий кафедрой механизации лесного хозяйства и проектирования машин Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, кандидат технических наук, доцент. SPIN-код: 2482-8478.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: druchinin.denis@rambler.ru

DRUCHININ Denis Yu. – PhD (Technical), Head of the Department of Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies, Associate Professor,. SPIN-code: 2482-8478.

394087. Timiryazeva str. 8. Russia. E-mail: druchinin.denis@rambler.ru

ЧЕРЕНКОВ Дмитрий Сергеевич – аспирант кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, SPIN-код: 3087-3700.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: chierienkov1999@mail.ru

CHERENKOV Dmitry S. – PhD student, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies. SPIN-code: 3087-3700.

394087. Timiryazeva str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: chierienkov1999@mail.ru

УДК 627.142.2

С.В. Посыпанов, Н.С. Калитин, Ш.Г. Зарипов

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ БУКСИРОВОЧНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ МАЛОГАБАРИТНЫХ ЛЕСОТРАНСПОРТНЫХ ЕДИНИЦ

Введение. В лесных регионах запасы древесного сырья в настоящее время сосредоточены преимущественно в удалённых лесных массивах. Экономически оправданное освоение этих ресурсов зачастую возможно лишь при транспортном использовании развитой сети средних и малых рек, по которым ранее проводился молевой сплав [Харитонов, Посыпанов, 2008]. В настоящее время транспорт лесоматериалов по воде может осуществляться только в сплоточных единицах, из которых формируют линейки, секции или плоты, перемещаемые, как правило, за буксирной тягой. Глубины на малых и средних реках весьма ограниченны, навигация непродолжительна. Существующие буксирные средства либо не могут быть использованы на этих реках, либо время их применения очень мало. Требуются новые разработки, сочетающие простоту конструкции, невысокую стоимость, малую осадку. Таким средством является буксировочный модуль, конструкция которого разработана авторами статьи. Управлять этим модулем предполагается дистанционно с сопровождающего плавсредства. Это может быть катер, относящийся к маломерному флоту, который после окончания лесосплавной навигации на средних и малых реках используется далее по своему обычному назначению. В случаях, когда путевые условия позволяют буксировать укрупнённые лесотранспортные единицы, модули могут быть объединены в единый комплекс с повышенной тягой. По этой причине буксировочное устройство также именуется модулем. Транспортировка модуля к месту отправления очередной лесотранспортной единицы предполагается при помощи автосортиментовоза. Это позволяет существенно сократить продолжительность холостого хода и использовать модуль наиболее рационально по времени, что особенно важно на средних и малых реках, где длительность стояния навигационных уровней невелика. Исключается движение против течения. Кроме того, в этом случае в процессе проектирования можно ориентироваться только на режим рабочего хода буксировочного модуля. При буксировке лесотранспортных единиц для этого режима

характерны малые скорости, как правило, 4-6 км/ч относительно воды, то есть без учёта скорости течения. При этом необходимо получить максимально возможную силу тяги при заданной мощности двигателей. Характеристики гребных винтов должны соответствовать заданным условиям. При этом необходимо учитывать малые глубины на маршруте буксировки.

Лесосплавные суда, в том числе буксирные, проектировались под более высокие скорости движения, как правило, не менее 8 км/ч. Фактически с такими скоростями буксируют в основном баржи, гидродинамическое сопротивление у которых существенно меньше, чем у лесотранспортных единиц соответствующих габаритов. При проектировании учитывалось наличие холостого хода буксирного судна, при котором скорость движения обычно варьирует в диапазоне 15–20 км/ч [Минаев и др., 1991]. В действительности из-за большого гидродинамического сопротивления эти суда буксируют лесотранспортные единицы с вышеупомянутой скоростью 4-6 км/ч. В результате во время буксировки гребные винты и двигатели используются недостаточно эффективно. Предлагаемый буксировочный модуль, спроектированный под конкретный режим движения, при отсутствии холостого хода может быть лишён этого недостатка. Анализ материалов, имеющихся в соответствующей литературе, показал, что для такого проектирования гребных винтов с учётом всех отмеченных особенностей эксплуатации и конструкции упомянутого буксировочного модуля требуется дополнительная проработка данной темы.

Цель исследования – получение научно обоснованных параметров гребных винтов буксировочных модулей, обуславливающих снижение затрат на буксировку лесотранспортных единиц в условиях средних и малых рек.

Метод исследования – теоретический. Опирались на методику обоснования параметров гребных винтов буксирных судов, внося в алгоритм вычислений изменения, продиктованные особенностями конструкции и эксплуатации предлагаемого устройства.

Результаты исследования и их обсуждение. Гребные винты являются частью так называемого пропульсивного комплекса, в который кроме них входят в данном случае плавучее основание буксировочного модуля и двигатель или, в общем случае, двигатели. Взаимодействие с двигателями осуществляется через трансмиссию. Буксировочное устройство перемещается благодаря вращению гребных винтов, при этом его плавучее основание через водную среду оказывает влияние на работу этих винтов. При движении устройства у его плавучего основания, в том числе и в месте расположения винтов, имеет место попутный поток, который сказывается на их работе.

С передней по ходу движения устройства стороны вращающихся винтов возникает разряжение, то есть имеет место всасывание воды, которое оказывает влияние на плавучее основание устройства. На работу системы большое влияние оказывает гидродинамическое сопротивление движению буксируемой лесотранспортной единицы, передаваемое через канат на устройство. Сопротивление воды движению плавучего основания самого устройства в данном случае весьма незначительно по сравнению с вышеупомянутым, особенно при указанных скоростях буксировки.

В условиях влияния на работу гребных винтов большого количества факторов целесообразно, по возможности, зафиксировать некоторые из них с соответствующим обоснованием. Опираясь на реалии практической деятельности и имея представление о порядке величины мощности, требуемой в данном случае, решая вопрос о силовой установке, выбор остановили на отечественном двигателе ЯМЗ-53412 с мощностью 125 кВт, или 170 л.с. с частотой вращения вала 2200 оборотов в минуту. Частота вращения вала при максимальном крутящем моменте – 1300–1600 оборотов в минуту. Этот двигатель выпускается специально для судов относительно небольшой мощности, и чаще именно он используется при их изготовлении в настоящее время.

С учётом практического опыта расчётную скорость буксировки принимаем из диапазона 4-6 км/ч относительно воды. Лесотранспортные единицы имеют большое гидродинамическое сопротивление. Зависимость этого сопротивления от скорости движения квадратичная, поэтому при транспортировке указанных единиц стараются максимально использовать естественную энергию движущегося потока воды. Скорость 4-6 км/ч нужна для обеспечения достаточного натяжения продольных связей буксируемой лесотранспортный единицы, что необходимо для получения приемлемой управляемости её движением.

Важнейшей характеристикой гребных винтов, особенно при буксировке, является их полезная тяга. Она в значительной степени зависит от их диаметра. Ограничения по диаметру винтов у обычных судов связаны с их осадкой в кормовой части. Конструкция предлагаемого устройства такова, что именно это ограничение отсутствует. Однако приходится иметь в виду, что глубины на маршруте буксировки в рассматриваемом случае зачастую невелики. Здесь именно они являются ограничивающим фактором при обосновании диаметра винтов. Расчётный вертикальный размер первичных лесотранспортных единиц и их осадка, а также минимальная расчётная глубина на маршруте обоснованы при разработке концепции эффективной транспортировки лесоматериалов по сетям малых и средних рек, базирующейся на принципе единого транспортного пакета [Харитонов, Посыпанов,

2008; Посыпанов, 2016, 2017]. С учётом перечисленных факторов предварительно ориентировались на диаметр гребных винтов 0,6 м.

В данном случае ставилась задача получить при заданной мощности двигателя, скорости буксировки и диаметре винта максимальную тягу. В результате предварительных расчетов установили, что при мощности двигателя 125 кВт применение одного винта малого диаметра (0,6-0,8 м) при скорости буксировки 4–6 км/ч предполагает появление кавитации [Войткунский и др., 1982; Larsson et al., 2014], недостаточную прочность либо малую тягу. Поскольку существенное увеличение диаметра винта в данном случае может быть весьма проблематичным, было принято решение при том же двигателе использовать два винта. Анализ показал, что это может позволить существенно увеличить общую тягу винтов. При этом мощность двигателя, приходящаяся на один винт, составит 62,5 кВт, или 85 л.с.

Так как винты предлагаемого устройства проектируются целенаправленно только под рабочий режим с буксировкой на особо малых скоростях, диаграммы, используемые при предварительном расчёте судовых винтов [Кеслер, 2019], использовать не удалось, поскольку входная величина не попадает в диапазон значений, для которого они построены. Поэтому в алгоритм расчётов были внесены некоторые изменения.

Мощность, принимаемая каждым винтом, определяется по формуле

$$N_{\text{в}} = N_D \eta_1 \eta_2, \tag{1}$$

где N_D – эффективная мощность, Вт; η_1, η_2 – к.п.д., учитывающие потери на трение понижающей передачи и у валопровода. Приняли $\eta_1 = \eta_2 = 0{,}97$. В результате получили $N_{\text{в}} = 58{,}8$ кВт, или 80 л.с.

Плавучее основание предлагаемого устройства катамаранного типа содержит два понтона длиной 6,5 м, расчётная осадка – 0,35 м, водоизмещение $V = 1{,}76$ м^3, коэффициент полноты водоизмещения $\delta = 0{,}57$.

Влияние на работу винтов попутного потока учитывается с помощью соответствующего коэффициента. Для его определения воспользовались формулой

$$\varphi = 0{,}11 + \frac{0{,}16}{x}\delta^x \sqrt{\frac{\sqrt[3]{V}}{D}}, \tag{2}$$

где D – диаметр винтов, м; x – величина, принимаемая для бортовых винтов равной 2. Винты считаем бортовыми, поскольку они смещены относительно диаметральных плоскостей понтонов предлагаемого плавучего основания.

При числах Фруда [Войткунский и др., 1982; Kleinstreuer, 2010] более 0,2 при расчёте коэффициента φ вводится поправка в связи с волнообразованием

[Войткунский, 1988], которое при этом начинает оказывать влияние на указанный поток. Число Фруда в данном случае

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}}, \tag{3}$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2; L – длина понтонов, м; v – скорость буксировочного устройства относительно воды, м/с.

Поправка вычисляется по формуле

$$\Delta\varphi = -0,3\delta\left(\frac{v}{\sqrt{gL}} - 0,2\right). \tag{4}$$

Коэффициент засасывания гребных винтов, полностью погруженных в воду, при расположении по бортам определяли по формуле

$$t = 0,8\varphi\left(1 + 0,25\varphi\right). \tag{5}$$

Скорость поступательного движения гребных винтов относительно воды с учётом попутного потока определяли по формуле

$$v_0 = v\left(1 - \varphi\right). \tag{6}$$

При имеющемся наборе данных может быть определён безразмерный критерий

$$k_d = 8,66 D v_0 \sqrt{\frac{\rho v_0}{N_в}}, \tag{7}$$

где ρ – плотность воды, кг/м^3.

Поскольку значения k_d в рассматриваемом диапазоне скоростей меньше 2, приняли четырёхлопастной винт, что очень типично для буксирных судов. Учитывая опыт эксплуатации винтов указанных судов, предварительно воспользовались диаграммами, построенными по способу Папмеля для наиболее высокого из имеющихся дискового отношения (0,7). Получили значения относительной поступи винта λ, его шагового отношения H/D, коэффициента момента K и коэффициента полезного действия винта η_V. По относительной поступи винта рассчитали оптимальную частоту его вращения, используя формулу

$$n = \frac{v_0}{\lambda D}. \tag{8}$$

Зная D и шаговые отношения H/D, определили величины шага H.

Пропульсивные к.п.д. определяли по формуле

$$\eta = \frac{1-t}{1-\varphi}\eta_V. \tag{9}$$

Полезную тягу одного винта вычисляли из выражения

$$P = \frac{N_в \eta}{\upsilon}. \tag{10}$$

Общую тягу винтов определяли в результате удвоения полученной.

По величинам коэффициента момента гребного винта определяли соответствующие вращающие моменты.

$$M = K\rho n^2 D^5. \tag{11}$$

Упор винта определяется по формуле

$$P_у = \frac{P}{1-t}. \tag{12}$$

Дисковое отношение винта исходя из условия прочности:

$$\Theta_1 \geq \frac{4mP_y}{\pi D^2 P_{max}}, \tag{13}$$

где m – коэффициент запаса прочности, для буксиров m = 1,50; P_{max} – максимально допустимая нагрузка на один квадратный метр поверхности лопасти, Н. При четырёх лопастях, выполненных из стали, P_{max} = 55 000 Н.

Дисковое отношение исходя из максимально допустимой относительной толщины лопасти:

$$\Theta_2 \geq 0{,}0813\left(\frac{az}{D\delta_{max}}\right)^{2/3}\sqrt{mP/1000}, \tag{14}$$

где a – коэффициент, зависящий от прочности материала лопасти, для углеродистой стали a = 0,065; z – количество лопастей; δ_{max} – максимальная относительная толщина лопасти в сечении, находящемся на расстоянии 0,6–0,7 радиуса от оси винта, δ_{max} = 0,09.

Дисковое отношение исходя из условия недопустимости кавитации:

$$\Theta_3 \geq 1275\xi\frac{K_c}{p_s}(nD)^2, \tag{15}$$

где ξ – коэффициент, зависящий от величины нагрузок на лопасти, для буксиров ξ = 1,6; K_c – кавитационная характеристика, зависящая от шагового

отношения и относительного скольжения, определяется по графикам [Кеслер, 2019]; p_s – абсолютное гидростатическое давление на глубине оси гребного винта, Па.

$$p_s = p_a + \rho g h - p_n, \quad (16)$$

где p_a – атмосферное давление, 101300 Па; h – глубина, соответствующая оси винта, м; p_n – давление насыщенных паров воды, Па, при 17 °С – 2000 Па. Глубину h приняли равной половине диаметра винта плюс 0,1 м.

Принимая величину дискового отношения гребного винта, ориентировались на наибольшие из полученных значений.

Результаты выполненных расчётов для винтов диаметром 0,6 м приведены в табл. 1. Для расширения возможностей анализа полученных данных скоростной диапазон буксировки расширили до 7 км/ч.

Аналогичные расчёты выполнили при диаметрах винтов 0,7 м, 0,8 м, 0,9 м и 1,0 м. Используя полученные данные, построили графики (рис. 1).

Согласно рис. 1 при использовании винтов диаметром 0,6 м и 0,7 м наибольшая полезная тяга имеет место при скорости буксировки 4 км/ч. С увеличением скорости полезная тяга монотонно уменьшается. Для винтов с диаметрами 0,8 м, 0,9 м и 1,0 м характерно некоторое увеличение тяги примерно до середины рассматриваемого диапазона скоростей, а затем уменьшение, причём чем больше диаметр, тем меньше амплитуда изменения полезной тяги. При увеличении проектной скорости буксировки от 4,0 км/ч до 5,5 км/ч полезная тяга увеличивается у более крупных винтов на 2–8%. Сопротивление перемещению в воде лесотранспортных единиц при квадратичной зависимости от скорости возрастёт при этом существенно больше. То есть при большей полезной тяге на скорости 5,5 км/ч возможно буксировать лесотранспортную единицу гораздо меньшего объёма, чем при скорости, близкой к нижней границе диапазона.

Анализ вычисленных значений минимально допустимых дисковых отношений показал, что при скорости буксировки 4,0 км/ч прочность винтов, изготовленных из стали, при диаметре 0,6 м будет недостаточной. С учётом изложенной информации, ориентируясь на перемещение лесотранспортных единиц преимущественно за счёт естественной энергии водных потоков, принимаем расчётную скорость буксировки в дальнейшем 4,5 км/ч. При этом полезная тяга для винтов всех рассмотренных диаметров близка к максимальной. Данная скорость достаточна для обеспечения управляемости буксируемых лесотранспортных единиц.

Таблица 1

Результаты расчёта гребных винтов диаметром 0,6 м

Calculation results for propellers with a diameter of 0.6 m

Обозначение величины	Значения при разных скоростях буксировки						
v, км/ч (м/с)	4,0 (1,11)	4,5 (1,25)	5,0 (1,39)	5,5 (1,53)	6,0 (1,67)	6,5 (1,81)	7,0 (1,94)
Fr	0,139	0,157	0,174	0,191	0,209	0,226	0,244
φ	0,147	0,147	0,147	0,147	0,145	0,142	0,139
t	0,122	0,122	0,122	0,122	0,121	0,118	0,115
v_0, м/с	0,948	1,066	1,185	1,303	1,424	1,548	1,673
k_d	0,63	0,75	0,87	1,01	1,15	1,31	1,47
λ	0,090	0,090	0,100	0,105	0,110	0,115	0,120
η_v	0,140	0,145	0,150	0,160	0,165	0,170	0,177
H/D	0,53	0,54	0,55	0,56	0,57	0,58	0,59
H, м	0,318	0,324	0,33	0,336	0,342	0,348	0,354
K	0,0185	0,0190	0,0195	0,0200	0,0203	0,0205	0,0207
P, кН	7,63	7,02	6,54	6,34	5,99	5,69	5,50
P_o, кН	15,25	14,04	13,08	12,68	11,98	11,39	11,00
η	0,144	0,149	0,154	0,165	0,170	0,175	0,182
n, $с^{-1}$	17,6	19,7	19,7	20,7	21,6	22,4	23,2
M, Нм	443	576	591	666	735	803	869
$P_у$, кН	8,69	8,00	7,45	7,22	6,82	6,46	6,22
Θ_1	0,752	0,693	0,645	0,625	0,590	0,559	0,539
Θ_2	0,526	0,512	0,499	0,494	0,485	0,477	0,472
Θ_3	0,503	0,636	0,636	0,698	0,760	0,822	0,881

Уточняющие расчёты выполнили методом последовательного приближения. Значения D, $N_в$, n, v, φ, t, Θ взяты из ранее выполненных расчётов и в процессе уточняющих расчетов остаются неизменными. Начальное значение P также брали из ранее выполненных расчетов. По имеющимся данным вычисляли упор винта с помощью формулы (12). Далее определяли относительную поступь винта из выражения

$$\lambda = \frac{\upsilon_0}{nD}. \qquad (17)$$

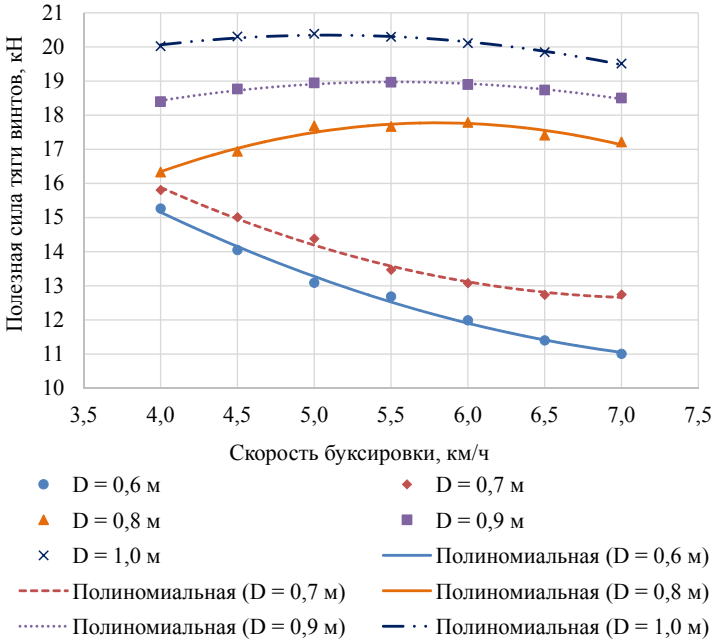


Рис. 1. Зависимость общей полезной тяги от скорости буксировки при различных диаметрах винтов

Fig. 1. Dependence of the total useful thrust on the towing speed for different propeller diameters

Затем вычисляли коэффициент упора по формуле

$$K_1 = \frac{P_y}{\rho n^2 D^4}. \quad (18)$$

Используя значения λ и K_1, с помощью диаграмм Папмеля находили шаговое отношение и коэффициент полезного действия винта.

Далее по формуле (9) вычисляли пропульсивный коэффициент полезного действия. Завершая итерацию, определяли по полученным данным мощность, подводимую к винту, используя выражение

$$N_в = \frac{P\upsilon}{\eta}. \quad (19)$$

Если полученная мощность не соответствовала принятой перед уточняющим расчётом, переходили к следующей итерации. Значение P для следующей итерации определяли с помощью формулы

$$P_{i+1} \approx P_i \frac{N_в}{N_{вi}}, \tag{20}$$

где i – порядковый номер итерации.

Расчёты в следующей итерации выполняли по аналогии с предыдущей. Уточняющий расчёт продолжали до тех пор, пока итоговое значение мощности, подводимой к винту, не совпадало с начальным. Значения величин, полученные в заключительной итерации, принимали за расчётные. Уточняющие расчёты выполнили для всех ранее рассмотренных диаметров винтов. Для примера здесь приведён уточняющий расчёт для винтов диаметром 0,8 м (табл. 2).

Таблица 2

Уточняющий расчёт винтов диаметром 0,8 м

Clarifying calculation of propellers with a diameter of 0.8 m

D=0,8 м, $N_в$=58,8 кВт, n=10,5 с$^{-1}$, v = 1,25 м/с, φ=0,142, t= 0,118, θ=0,7								
№ итерации	1	2	3	4	5	6	7	8
P, кН	8,54	10,65	8,71	9,92	9,20	10,41	9,52	9,71
P_y, кН	9,68	12,07	9,87	11,25	10,42	11,79	10,78	11,01
λ	0,128	0,128	0,128	0,128	0,128	0,128	0,128	0,128
K_1	0,214	0,267	0,219	0,249	0,231	0,261	0,239	0,244
H/D	0,590	0,680	0,590	0,650	0,625	0,690	0,640	0,620
η_v	0,220	0,180	0,205	0,190	0,215	0,180	0,210	0,200
η	0,226	0,185	0,211	0,195	0,221	0,185	0,216	0,206
$N_в$, кВт	47,2	71,9	51,6	63,4	52,0	70,2	55,0	59,0

Поскольку $N_в$ и n при уточняющем расчёте не изменились, неизменным остался и вращающий момент.

Используя результаты уточняющих вычислений для винтов всех указанных диаметров, построили графики, приведённые на рис. 2. По ним видно, что увеличение полезной тяги винтов более интенсивно происходит в диапазоне диаметров 0,6–0,7 м. Далее интенсивность постепенно снижается. При D = 0,7 м полезная тяга больше, чем при D = 0,6 м, примерно на 15%. В пределах всего диапазона от 0,6 м до 1,0 м увеличение тяги составило около 42%.

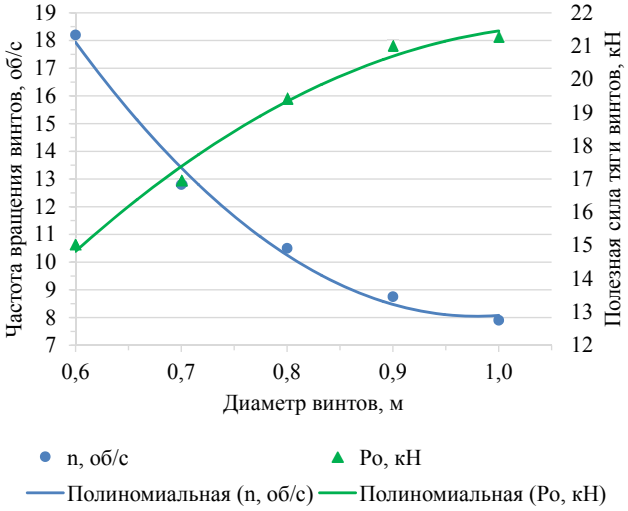


Рис. 2. Графики зависимости частоты вращения винтов и общей полезной тяги от их диаметра при скорости буксировки 4,5 км/ч и мощности двигателя 125 кВт /ЯМЗ-53412/

Fig. 2. Graphs of the dependence of the propeller rotation frequency and the total useful thrust on their diameter at a towing speed of 4.5 km/h and an engine power of 125 kW /YaMZ-53412/

Наличие графика, наглядно отражающего указанную зависимость, существенно облегчает решение вопроса о выборе диаметра винтов для предлагаемого устройства с заданной мощностью двигателя. По графику (рис. 2) можно быстро определить и требуемую частоту вращения винтов. В каждом конкретном случае для устройства может быть принят тот или иной диаметр винтов с учётом как приведённой информации, так и конкретных условий эксплуатации, в частности предполагаемых глубин на маршрутах буксировки, размеров буксируемых лесотранспортных единиц. Вполне возможен вариант обеспечения устройства разными комплектами винтов, которые в данном случае можно заменять без особых проблем после подъёма устройства из воды перед обратной перевозкой. Это может быть целесообразным, например, при снижении уровней воды на маршруте или при отправке на другой маршрут с иными лимитирующими глубинами. В этом ещё одно существенное преимущество предлагаемого устройства перед обычными буксирными судами, применяемыми на лесосплаве. Даже если бы выгрузка этих

судов не была столь проблематичной, возможность прохождения ими мелководных участков диктуется в первую очередь осадкой судна, а не размером винтов, как в рассматриваемом случае.

После решения указанного вопроса с помощью графиков количественные характеристики могут быть уточнены с помощью полученных аппроксимирующих выражений.

$$P_o = -29,89D^2 + 64,41D - 13,06; \quad (21)$$

$$n = 67,14D^2 - 131,83D + 72,83. \quad (22)$$

Получено аппроксимирующее выражение и для вращающего момента

$$M = 1810D - 559. \quad (23)$$

Соответствующие им достоверности аппроксимации очень высоки: R^2 = 0,988; 0,988; 0,995 соответственно. Это свидетельствует о достаточно высокой точности получаемых по ним результатов.

В аппроксимирующих зависимостях (21)–(23) общая полезная тяга P_o измеряется в кН, частота вращения n – в $с^{-1}$, вращающий момент M – в Нм.

В дополнение к полученным величинам принимается к сведению, что дисковое отношение для рассматриваемых винтов – 0,7, шаговое отношение для всех винтов с диаметром от 0,7 м до 1,0 м – 0,62, и лишь при диаметре 0,6 м оно равно 0,53. Эти данные позволяют рассчитать необходимые для изготовления конструктивные размеры винтов, а также выполнить расчёт привода по известным методикам [Кеслер, 2019].

Заключение. С целью максимального использования энергии водного потока буксировку лесотранспортных единиц, обладающих большим гидродинамическим сопротивлением, целесообразно осуществлять со скоростью, незначительно превышающей 4 км/ч относительно воды. Так обеспечивается управляемость буксируемой единицей. Винты предлагаемого устройства проектируются целенаправленно лишь под режим буксировки, что предполагает повышение эффективности их работы в этом режиме. При столь малой скорости эффективное использование мощности двигателя и получение наибольшей тяги связано с применением винтов с особо малым шаговым отношением. Это предполагает необходимость увеличения их диаметра и частоты вращения. При буксировке лесотранспортных единиц предлагаемым устройством диаметр винтов в условиях средних и малых рек ограничивается глубинами на маршруте и, в отличие от судов, не связан непосредственно с осадкой корпуса. При мощности 125 кВт наиболее приемлемого для предлагаемого устройства двигателя применение одного

винта малого диаметра (0,6–0,8 м) неэффективно. Полезная тяга при этом мала, стремление её увеличить путём повышения частоты вращения винта связано с появлением недопустимого режима кавитации, прочность винта становится недостаточной. Применение двух движителей, работающих от одного двигателя, позволяет использовать винты диаметром от 0,6 м при скорости 4,5 км/ч и при этом существенно повысить силу тяги. Для предлагаемого устройства получены графики и эмпирические формулы с высокой достоверностью аппроксимации, позволяющие в практической деятельности легко определять основные параметры винтов при различных условиях эксплуатации. В указанных условиях предполагается возможность подбора винтов диаметром от 0,6 до 1,0 м. В этом диапазоне общая тяга винтов увеличивается от 15,0 до 21,3 кН, то есть на 42%. Наиболее интенсивное увеличение происходит в начальной части диапазона, при изменении диаметра от 0,6 до 0,7 м общая полезная тяга увеличивается на 15%. Шаговое отношение на всём диапазоне – в пределах 0,53–0,62.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Войткунский Я.И. Сопротивление движению судов. 2-е изд., доп. и перераб. Л.: Судостроение, 1988. 288 с.

Войткунский Я.И., *Фадеев Ю.И.*, *Федяевский К.К.* Гидромеханика. Л.: Судостроение, 1982. 568 с.

Кеслер А.А. Расчет и анализ показателей пропульсивного комплекса судна. Н. Новгород: ВГУВТ, 2019. 76 с.

Минаев А.Н., *Беленов И.А.*, *Козленков Н.И.* Лесосплавной флот. М.: Экология, 1991. 272 с.

Посыпанов С.В. Исследование геометрических характеристик плавающей двухъярусной пакетной сплоточной единицы // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2016. Вып. 215. С. 176-191. DOI: 10.21266/2079-4304.2016.215.176-191.

Посыпанов С.В. Определение геометрических параметров плавающего транспортного пакета круглых лесоматериалов численным методом // ИВУЗ. Лесной журнал. 2017. №1. С. 141-153. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.1.141.

Харитонов В.Я., *Посыпанов С.В.* Ресурсы отдаленных лесных массивов и возможность их освоения сплавом // ИВУЗ. Лесной журнал. 2008. №2. С. 30-36.

Kleinstreuer C. Modern Fluid Dynamics, Springer Netherlands, 2010. 622 p. DOI: 10.1007/978-1-4020-8670-0.

Larsson L., *Stern F.*, *Visonneau M.* Numerical ship hydrodynamics, Springer Netherlands, 2014. 318 p. DOI: 10.1007/978-94-007-7189-5.

References

Kleinstreuer C. Modern Fluid Dynamics. Springer Netherlands, 2010. 622 p. DOI: 10.1007/978-1-4020-8670-0.

Kharitonov V.Ya., *Posypanov S.V.* Resources of remote forest arrays and the possibility of their development by rafting. *IVUZ. Lesnoy zhurnal*, 2008, no. 2, pp. 30–36. (In Russ.)

Kesler A.A. Calculation and analysis of the vessel's propulsion complex performance. Nizhniy Novgorod: VGUVT, 2019. 76 p. (In Russ.)

Larsson L., *Stern F.*, *Visonneau M.* Numerical ship hydrodynamics, Springer Netherlands, 2014. 318 p. DOI: 10.1007/978-94-007-7189-5.

Minaev A.N., *Belenov I.A.*, *Kozlenkov N.I.* Timber rafting fleet. Moscow: Ekologiya, 1991. 272 p. (In Russ.)

Posypanov S.V. Investgation of the geometric characteristics of a floating bilevel packaged rafting unit. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2016, iss. 215, pp. 176–191. DOI: 10.21266/2079-4304.2016.215.176-191. (In Russ.)

Posypanov S.V. Determination of geometric parameters of a floating transport package of round timber using a numerical method. *IVUZ. Lesnoy zhurnal*, 2017, no. 1. pp. 141–153. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.1.141. (In Russ.)

Voytkunskiy Ya.I. Resistance to ship traffic. Leningrad: Sudostroenie, 1988. 288 p. (In Russ.)

Voytkunskiy Ya.I., *Fadeev Yu.I.*, *Fedyaevskiy K.K.* Hydromechanics. Leningrad: Sudostroenie, 1982. 568 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 24.11.2025

Посыпанов С.В., Калитин Н.С., Зарипов Ш.Г. Обоснование параметров гребных винтов буксировочного устройства для транспортировки малогабаритных лесотранспортных единиц // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2026. Вып. 259. С. 306–321. DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.306-321

Экономически оправданное освоение основных запасов древесного сырья зачастую возможно лишь при его доставке из удалённых лесных массивов по сети средних и малых рек. Из-за малых глубин и короткой навигации применение существующих судов на них, как правило, невозможно или экономически нецелесообразно. Проблема может быть решена с помощью предлагаемого относительно дешёвого и простого буксирного устройства с малой осадкой, которое к месту отправки лесоматериалов доставляется автотранспортом. Работа выполнена с целью получения параметров гребных винтов предлагаемого устройства, обуславливающих снижение затрат на буксировку в указанных условиях. Отсутствие холостого хода позволяет проектировать винты целенаправленно лишь под режим буксировки, что предполагает повышение

эффективности их работы в этом режиме. С целью максимального использования энергии потока буксировку единиц, обладающих большим сопротивлением, решено осуществлять с минимальной скоростью, обеспечивающей управляемость ими. При такой скорости эффективное использование мощности двигателя и получение наибольшей тяги связано с применением винтов с особо малым шаговым отношением. Это предполагает увеличение их диаметра и частоты вращения. В рассматриваемом случае диаметр винтов ограничивается глубинами на маршруте и, в отличие от судов, не связан непосредственно с осадкой корпуса. При мощности 125 кВт наиболее приемлемого для предлагаемого устройства двигателя применение одного винта малого диаметра (0,6-0,8 м) при скорости буксировки 4,5 км/ч предполагает появление кавитации, недостаточную прочность либо малую тягу. При двух движителях можно использовать винты диаметром от 0,6 м с существенным увеличением тяги. Для предлагаемого устройства получены графики и эмпирические формулы, позволяющие в практической деятельности легко определять параметры винтов при различных условиях эксплуатации. Изменение диаметра винтов от 0,6 до 1,0 м приводит к увеличению общей тяги от 15,0 до 21,3 кН.

Ключевые слова: лесосплав, буксировка, гребные винты, лесотранспортные единицы.

Posypanov S.V., Kalitin N.S., Zaripov Sh.G. Justification of the parameters of the propellers of a towing device for the transportation of small-sized timbertransport units. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2026, iss. 259, pp. 306–321 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.306-321

Economically viable development of the main reserves of wood raw materials is often only possible if it is delivered from remote forest areas via a network of medium and small rivers. Due to shallow depths and short navigation periods, the use of existing vessels on them is generally impossible or economically impractical. The problem can be solved by using the proposed relatively cheap and simple shallow draft towing device, which is delivered to the timber place of departure by road transport. The work was carried out with the aim of obtaining the parameters of the propellers of the proposed device, which would reduce towing costs under the specified conditions. The absence of idle speed allows propellers to be designed specifically for towing mode, which increases their operating efficiency in this mode. In order to maximize the use of flow energy, it was decided to tow units having high resistance at a minimum speed that ensures their control. At this speed, efficient use of engine power and obtaining maximum thrust is achieved by using propellers with a particularly small pitch ratio. This involves increasing their diameter and rotation speed. In the case under consideration, the diameter of the propellers is limited by the depths along the route and, unlike ships, is not directly related to the hull draft. With a power of 125 kW, the most suitable engine for the proposed device, the use of one small diameter propeller (0.6-0.8

m) at a towing speed of 4.5 km/h suggests the occurrence of cavitation, insufficient strength, or low thrust. With two propellers, their diameter can be from 0.6 m, and the thrust increases significantly. For the proposed device, graphs and empirical formulas have been obtained, which make it possible to easily determine the parameters of propellers under various operating conditions in practice. Changing the propellers diameter from 0.6 to 1.0 m results in an increase in the total thrust from 15.0 to 21.3 kN.

K e y w o r d s : timber rafting, towing, propellers, timber transport units.

ПОСЫПАНОВ Сергей Валентинович – профессор Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова, доктор технических наук. ResearcherID: ABF-6542-2021. ORCID: 0000-0003-0600-7089. SPIN-код: 8592-0690.

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: s.posypanov@narfu.ru

POSYPANOV Sergey V. – DSc (Technical), Professor, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. ResearcherID: ABF-6542-2021, ORCID: 0000-0003-0600-7089. SPIN-code: 8592-0690.

163002. Severnoy Dviny emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: s.posypanov@narfu.ru

КАЛИТИН Никита Сергеевич – аспирант Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова.

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: kalitin.n@edu.narfu.ru

KALITIN Nikita S. – PhD student, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov.

163002. Severnoy Dviny emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: kalitin.n@edu.narfu.ru

ЗАРИПОВ Шакур Гаянович – профессор Лесосибирского филиала Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева, доктор технических наук, доцент. ORCID: 0000-0001-6483-2453.

662543, ул. Победы, д. 29, г. Лесосибирск, Красноярский край, Россия. E-mail: zaripov_sh@mail.ru

ZARIPOV Shakur G. – DSc (Technical), Lesosibirsk Branch of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Associate Professor. ORCID: 0000-0001-6483-2453.

662543. Pobedy str. 29. Lesosibirsk. Krasnoyarsk Krai. Russia. E-mail: zaripov_sh@mail.ru

УДК 631*36

Т.А. Охапкин, А.В. Андронов, В.А. Кацадзе, В.А. Кондратюк

СРАВНЕНИЕ И АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ ЗАХВАТНОГО УСТРОЙСТВА ХАРВЕСТЕРНЫХ ГОЛОВОК

Введение. Почти все харвестерные головки, представленные на рынке в настоящее время, имеют принципиально схожие конструкции. Однако из-за неоднородности условий эксплуатации, различного состава древостоя, а также из-за необходимости сочетать надежность и точность выполнения операций с простотой и дешевизной устройств разрабатываются различные виды отдельных механизмов харвестерных головок. Если, например, пильный механизм или механизм протяжки имеют небольшое количество вариаций, то механизм захвата, играющий важную роль во всех операциях по заготовке дерева, имеет большее количество видов, изучению которых не уделяется должного внимания [Laurier, 2010]. Об основных типах захватного механизма, за исключением гибридного механизма захватного устройства, пойдет речь в данной статье. В российском научном поле работ по данной теме не представлено.

Целью исследования является анализ различных типов захватных устройств (ЗУ) харвестерных головок, их кинематических схем и выявление принципиальных отличий в усилии протяжки, необходимом для успешной протяжки обрабатываемого дерева в головках с концентрическим и линейным механизмами ЗУ.

Материалы и методология исследования. Исследование проводилось с использованием документов, мануалов и изображений из сети Интернет, а также посредством изучения натурных образцов устройств.

Результаты исследования. Теоретическая часть исследования. Лесозаготовка сортиментным способом предполагает использование специализированного технологического оборудования – харвестерной головки. Это орган лесозаготовительной машины, который осуществляет захват дерева, его валку, обрезку сучьев и раскряжевку на сортименты необходимой длины.

Если рассматривать вышеуказанные операции более подробно и деконструировать их, можно заметить, насколько большую роль в работе харвестерной головки играет захватывание дерева (рис. 1).

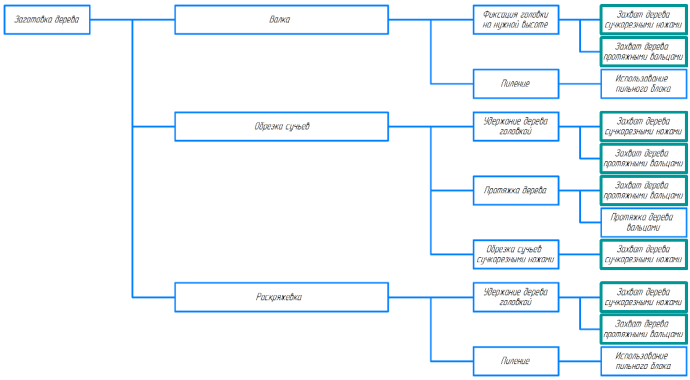


Рис. 1. Схема деконструкции операций заготовки дерева
Fig. 1. Simplified FAST diagram of logging operations

Захватное устройство харвестерной головки состоит из сучкорезных ножей и протяжных вальцов, установленных на рычаги. Захватное устройство при помощи гидроцилиндров и системы тяг обеспечивает нагрузку, направленную нормально к поверхности дерева при захвате ствола, его удерживании и протяжке. Усилия, обеспечиваемые вальцами и ножами, позволяют дереву совершать поступательное движение при обрезке сучьев так, чтобы ножи срезали сучья как можно ближе к стволу и не врезались в сам ствол [Goubet et al., 2013].

Нормальная нагрузка позволяет протяжным вальцам, вращаясь, оказывать тангенциальную нагрузку на дерево и протягивать его, а ножам – срезать сучья у основания.

В существующих моделях харвестерных головок применяются три механизма захватного устройства [Goubet et al., 2013]:

- концентрический механизм;
- линейный механизм;
- гибридный механизм.

Данные типы механизмов, в свою очередь, имеют ряд подвидов. Они будут рассмотрены ниже.

Гибридный механизм ЗУ – вид ЗУ, призванный сочетать преимущества концентрического и линейного захватных механизмов. В силу своей сложности и сравнительно небольшой распространенности он не будет рассматриваться в рамках статьи.

Концентрический механизм ЗУ – это вид механизма ЗУ, в котором рабочие органы харвестерной головки совершают движение в плоскости *ZY*, перпендикулярной оси вращения данных рабочих органов (рис. 2).

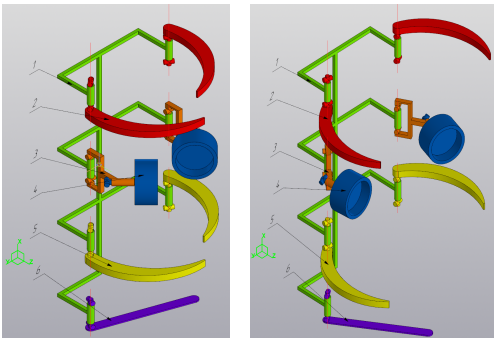


Рис. 2. Упрощенная схема концентрического захватного механизма харвестерной головки: 1 – рама, 2 – верхние сучкорезные ножи, 3 – рычаги протяжных вальцов, 4 – протяжные вальцы, 5 – нижние сучкорезные ножи, 6 – пильный блок

Fig. 2. Simplified model of a concentric gripping mechanism: 1 – frame, 2 – upper delimbering knives, 3 – feed rollers arms, 4 – feed rollers, 5 – lower delimbering knives, 6 – chain saw

В такой конструкции элемент рабочего органа ЗУ (сучкорезный нож или рычаг протяжного вальца) составляет шарнирное соединение стержня с неподвижной опорой (рамой), которое осуществляет движение только в одной плоскости.

Концентрический механизм, принципиально отличающийся от прочих вариантов механизма ЗУ своей геометрией движения рабочих органов, имеет несколько вариаций системы привода движения.

Концентрический механизм с одним приводным элементом является наиболее простой по конструкции вариацией концентрического механизма. Схема такого механизма изображена на рис. 3. В таком механизме привод рабочего органа харвестерной головки осуществляется при помощи одного приводного элемента (гидроцилиндра).

Механизм, по сути, представляет из себя четырехзвенный механизм с четырьмя кинематическими парами пятого класса, число степеней свободы механизма $W = 1$. При этом, когда захват смыкается на дереве, число степеней свободы механизма $W = 0$.

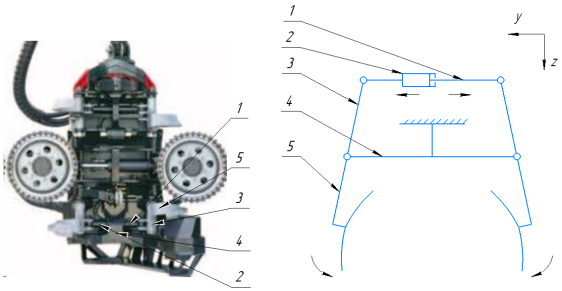


Рис. 3. Харвестерная головка Valmet 370.2 (слева) [Valmet…, 2012] и кинематическая схема механизма нижних сучкорезных ножей с одним приводным элементом (справа): 1 – шток гидроцилиндра, 2 – корпус гидроцилиндра, 3 – рычаг сучкорезного ножа, 4 – рама, 5 – сучкорезный нож

Fig. 3. The Valmet 370.2 harvester head (left) and the kinematic diagram of the mechanism of the lower delimbing knives with a single actuator (right): 1 – hydraulic cylinder rod, 2 – hydraulic cylinder housing, 3 – delimbing knife lever, 4 – frame, 5 – delimbing knife

В связи с этим движение рабочих органов – сучкорезных ножей или рычагов протяжных вальцов – несимметрично, что может приводить к захвату дерева, при котором дерево расположено не ровно посередине относительно рабочих органов головки, что может привести к некачественной обработке дерева и непредусмотренным нагрузкам на рабочие органы.

Для предотвращения возникновения такого явления плоскость рамы, к которой прижимается ствол обрабатываемого дерева, выполняют по форме похожей на латинскую букву «V», что обеспечивает правильное позиционирование дерева в захвате.

В силу вышеуказанных обстоятельств такой вид механизма не применяется в конструкциях привода рычагов протяжных вальцов в существующих харвестерных головках.

Концентрический механизм захватного устройства с двумя приводными элементами, в отличие от предыдущего рассмотренного механизма, использует два независимых приводных элемента (гидроцилиндра). Схема данного механизма представлена на рис. 4.

Механизм можно рассматривать как два механизма, состоящие из четырех кинематических пар пятого класса, результирующее количество степеней свободы механизма $W = 1$, как и у концентрического механизма с

одним приводным элементом. Однако в данном механизме отсутствует несимметричность движения рабочих органов благодаря специфической гидравлической системе, обеспечивающей симметричность движения рабочих органов.

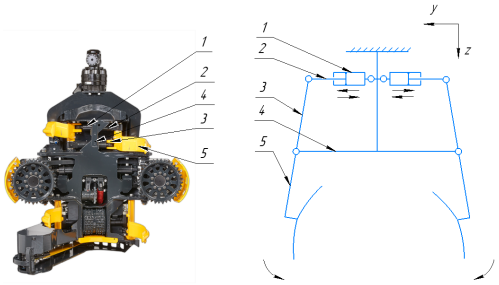


Рис. 4. Харвестерная головка PONSSE H8 (слева) [PONSSE…, 2012] и кинематическая схема механизма верхних сучкорезных ножей с двумя приводными элементами (справа): 1 – корпус гидроцилиндра, 2 – шток гидроцилиндра, 3 – рычаг сучкорезного ножа, 4 – рама, 5 – сучкорезный нож

Fig. 4. Harvester head PONSSE H8 (left) and the kinematic diagram of the mechanism of upper delimbing knives with two actuators (right): 1 – hydraulic cylinder housing, 2 – hydraulic cylinder rod, 3 – delimbing knife lever, 4 – frame, 5 – delimbing knife

Гидравлическая схема изображена на рис. 5. Ключевым элементом в работе схемы является трехсекционный гидравлический распределитель, который посылает гидравлическую жидкость одновременно в оба приводных гидроцилиндра, что обеспечивает синхронность работы приводимых в движение элементов [Best…, 2005].

Когда распределитель находится в центральном положении, и подача гидравлической жидкости перекрыта, она может переходить из одного цилиндра в другой таким образом, что при выдвижении штока одного из цилиндров шток другого движется в обратном направлении. Данный механизм создает большее усилие при удержании дерева, а также обладает большей безопасностью, так как гидросистема спроектирована так, что при выходе из строя одного цилиндра второй продолжает работать и оператор может перенести и положить обрабатываемое дерево. Также, благодаря симметричности движения рабочих органов, данный механизм используется в механизме привода рычагов протяжных вальцов (рис. 6) [Васильев, 2024].

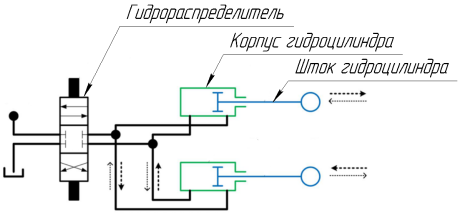


Рис. 5. Гидравлическая схема привода концентрического механизма ЗУ с двумя приводными элементами

Fig. 5. Hydraulic diagram of the concentric gripping mechanism with two actuators

0

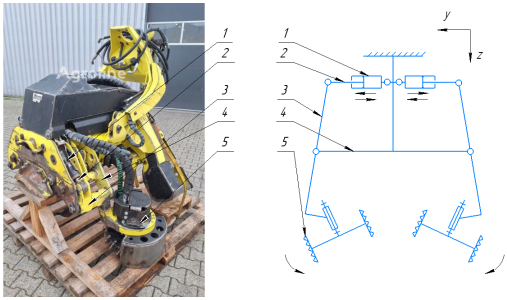


Рис. 6. Харвестерная головка John Deere H480C (слева) [Best…, 2005] и кинематическая схема механизма рычагов протяжных вальцов (справа): 1 – корпус гидроцилиндра, 2 – шток гидроцилиндра, 3 – рычаг протяжного вальца, 4 – рама, 5 – протяжной валец

Fig. 6. The John Deere H480C harvester head (left) and the kinematic diagram of the feed roller lever mechanism (right): 1 – hydraulic cylinder housing, 2 – hydraulic cylinder rod, 3 – feed roller lever, 4 – frame, 5 – feed roller

Концентрический механизм с одним приводным элементом и соединительной тягой – третий вид концентрического механизма, представлен на рис. 7.

Данный вид механизма сочетает в себе большую простоту конструкции, системы управления, похожие на первый рассмотренный вид механизма ЗУ, и улучшенную по сравнению с первым видом механизма симметричность движения рабочих органов. Механизм состоит из шести кинематических пар пятого класса, благодаря соединительной тяге результирующая степень свободы механизма $W = 0$, что делает позиционирование дерева в ЗУ более точным.

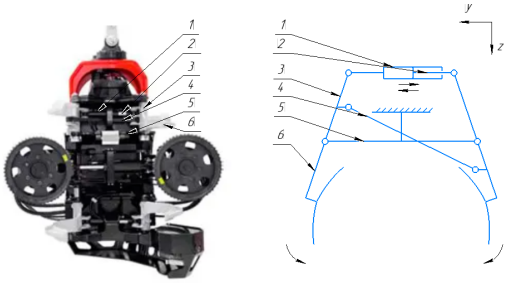


Рис. 7. Харвестерная головка Komatsu 370E (слева) [KOMATSU…, 2012] и кинематическая схема механизма верхних сучкорезных ножей с одним приводным элементом и соединительной тягой (справа): 1 – корпус гидроцилиндра, 2 – шток гидроцилиндра, 3 – рычаг сучкорезного ножа, 4 – соединительная тяга, 5 – рама, 6 – сучкорезный нож

Fig. 7. The Komatsu 370E harvester head (left) and the kinematic diagram of the mechanism of the upper delimbing knives with a single actuator and a coupling bar (right): 1 – hydraulic cylinder housing, 2 – hydraulic cylinder rod, 3 – delimbing knife lever, 4 – coupling bar, 5 – frame, 6 – delimbing knife

Такой вид механизма также используется в конструкции привода рычагов протяжных вальцов (рис. 8).

Концентрический механизм ЗУ является распространенным типом конструкции захватного устройства и используется на большом количестве моделей харвестерных головок. Среди его преимуществ выделяется относительная простота конструкции, а также высокое усилие прижатия ствола обрабатываемого дерева к раме харвестерной головки. Однако механизм такой конструкции в силу геометрического строения и высокой силы прижатия дерева к раме харвестерной головки не может применяться для обработки стволов деревьев, имеющих непрямую форму или высокую гибкость ствола. Более того, в силу особенности конструкции при полном закрытии вальцов и сучкорезных ножей между рабочими органами и рамой остается свободное пространство треугольной формы, что говорит о невозможности обработки слишком тонких стволов деревьев [Angulo, 2016].

Недостатки концентрического механизма захватного устройства могут не иметь большого влияния на работу харвестерной головки, однако в силу

разнообразия условий лесозаготовки, в частности состава древостоя, могут серьезно повлиять на качество обработки дерева и ресурс рабочих органов устройства.

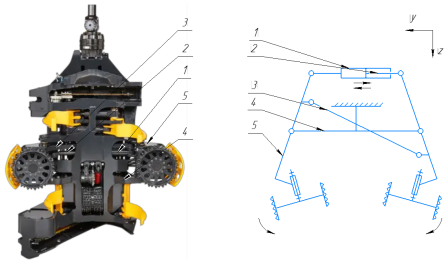


Рис. 8. Харвестерная головка PONSSE H8 HD (слева) [PONSSE…, 2012] и кинематическая схема механизма рычагов протяжных вальцов с одним приводным элементом и соединительной тягой (справа): 1 – корпус гидроцилиндра, 2 – шток гидроцилиндра, 3 – соединительная тяга, 4 – рама, 5 – рычаг протяжного вальца

Fig. 8. The PONSSE H8 HD harvester head (left) and the kinematic diagram of the feed roller lever mechanism with a single actuator and a coupling bar (right): 1 – hydraulic cylinder housing, 2 – hydraulic cylinder rod, 3 – coupling bar, 4 – frame, 5 – feed roller lever

Именно для таких условий работы разработан линейный захватный механизм. Упрощенная кинематическая схема такого типа захватного механизма изображена на рис. 9. Механизм применяется только в конструкции привода рычагов протяжных вальцов, и главным его отличием от концентрического является то, что рычаги протяжных вальцов совершают вращательное движение при захвате по оси, лежащей в плоскости *XY*, перпендикулярной к плоскости перемещения сучкорезных ножей.

Линейный механизм ЗУ также имеет несколько вариаций, о которых будет сказано ниже. Стоит отметить, что линейный механизм ЗУ используется только в конструкции рычагов протяжных вальцов, так как для сучкорезных ножей он конструктивно неприменим.

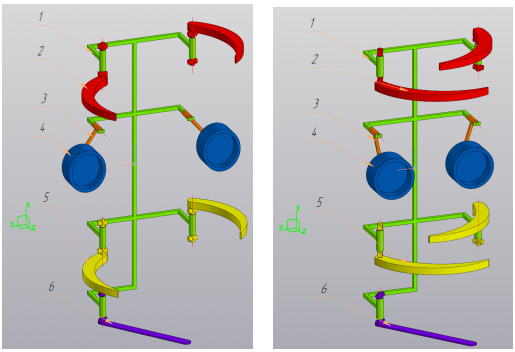


Рис. 9. Упрощенная схема линейного механизма захватного устройства: 1 – рама, 2 – верхний сучкорезный нож, 3 – рычаг протяжного вальца, 4 – протяжной валец, 5 – нижний сучкорезный нож, 6 – пильный блок

Fig. 9. Simplified model of a linear gripping mechanism: 1 – frame, 2 – upper delimbering knives, 3 – feed rollers arms, 4 – feed rollers, 5 – lower delimbering knives, 6 – chain saw

Линейный механизм ЗУ с одним приводным элементом представлен на рис. 10. Аналогично концентрическому механизму он представляет из себя четырехзвенный механизм с количеством степеней свободы $W = 1$. Однако при захвате ствола обрабатываемого дерева имеющаяся степень свободы не исчезает, что позволяет харвестерной головке обрабатывать искривленные и гибкие деревья.

Линейный механизм с двумя приводными элементами представлен на рис. 11.

Линейный механизм с двумя приводными элементами по структуре аналогичен концентрическому механизму с двумя приводными элементами, однако, имеющаяся степень свободы при захвате ствола обрабатываемого дерева не исчезает, что, в сочетании с двумя приводными элементами, позволяет обрабатывать не только искривленные и слишком гибкие деревья, но и деревья с дефектами, вызывающими неравномерные расширения ствола. То есть, протяжные вальцы всегда остаются в зацеплении с поверхностью ствола дерева [Angulo, 2016].

Расчетная часть исследования. В ходе исследования был проведен анализ с целью установить различия в усилии, необходимом для протяжки дерева через харвестерные головки с концентрическим и линейным механизмами рычагов вальцов.

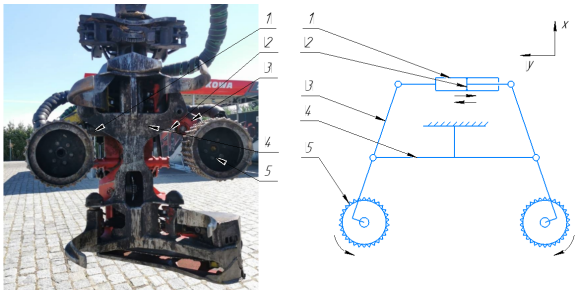


Рис. 10. Харвестерная головка Waratah HTH250 (слева) и кинематическая схема механизма протяжных вальцов с одним приводным элементом (справа): 1 – корпус гидроцилиндра, 2 – шток гидроцилиндра, 3 – рычаг протяжного вальца, 4 – рама, 5 – протяжной валец

Fig. 10. The Waratah HTH250 harvester head (left) and the kinematic diagram of the feed roller mechanism with a single actuator: 1 – hydraulic cylinder housing, 2 – hydraulic cylinder rod, 3 – feed roller lever, 4 – frame, 5 – feed roller

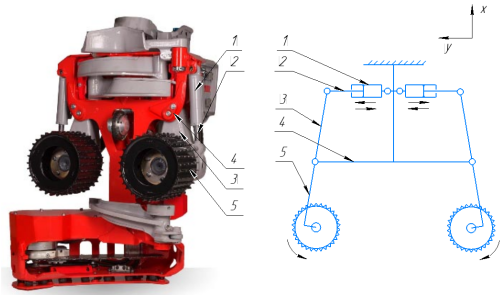


Рис. 11. Харвестерная головка LogMax 4000T (слева) [Log Max…, 2012] и кинематическая схема механизма протяжных вальцов с двумя приводными элементами (справа): 1 – корпус гидроцилиндра, 2 – шток гидроцилиндра, 3 – рычаг протяжного вальца, 4 – рама, 5 – протяжной валец

Fig. 11. The LogMax 4000T harvester head (left) and the kinematic diagram of the feed roller mechanism with two actuators: 1 – hydraulic cylinder housing, 2 – hydraulic cylinder rod, 3 – feed roller lever, 4 – frame, 5 – feed roller

Рассмотрим схемы двух харвестерных головок. Примем ряд допущений к расчету: головки имеют одинаковые по форме, размеру и материалу протяжные вальцы и сучкорезные ножи, обрабатываемое дерево в обоих случаях имеет одинаковый диаметр, кинематика привода рабочих органов принимается условной.

За основу принимается компоновка харвестерной головки с двумя протяжными вальцами и четырьмя сучкорезными ножами, аналогично изображенным на рис. 2 и 9. Схема системы сил в концентрическом механизме представлена на рис. 12, 13.

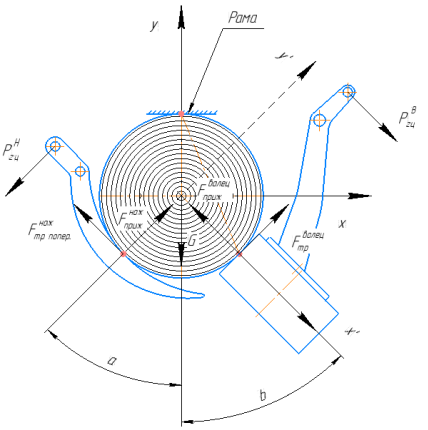


Рис. 12. Схема системы сил в поперечной плоскости

Fig. 12. Diagram of the force system in the transverse plane

Для наглядности на рис. 12 изображен один из двух вальцов и один из четырех сучкорезных ножей. Из схемы на рис. 12 видно, что дерево удерживается в захватном устройстве силой, с которой его прижимает рычаг протяжного вальца $\overline{F_{\text{приж}}^{\text{валец}}}$, силой, с которой дерево прижимает сучкорезный нож $\overline{F_{\text{приж}}^{\text{нож}}}$, силой трения ствола дерева об валец $\overline{F_{\text{тр}}^{\text{валец}}}$ и силой трения дерева о сучкорезный нож в плоскости Oxy $\overline{F_{\text{тр попер.}}^{\text{нож}}}$.

Вес дерева $\bar{G}$ при этом направлен вертикально вниз, так как протяжка дерева осуществляется в горизонтальном положении. Для удобства введем систему координат $Ox'y'$, где ось x' совпадает с вектором силы $\overline{F_{\text{приж}}^{\text{валец}}}$, и

построим проекцию схемы в плоскости *Ox'z'* (рис. 13). Вектор $\bar{v}$ указывает на направление протяжки ствола дерева, вектор силы протяжки $\overline{F_{\text{прот}}^{\text{валец}}}$ имеет то же направление. Силы сопротивления протяжке составляют сила трения ствола дерева о раму х/г $\overline{F_{\text{тр}}^{\text{рама}}}$ и общая сила сопротивления движению, оказываемая сучкорезными ножами $\overline{F_{\text{тр}}^{\text{нож}}}$, в которую входят сила трения о ножи и сила резания обрезки сучьев. [Базаров и др., 2021]

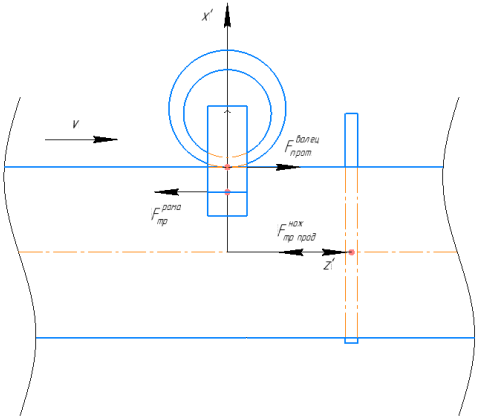


Рис. 13. Схема системы сил в продольной плоскости

Fig. 13. Diagram of the force system in the longitudinal plane

Соответственно, усилие протяжки должно быть больше, чем силы сопротивления протяжке:

$$\overline{F_{\text{прот}}^{\text{валец}}} > \overline{F_{\text{тр}}^{\text{рама}}} + \overline{F_{\text{тр}}^{\text{нож}}}, \text{ кН}. \quad (1)$$

В проекции на ось:

$$Oz' : F_{\text{прот}}^{\text{валец}} - F_{\text{тр}}^{\text{рама}} - F_{\text{тр}}^{\text{нож}} > 0, \text{ кН}.$$

Проекции сил, удерживающих дерево в захвате:

$$\begin{cases} Ox' : -F_{\text{приж}}^{\text{валец}} - F_{\text{тр попер.}}^{\text{нож}} + G\cos b = 0, \\ Oy' : F_{\text{приж}}^{\text{нож}} + F_{\text{тр}}^{\text{валец}} - G\cos a = 0. \end{cases}$$

Итоговая система имеет вид

$$\begin{cases} Ox' : F_{\text{приж}}^{\text{валец}} + F_{\text{тр попер.}}^{\text{нож}} = G\cos b, \\ Oy' : F_{\text{приж}}^{\text{нож}} + F_{\text{тр}}^{\text{валец}} = G\cos a, \\ Oz' : F_{\text{прот}}^{\text{валец}} - F_{\text{тр}}^{\text{рама}} - F_{\text{тр}}^{\text{нож}} > 0. \end{cases} \quad (2)$$

Далее рассмотрим схемы системы сил для линейного механизма захватного устройства (рис. 14,15).

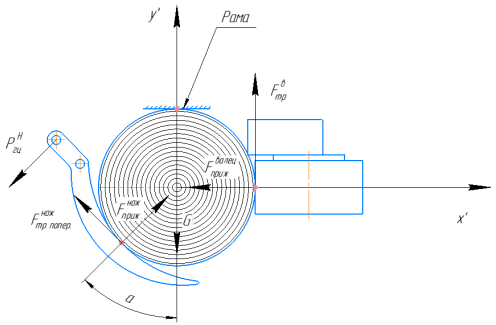


Рис. 14. Схема системы сил в поперечной плоскости

Fig. 14. Diagram of the force system in the transverse plane

Главное отличие схемы на рис. 14 от схемы на рис. 12 состоит в том, что дерево в захвате удерживают только сила, с которой нож прижимает дерево $\overline{F_{\text{приж}}^{\text{нож}}}$, сила трения дерева о нож в плоскости *Ox'y'* $\overline{F_{\text{тр попер.}}^{\text{нож}}}$ и сила трения ствола дерева о валец $\overline{F_{\text{тр}}^{\text{валец}}}$. Вектор силы, с которой валец прижимает дерево $\overline{F_{\text{приж}}^{\text{валец}}}$, действует под прямым углом к вектору силы $\overline{G}$, проекция этой силы на *Oy'* равна нулю.

Составим систему уравнений проекций сил на оси, чтобы выполнялось условие удержания дерева в захвате и протяжки ствола через харвестерную головку:

$$\begin{cases} Ox' : F_{\text{приж}}^{\text{валец}} + F_{\text{тр попер.}}^{\text{нож}}\cos a = F_{\text{приж}}^{\text{нож}}\sin a, \\ Oy' : F_{\text{тр}}^{\text{валец}} + F_{\text{приж}}^{\text{нож}}\cos a = G, \\ Oz' : F_{\text{прот}}^{\text{валец}} - F_{\text{тр}}^{\text{рама}} - F_{\text{тр}}^{\text{нож}} > 0. \end{cases} \quad (3)$$

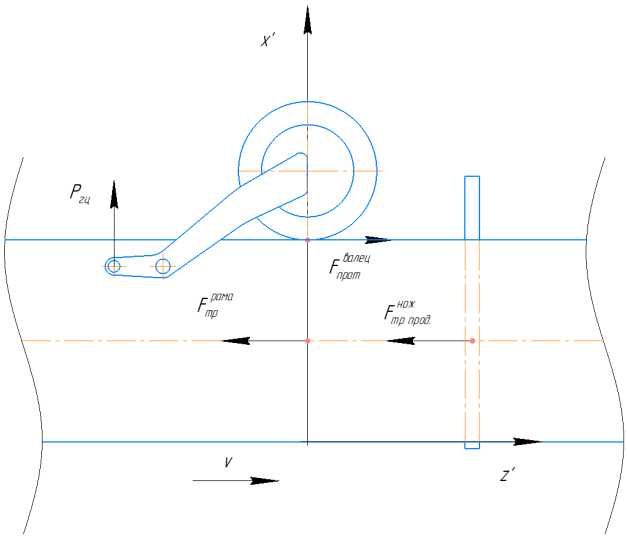


Рис. 15. Схема системы сил в продольной плоскости
Fig. 15. Diagram of the force system in the longitudinal plane

Для того, чтобы оценить, имеется ли какая-либо разница между усилием, необходимым для протяжки дерева в зависимости от захватного механизма, необходимо анализировать силы, которые оказывают сопротивление усилию протяжки, а именно сумму $F_{тр}^{рама} + F_{тр}^{нож}$.

В соответствии с формулой сила сопротивления движению тела по некоторой поверхности равна произведению силы, оказываемой со стороны поверхности на данное тело, и коэффициента сопротивления. В нашем случае, примем допущение, что коэффициент сопротивления для всех поверхностей и видов сопротивления одинаков и равен μ. Отсюда:

$$F_{тр}^{рама} = \mu N^{рама}, \text{кН}. \quad (4)$$

$$F_{тр}^{нож} = \mu N^{нож}, \text{кН} \quad (5)$$

Далее, если обратиться к схемам на рис. 12 и 14, можно обратить внимание, что составляющие сил прижатия вальцом и ножом дерева прижимают его к раме. В соответствии с этим схемы можно дополнить (рис. 16, 17).

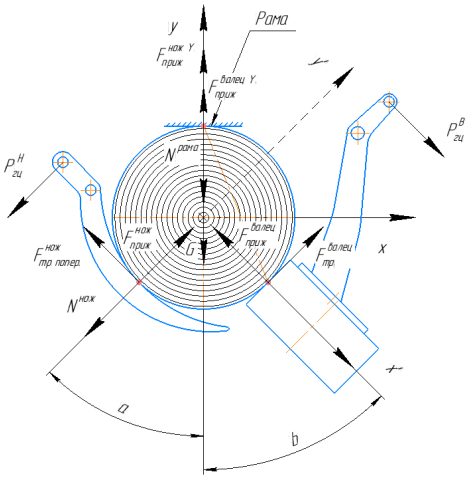


Рис. 16. Дополненная система сил концентрическ ого механизма

Fig. 16. Extended force system of the concentric mechanism

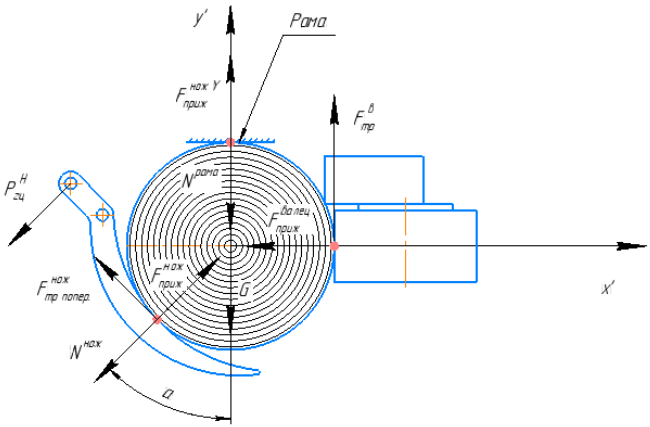


Рис. 17. Дополненная система сил линейного механизма

Fig. 17. Extended force system of the linear mechanism

Исходя из дополненных схем уравнения (4) и (5) можно записать:

– для концентрического механизма:

$$F_{тр}^{рама} = \mu\left(F_{прижв}^{валец\ Y} + F_{прижн}^{нож\ Y}\right), \text{кН},$$

$$F_{тр}^{нож} = \mu F_{прижн}^{нож}, \text{ кН};$$

– для линейного механизма:

$$F_{тр}^{рама} = \mu F_{прижн}^{нож\ Y}, \text{кН},$$

$$F_{тр}^{нож} = \mu F_{прижн}^{нож}, \text{ кН}.$$

Конечные выражения для оценки сил сопротивления протяжке будут иметь вид:

$$\sum F_{сопрот}^{концентр} = \mu\left(F_{прижв}^{валец\ Y} + F_{прижн}^{нож\ Y} + F_{прижн}^{нож}\right), \quad (6)$$

$$\sum F_{сопрот}^{линейн} = \mu\left(F_{прижн}^{нож\ Y} + F_{прижн}^{нож}\right). \quad (7)$$

Исходя из данных выражений, невозможно утверждать, в каком случае сумма сил сопротивления будет больше, так как в обоих случаях вес дерева G одинаков по величине и направлению вектора, и в обоих случаях дерево удерживается головкой.

Рассмотрим проекции сил на оси Ox' и Oy' из систем (2) и (3):

– для концентрического механизма:

$$\begin{cases} F_{прижв}^{валец} + F_{тр\ попер.}^{нож} = G\cos b, \\ F_{прижн}^{нож} + F_{тр}^{валец} = G\cos a; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dfrac{F_{прижв}^{валец} + F_{тр\ попер.}^{нож}}{\cos b} = G, \\ \dfrac{F_{прижн}^{нож} + F_{тр}^{валец}}{\cos a} = G; \end{cases}$$

– для линейного механизма:

$$\begin{cases} F_{прижв}^{валец} + F_{тр\ попер.}^{нож}\cos a = F_{прижн}^{нож}\sin a, \\ F_{тр}^{валец} + F_{прижн}^{нож}\cos a = G. \end{cases}$$

Исходя из данных систем, можно сделать вывод, что в линейном механизме ЗУ (учитывая то, что силы, с которой сучкорезные ножи и вальцы

прижимают дерево, задаются характеристиками приводных гидроцилиндров каждой головки) при изменении значения веса обрабатываемого дерева G будет изменяться значение cos a и, как следствие, сам угол a приложения сил сучкорезных ножей. В то же время в концентрическом механизме при изменении величины G будут изменяться углы a и b приложения сил, с которыми вальцы и сучкорезные ножи прижимают дерево. То есть, в концентрическом механизме, в отличие от линейного, угол приложения силы прижима вальцов будет изменяться с изменениями веса дерева, то есть, при одинаковой влажности и породе дерева, с изменениями диаметра обрабатываемого дерева.

Рассмотрим схемы захватных устройств для разных диаметров обрабатываемого дерева (рис. 18, 19).

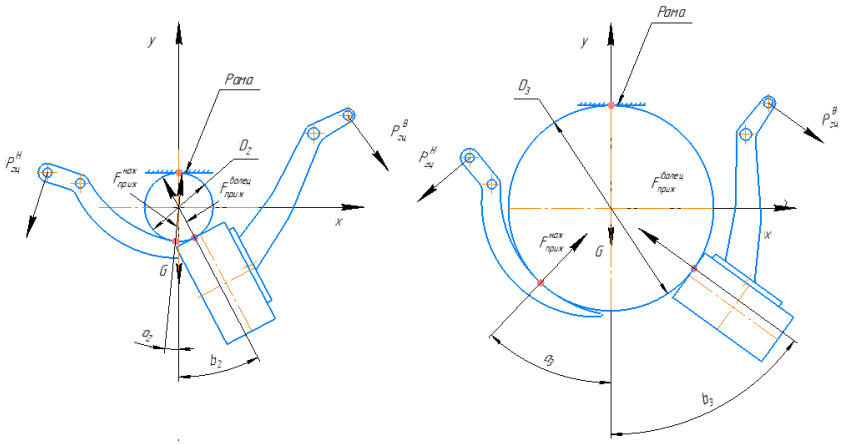


Рис. 18. Схема зависимости угла приложения сил от диаметра обрабатываемого дерева в харвестерной головке с концентрическим механизмом ЗУ

Fig. 18. Diagram of the dependence of the force application angle on the diameter of the processed tree in a harvester head with a concentric gripping mechanism

На рисунках изображены схемы захвата деревьев различных диаметров D_2 и D_3, отличных от диаметра дерева, рассматривавшегося на рис 12 – 17. Можно видеть, как существенно изменяется угол приложения силы $F_{\text{прих}}^{\text{валец}}$ в концентрическом механизме, тогда как в линейном механизме сила всегда приложена под прямым углом к Oy. Из этого следует, что в концентрическом механизме при изменении диаметра дерева изменяется Y – составляющая

силы $F_{\text{приж}}^{\text{валец}}$, которая является составляющей выражения (6). Это значит, что при изменении диаметра обрабатываемого дерева $\sum F_{\text{сопрот}}^{\text{концентр}} \leq$ будет изменяться значительно более хаотично, нежели $\sum F_{\text{сопрот}}^{\text{линейн}}$, что говорит о постоянном изменении силы, необходимой для протяжки дерева харвестерной головкой с концентрическим механизмом.

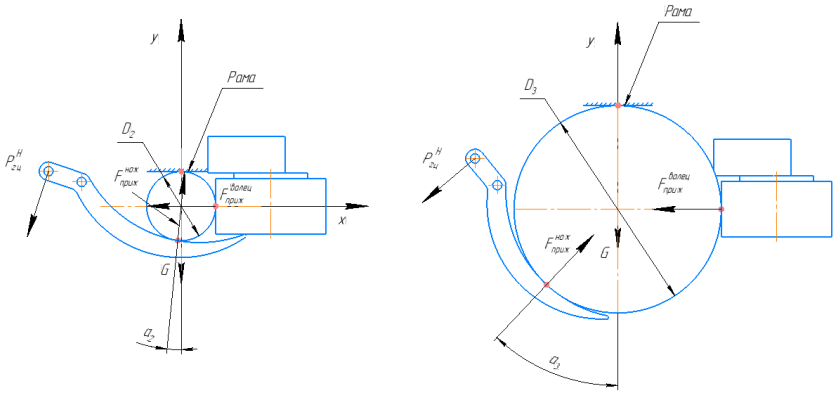


Рис. 19. Схема зависимости угла приложения сил от диаметра обрабатываемого дерева в харвестерной головке с линейным механизмом ЗУ

Fig. 19. Diagram of the dependence of the force application angle on the diameter of the processed tree in a harvester head with a linear gripping mechanism

В результате исследования:

- были рассмотрены кинематические схемы различных видов механизмов захватных устройств харвестерных головок с линейным и концентрическим механизмами ЗУ;
- были разработаны схемы для оценки системы сил, действующих на ствол обрабатываемого дерева в захвате харвестерной головки;
- была произведена оценка усилия, необходимого для протяжки дерева харвестерными головками с различными механизмами ЗУ с учетом допущений, указанных в расчетной части исследования;
- было установлено, что между концентрическим и линейными типами ЗУ харвестерной головки существуют конкретные различия в усилии, необходимом для протяжки обрабатываемого дерева. Нет оснований утверждать, что при указанных допущениях величина усилия протяжки будет

больше/меньше у какого-либо из типов ЗУ, но можно утверждать, что при изменении диаметра дерева усилие протяжки в концентрическом механизме ЗУ изменяет свою величину более хаотично, чем в линейном механизме, где ее оценить проще.

Заключение. Рассмотренные в данной статье механизмы захвата дерева имеют принципиальные различия между собой, так как созданы для разных условий эксплуатации, и некорректно было бы говорить о превосходстве одного механизма над другим. Концентрический механизм более оптимален для обработки прямых массивных деревьев, тогда как линейный механизм захватного устройства лучше себя показывает при обработке деревьев с искривленными стволами или наличием геометрических дефектов, а также для тонкомерных гибких лесоматериалов. Тема механизмов захватных устройств харвестерных головок исследована недостаточно и требует пристального внимания со стороны исследователей. В отечественном научном поле представлено крайне мало исследований по ней. Дальнейшее изучение захватных устройств и прочих механизмов харвестерных головок чрезвычайно важно, так как понимание закономерностей работы данных механизмов позволит развить разработку новейших, наиболее эффективных инженерных решений в сфере технологического оборудования для лесозаготовок и использовать существующие системы наиболее целесообразно. Отечественные предприятия на данный момент в основном занимаются так называемым «реверс-инжинирингом», пытаясь скопировать существующие головки, с момента разработки некоторых из которых прошло уже 10-15 лет. Однако пристальное исследование существующих агрегатов и выведение закономерностей между кинематическими, статическими и динамическими параметрами агрегатов позволит разработать современный агрегат, если не превосходящий существующие аналоги, то обладающий предсказуемым, изученным процессом работы.

Вклад авторов. Охапкин Т.А. – проведение расчетов, составление схем (60%); Андронов А.В. – предоставление литературы, общее руководство работой (20%); Кацадзе В.А. – предоставление изображений и образцов для исследования (10%); Кондратюк В.А. – предоставление данных и величин для исследования (10%).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список.

Базаров С.М., *Беленький Ю.И.*, *Свойкин Ф.В.*, *Свойкин В.Ф.*, *Бальде Т.М.Д.* С истемный анализ динамики работы харвестерной головки валочно-сучкорезно-

раскряжевочной машины (ХГ ВСРМ) // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2021. Вып. 235. С. 150–164. DOI: 10.21266/2079-4304.2021.235.150-164.

Васильев А.С. Модернизированная харвестерная головка // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 251. С. 289–300. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.289-300.

Angulo I. Harvester Energy Modelling and Optimization: master's thesis. Stockholm, 2016. 49 p.

Best Practice Guidelines for Mechanised Harvesting and Processing. Rev. ed. FITEC, 2005. 64 p.

Goubet D., *Fauroux J.C.*, *Gogu G.* Gripping mechanisms in current wood harvesting machines // Frontiers of Mechanical Engineering. 2013. Vol. 8. P. 42–61. DOI: 10.1007/s11465-013-0358-3.

KOMATSU 370.2 harvesting head technical description (booklet). 2012. 2 p.

Laurier J.P. Mechanization of wood harvesting in France: state of the art in 2009 // Forêt Entreprise. 2010.

Log Max 7000C harvesting head technical description (booklet). 2012. 2 p.

PONSSE H8 harvesting head technical description (booklet). 2012. 21 p.

Valmet 370.2 harvesting head technical description (booklet). 2012. 2 p.

References

Angulo I. Harvester Energy Modelling and Optimization: master's thesis. Stockholm, 2016. 49 p.

Bazarov S.M., *Belenkiy Yu.I.*, *Svojkin F.V.*, *Svojkin V.F.*, *Balde T.M.D.* System analysis of the dynamics of the harvester head of a felling-delimbing-crosscutting machine. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoj Akademii*, 2021, iss. 235, pp. 150–164. DOI: 10.21266/2079-4304.2021.235.150-164. (In Russ.)

Best Practice Guidelines for Mechanised Harvesting and Processing. Rev. ed. FITEC, 2005. 64 p.

Goubet D., *Fauroux J.C.*, *Gogu G.* Gripping mechanisms in current wood harvesting machines. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2013, vol. 8, pp. 42-61. DOI: 10.1007/s11465-013-0358-3.

KOMATSU 370.2 harvesting head technical description (booklet). 2012. 2 p.

Laurier J.P. Mechanization of wood harvesting in France: state of the art in 2009. *Forêt Entreprise*, 2010.

Log Max 7000C harvesting head technical description (booklet). 2012. 2 p.

PONSSE H8 harvesting head technical description (booklet). 2012. 21 p.

Vasilyev A.S. Modernized Harvester Head. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoj Akademii*, 2024, iss. 251, pp. 289–300. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.289-300. (In Russ.)

Valmet 370.2 harvesting head technical description (booklet). 2012. 2 p.

Материал поступил в редакцию 21.11.2025

Охапкин Т.А., Андронов А.В., Кацадзе В.А., Кондратюк В.А. Сравнение и анализ различных механизмов захватного устройства харвестерных головок // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2026. Вып. 259. С. 322–344. DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.322–344

В настоящее время на рынке технологического оборудования для лесозаготовки представлен широкий спектр моделей харвестерных головок различных производителей. Данные харвестерные головки различаются не только по эксплуатационным параметрам, но и по конструктивным особенностям механизмов. Даже если рассматривать те конструктивные особенности, которые принципиально не изменяют процесс обработки дерева, они могут иметь серьезное влияние на эффективность применения устройства. Одной из особенностей конструкции харвестерной головки является механизм захватного устройства. Обзор литературы показал, что в западном научном поле представлен ряд работ, посвященный различным механизмам захватного устройства харвестерных головок, однако количество исследований, посвященных конкретным различиям этих механизмов, мало. В отечественной науке исследования, посвященные этой теме, не представлены. Данная статья посвящено изучению двух типов механизма захватного устройства – концентрического и линейного – и определению возможных различий между ними, в частности расчету необходимого усилия протяжки ствола дерева одного диаметра. В исследовании были рассмотрены кинематические схемы типов концентрических и линейных механизмов, а также произведен статический расчет усилий, воздействующих на ствол обрабатываемого дерева, для установления возможного различия в усилии, необходимом для протяжки дерева, при определенных допущениях, например, при равенстве формы, размера и материала протяжных вальцов и сучкорезных ножей, геометрических и механических свойств обрабатываемого дерева и т. д. Результаты исследования показали, что при принятых допущениях невозможно утверждать о наличии конкретных различий в усилии протяжки в концентрическом и линейном механизмах захватного устройства харвестерной головки. Однако при изменении диаметра дерева при обработке харвестерной головкой с концентрическим механизмом усилие, необходимое для протяжки дерева, изменяется по более сложной зависимости, чем при обработке харвестерной головкой с линейным механизмом. Данные выводы могут помочь в исследовании процесса работы харвестерной головки и понимания различных зависимостей, связанных с характеристиками харвестерных головок. Это позволит сделать работу агрегатов более прогнозируемой и даст необходимые обоснования для применения тех или иных конструктивных решений при проектировании отечественных образцов оборудования.

Ключевые слова: захватное устройство, механизм, концентрический, линейный, кинематическая схема, усилие протяжки.

Okhapkin T.A., Andronov A.V., Katsadze V.A., Kondratyuk V.A. Comparison and analysis of various mechanisms of the gripping device of harvester heads. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2026, iss. 259, pp. 322–344 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.322-344

At the moment there is great number of different models of harvester heads present on the market of technological equipment for woodcutting. Those harvester heads differ not only in their operational parameters, but also in constructive features of their systems and mechanisms. Even if the features that change the process of woodcutting fundamentally are not taken into consideration, there is plenty of those which have a serious influence on the effectiveness of the harvester head use. One of the constructive features of a harvester head is a type of gripping mechanism. The literature review showed that the science field of western countries a row of works on the topic is present, but there is few that focus on the differences of the types of gripping mechanisms. In the Russian science field studies on the topic are not present. The study is dedicated to the research of two types of gripping mechanisms – concentric and linear – and the determination of their possible differences, especially a calculation of feed force necessary for processing of a trunk of same diameter. The study examined the kinematic schemes of concentric and linear mechanisms and performed a static calculation of the forces acting on the processed tree trunk to establish possible differences in the force required for tree feeding, under certain assumptions (e.g., equality in the shape, size, and material of the feed rollers and delimbing knives, equality in the geometric and mechanical properties of the processed tree, etc.). The results showed that, under the adopted assumptions, it is impossible to assert specific differences in the feeding force between concentric and linear mechanisms of the harvester head's gripping device. However, when the tree diameter changes during processing with a harvester head featuring a concentric mechanism, the required feeding force follows a more complex relationship compared to processing with a harvester head equipped with a linear mechanism. These findings can aid in researching the harvester head's operation and understanding various dependencies related to harvester head characteristics. This will make the performance of such machinery more predictable and provide necessary justifications for applying specific design solutions when developing domestic equipment models.

K e y w o r d s : gripping mechanism, concentric, linear, kinematic diagram, feed force.

ОХАПКИН Тимофей Антонович – аспирант кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова,

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: okhapkin01@mail.ru

OKHAPKIN Timofey A. – PhD student, Department of Forestry Machinery, Service and Repair, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: okhapkin01@mail.ru

АНДРОНОВ Александр Вячеславович – доцент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, исполнительный директор Центра лесного машиностроения Инжинирингового научного центра лесного комплекса (ИНЦ ЛПК), доктор технических наук. SPIN-код: 8345-3722. ORCID: 0000-0002-1035-9231.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: andronovalexandr@gmail.com

ANDRONOV Aleksandr V. – DSc (Technical), Associate Professor, Department of Forestry Machinery, Service and Repair of St.Petersburg State Forest Technical University; Executive Director, Engineering Research Center of the Timber Industry Complex (ERC TIC). SPIN-code: 8345-3722. ORCID: 0000-0002-1035-9231.

194021. Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: andronovalexandr@gmail.com

КАЦАДЗЕ Владимир Аркадьевич – доцент кафедры технологии лесозаготовительных производств Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, директор Инжинирингового научного центра лесного комплекса (ИНЦ ЛПК), 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, Department of Forestry Engineering, Service and Repair, St.Petersburg State Forest Technical University; Director, Engineering Research Center of the Timber Industry Complex (ERC TIC). SPIN-code: 3205-0333. ORCID: 0000-0002-2997-4947.

194021. Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: tlzp@mail.ru

КОНДРАТЮК Владимир Александрович – заместитель директора Инжинирингового научного центра лесного комплекса (ИНЦ ЛПК), доктор экономических наук.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: konva2011@mail.ru

KONDRATYUK Vladimir A. – PhD (Economical), Deputy Director, Engineering Research Center of the Timber Industry Complex (ERC TIC).

194021. Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: konva2011@mail.ru

3. ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ, ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЕРЕВОПЕРЕРАБОТКИ

УДК 621.928

В.Е. Макаров

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ПО РАЗДЕЛЕНИЮ ДРЕВЕСНЫХ ЧАСТИЦ ПО СТЕПЕНИ СМОЛИСТОСТИ

Введение. Устойчивое экономическое развитие любой отрасли народного хозяйства основано на сбалансированном взаимодействии предприятий данной отрасли и окружающей среды. Необходима оптимизация природно-ресурсного потенциала этих предприятий [Безрукова и др., 2015].

Лесная промышленность не является исключением. Для устойчивого и стабильного развития она включает в себя такие задачи, как:

1. Механизация технологических процессов;

2. Использование всей биомассы дерева путем пенетрации новаторских ресурсосберегающих технологий, позволяющих в полной мере использовать всю биомассу дерева, включая кору, сучья, вершинки и пни деревьев. На их долю приходится ¼ объема заготавливаемой древесины [Шегельман и др., 2014; Курасов, 2020; Химич, 2022; Kuzyakina et al., 2019].

Перечисленные выше элементы деревьев являются сырьем для выработки технологической щепы или щепы для выработки тепловой энергии и генераторного газа, а также для множества перспективных химических производств [Ильюшенко и др., 2021; Евдокимов, Кеутаева, 2022; Kuzyakina et al., 2019]. В любом случае производство продукции начинается с сортировки сырья.

Сортировка щепы осуществляется следующими способами [Полянин и др., 2016; Grigorev et al., 2021]:

1. По размерным признакам (по фракциям: крупная, средняя и мелкая фракции);

2. По толщине (особенно актуальна для целлюлозно-бумажной промышленности);

3. По назначению (технологическая и топливная).

Основное внимание уделим вопросу сортировки щепы по процентному содержанию в ней смолы, т. е. по смолистости [Полянин, Макаров, 2016; Макаров и др., 2023; Ayob et al., 2022]. Данный вопрос еще недостаточно изучен.

На данный момент содержание смолистых веществ в характеристиках технологической щепы стандартами не предусмотрено. Но данный показатель очень актуален для канифольно-скипидарного производства. Возникает необходимость калибровки щепы по фракциям смолистости как важнейшего этапа сырьевой подготовки для экстрагирования смолистых веществ [Полянин, Макаров, 2016; Макаров и др., 2023; Polyanin et al., 2019; Ayob et al., 2022].

Сырьем являются сучья и вершины, а также пни деревьев хвойных пород. Их измельчают с последующим выделением смолы и смолистых веществ [Степанов, Мезина, 2012].

Актуальность заключается в том, что одним из путей сепарации щепы по смолистости является разделение ее на фракции в электростатическом поле [Макаров и др., 2023].

При обзоре существующих конструкций были выявлены их недостатки [Санников и др., 1981; Соловьев и др., 1986; Вьюков и др., 1988; Полянин, Макаров, 2016]:

1. Низкая эффективность процесса;
2. Высокая напряженность электрического поля;
3. Низкая противопожарная безопасность.

Цель работы – разработка экспериментальной установки для сортировки древесных частиц с различным содержанием смолы в среде электростатического поля.

Материалы и методика исследования. Исследуемые объекты – это конструкции устройств для сепарации щепы по разным признакам (размерным, по толщине, по смолистости). Использовался метод поиска с проведением обзора существующих конструкций сортировочных устройств, их анализа, сравнения, обобщения и конкретизации с выявлением аналогов и прототипов с вытекающими недостатками [Санников и др., 1981; Соловьев и др., 1986; Вьюков и др., 1988].

На основе этого было определено несколько перспективных направлений научно-исследовательской деятельности в области сортировки щепы [Spinelli, Marchi, 2021; Ayob et al., 2022; Liu et al., 2022]:

1. Увеличение эффективности процесса сортировки;
2. Снижение напряженности электрического поля;
3. Предотвращение проскакивания искр, электрического пробоя, короткого замыкания электродов.

Принципиальная схема сепарационной установки по разделению щепы в электростатическом поле представлена на рис. 1 [Полянин и др., 2018]. Основной частью является диэлектрический корпус 1. Высоковольтный трансформатор 2, выпрямительный блок 3 и высоковольтные кабеля 4 размещены в нем. Напряжение на электроды 5 подается по кабелям 4. За счет основания установки осуществляется заземление сепаратора. Положительно заряженные электроды 5 плоской формы шарнирно фиксированы в корпусе 1. Отрицательный электрод 6 размещен между положительно заряженными электродами 5.

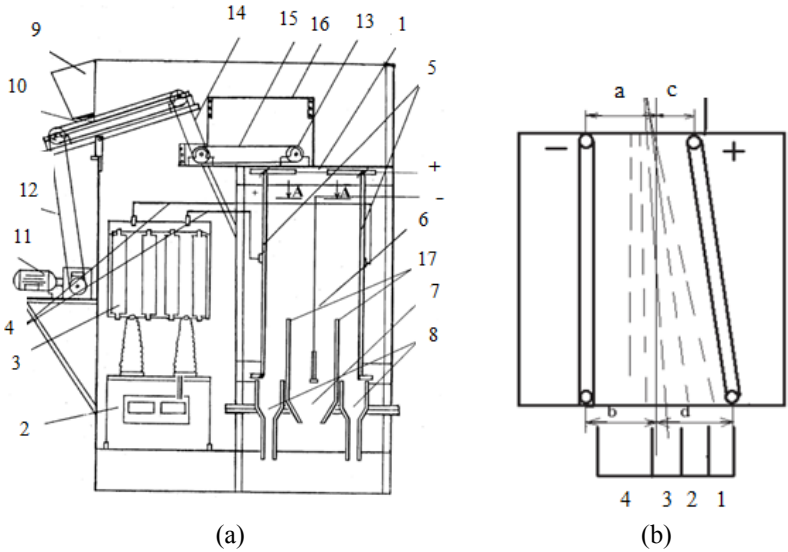


Рис. 1. Схема сепарационной экспериментальной лабораторной установки:
(a) общий вид; (b) схема расположения электродов.

(a): 1 – корпус; 2 – трансформатор; 3 – выпрямитель; 4 – силовые кабели; 5 – электроды; 6 – отрицательный электрод; 7 – секция для малосмолистой щепы; 8 – секция для высокосмолистой щепы; 9 – подающий конвейер; 10 – лента конвейера; 11 – электродвигатель; 12 – ременная передача; 13 – подзаряжающий транспортер; 14 – ременная передача; 15 – медная сетчатая лента; 16 – металлическая пластина; 17 – разделительные шторки
(b): 1, 2, 3, 4 – номера фракций; a, b, c, d – расстояния между пластинами

Fig. 1. Scheme of separation experimental laboratory setup:
(a) general view; (b) the arrangement of the electrodes.

(a): 1 – housing; 2 – transformer; 3 – rectifier; 4 – power cables; 5 – electrodes; 6 – negative electrode; 7 – section for low-resin chips; 8 – section for high-resin chips; 9 – feed conveyor; 10 – conveyor belt; 11 – electric motor; 12 – belt drive; 13 – re-charging conveyor; 14 – belt drive; 15 – copper mesh belt; 16 – metal plate; 17 – separating curtains
(b): 1, 2, 3, 4 – fraction numbers; a, b, c, d – distances between plates

Секции 7 и 8 служат для сбора щепы, отсортированной по смолистости, с низким и высоким содержанием смолистых веществ соответственно. Подающий конвейер 9 закреплен на боковой стенке корпуса 1 сепаратора. Конвейерная лента 10 движется за счет ременной передачи 12 от электродвигателя 11. Транспортер 13 через ременную передачу 14 подзаряжает конвейерную ленту 10. Положительно заряженные электроды (аноды) 5 присоединены к металлической пластине 16. Отрицательно заряженные электроды (катоды) 6 присоединены к медной сетке 15.

Основа функционирования разделителя древесных частиц по содержанию в них смолистых веществ состоит в следующем. Подающий конвейер 9 загружает древесными частицами с разным содержанием смолистых веществ транспортерную ленту 10, направляя их далее на медную сетку 15 транспортера 13. За счет электростатического однородного поля, созданного сеткой 15 и пластиной 16, древесные частицы (технологическая щепа) заряжаются отрицательным потенциалом. Аноды 5 и катоды 6 создают неоднородное электростатическое поле.

В зависимости от показателя смолистости в зоне анодов 5 и катодов 6 соответственно древесные частицы отклоняются от оси разделителя (сепаратора).

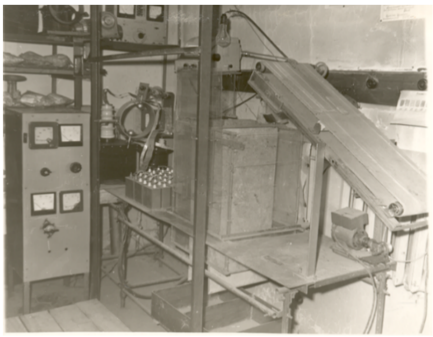
Древесные частицы с высоким содержанием смолистых веществ смещаются в направлении анода более, нежели частицы древесины с меньшим содержанием смолистых веществ. Разделительной шторкой 17 щепа распределяется по показателю смолистости, соответственно, в секции 7 и 8.

Результаты и обсуждение. Натурный экспериментальный лабораторный образец сепаратора по разделению щепы по смолистости представлен на рис. 2.

Параметрические размеры экспериментальной лабораторной установки представлены в табл. 1.

Исполнение натурных лабораторных экспериментов по сепарации технологической щепы включает следующие этапы:

1. Подготовительные работы;
2. Отборочные работы;
3. Экстракция смолистых веществ в растворителе;
4. Высушивание раствора до постоянной массы;
5. Отгонка растворителя и сушка смолы до постоянной массы;
6. Расчет процентной доли экстрактивных веществ по массе;
7. Расчет коэффициента экстрагирования.



(a)

(b)

(c)

Рис. 2. Сепарационная экспериментальная лабораторная установка:
(a) общий вид установки; (b) сортировочный бункер лабораторной установки;
(c) электроды установки

Fig. 2. Separation experimental laboratory setup: (a) general view of the setup;
(b) sorting bin of the laboratory setup; (c) setup electrodes

Результаты эксперимента по дифференциации технологической щепы по степени смолистости представлены в табл. 2.

Пример. При значении прикладываемого напряжения U = 40 кВ, влажности щепы W = 50% и степени смолистости k =15% получим зависимость S = f(m) – отклонение траектории падения щепы от осевой линии подающего устройства классификатора (рис. 3).

Таблица 1

Параметрические размеры экспериментально-лабораторной установки

Parametric dimensions of the experimental laboratory setup

Параметры	Ед. измерения	Значения
Размеры пластин	мм	500x1500
Толщина пластин	мм	3
Расстояние между пластинами:	мм	
в верхней части		200
в нижней части		400
Диаметр проволоки отрицательного электрода	мм	2
Материал транспортера		изоляционный
Сетка транспортерной ленты		медная эластичная сетка

Таблица 2

Результаты эксперимента по дифференциации технологической щепы по степени смолистости

Results of the experiment on differentiation of technical chips by resin content

№№ п/п	Прикладываемое электрическое напряжение U, кВ	Степень смолистости щепы K, %	Влажность щепы, η, %	№ секции накопителя	Примечание
1	40	22	26	4	Разделения нет
		17	26	4	
		13	26	4	
		10	26	4	
		8	26	4	
2	45	22	22	4	Частичное разделение
		17	22	4	
		13	22	4	
		10	22	3	
		8	22	3	

Продолжение табл. 2

№№ п/п	Прикладываемое электрическое напряжение U, кВ	Степень смолистости щепы К, %	Влажность щепы, η, %	№ секции накопителя	Примечание
3	50	22	20	4	Разделение, близкое к полному
		17	20	3	
		13	20	3	
		10	21	3	
		8	22	2	
4	50	22	19	3	Разделение, близкое к полному
		17	16	3	
		13	16	3	
		10	14	2	
		8	18	2	
5	50	22	17	3	Частичное разделение
		17	17	3	
		13	15	2	
		10	16	2	
		8	15	2	
6	50	22	15	4	Полное разделение
		17	15	3	
		13	13	2	
		10	14	2	
		8	10	1	
7	50	22	7	3	Полное разделение
		17	7	3	
		13	8,5	2	
		10	10	1	
		8	9,6	1	
8	55	22	7	3	Полное разделение
		17	7	2	
		13	8	2	
		10	9	1	
		8	9	1	

Окончание табл. 2

№№ п/п	Прикладываемое электрическое напряжение U, кВ	Степень смолистости щепы К, %	Влажность щепы, η, %	№ секции накопителя	Примечание
9	60	22	7	2	Частичное разделение
		17	7	2	
		13	8	1	
		10	9	1	
		8	9	1	

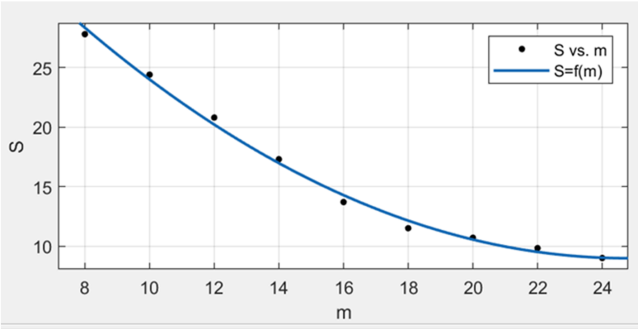


Рис. 3. График отклонения траектории падения щепы от осевой линии приемного бункера в электрическом поле классификатора

Fig. 3. Graph of deviation of the trajectory of falling chips from the centerline of the receiving bin in the electric field of the classifier

Аналогично можно построить графики при различных значениях напряжения, степени смолистости и влажности щепы.

Заключение. Создана натурная экспериментальная лабораторная установка сепаратора по разделению древесных частиц в среде электростатического поля по содержанию в них смолы, и указаны ее параметрические размеры. Основные экспериментальные силовые параметры сепаратора:

- мощность наивысшая, кВт – 2,5;,
- напряжение на выходе, кВ – 6-60.

Изложена методика проведения натурных экспериментальных лабораторных исследований, и получены их результаты. Анализ показал, что экспериментальная лабораторная установка дает возможность:

1. Повысить действенность сортировочного процесса древесных частиц;
2. Сбавить напряженность в электростатическом поле;
3. Повысить противопожарную безопасность за счет предотвращения проскакивания искр, электрического пробоя, короткого замыкания электродов.

При сепарации щепы при постоянной массе древесных частиц, в экспериментах №6, 7 при электрическом напряжении U=50 кВ и №8 при U=55 кВ с влажностью щепы от 7 до 15% наблюдается полное разделение щепы по фракциям смолистости.

Дальнейшие исследования процесса разделения (сепарации) щепы по содержанию в ней смолы предполагают дифференциацию частиц древесины:

1. При различной их массе;
2. При искусственном просмолении частиц древесины;
3. При изменении напряжения и влажности частиц.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Безрукова Т.Л., *Шанин И.И.*, *Травникова В.В*. Экономическая эффек-тивность использования вторичного сырья лесной промышленности // Успехи современного естествознания. 2015. №1. С.492–495.

Вьюков Б.Е., *Полыковский М.Т.*, *Туулас П.А.*, *Щадилов Е.В.* Авторское свидетельство №1377316 Союз Советских Социалистических Республик. МПК D 21 B /02. Устройство для сортирования щепы по толщине. Заявл. 04.12.84, опубл. 29.02.88, бюлл. №8.

Евдокимов Н.В., *Кеутаева А.Н.* Характеристика древесных отходов при производстве технологической щепы с оценкой возможности их использования в аддитивных технологиях // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Сер. 4: Промышленные технологии. 2022. №2. С. 119-122.

Ильюшенко Д.А., *Бирман А.Р.*, *Локштанов Б.М.*, *Орлов В.В.*, *Гусева Т.А.*, *Иванов В.А.*, *Никифорова В.А.* Технологии производства топливной щепы из лесосечных отходов при заготовке древесины 250-300 тыс. пл. м^3 в год // Системы. Методы. Технологии. 2021. №2 (50). С. 175-184.

Курасов А.А. Рациональное и эффективное использование отходов лесосеки, лесозаготовки, деревообработки и переработки как фактор повышения рентабельности предприятия. // Новая экономика, бизнес и общество: сб. мат. Апрельской науч.-практ. конф. молодых учёных. Владивосток. 2020. С. 854-864.

Макаров В.Е., *Полянин И.А.*, *Никоноров К.Н.* Сортировка технологической щепы с использованием электростатического сепаратора // Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки: мат. Всерос. науч.-практ. конф. Казань, 2023. С. 290-293.

Полянин И.А., *Макаров В.Е.* Совершенствование технологии сорти-ровки по смолистости щепы, полученной из пневой и некондиционной древесины // Системы. Методы. Технологии. 2016. №4 (32). С. 176-180.

Полянин И.А., *Макаров В.Е.*, *Никоноров К.Н.* Патент №2651715 Российская Федерация, МПК B03C 7/12. Устройство для сортировки древесных материалов по смолистости. Заявл. 13.02.2017, опубл. 23.04.2018, бюлл. № 12.

Санников Ю.Г., *Мыров Ю.Г.*, *Ивонин Ю.П.*, *Ротаренко П.И.*, *Андреев Г.А.* Авторское свидетельство №858920 Союз Советских Социалистических Республик, МКИ B03 C1/00. Способ электростатического разделения материалов преимущественно древесины. Заявл. 02.07.79, опубл. 30.08.81, бюлл. №32.

Соловьев Н.И., *Крохин В.Н.*, *Кугушев И.Д.*, *Арефьев Н.Р.* Авторское свидетельство №1270195 Союз Советских Социалистических Республик. МПК D21 B1/100, B07 B 1/06. Устройство для сортирования щепы. Заявл. 29.11.84, опубл. 15.11.86, бюлл. №42.

Степанов В.И., *Мезина Н.А.* Отходы лесной промышленности и их использование в национальном хозяйстве // Вестник Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова. 2012. №3 (45). С. 83-88.

Химич А.В. Компьютерное моделирование объёмов генерации отходов при лесозаготовке // Молодёжный вестник Новороссийского филиала Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2022. Т. 2, №4 (8). С. 59-63.

Шегельман И.Р., *Васильев А.С.*, *Щукин П.О.*, *Галактионов О.Н.*, *Суханов Ю.В.* Рециклинг отходов: актуальность возрастает // Инженерный вестник Дона. 2014. №3 (30). С. 28.

Ayob S., *Othman N.*, *Altowayti W.A.H.* Concentrations of ZN, Mn and Al in wood chips from wood-based manufacturing industries // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1022, №1. Art. no. 012065. DOI: 10.1088/1755-1315/1022/1/012065.

Grigorev I., *Shadrin A.*, *Katkov S.*, *Borisov V.*, *Kaznacheeva N.*, *Levushkin D.*, *Druzyanova V.*, *Gnatovskaya I.*, *Diev R.*, *Akinin D.* Improving the quality of sorting wood chips by scanning and machine vision technology // Journal of Forest Science. 2021. Vol. 67, №5. P. 212-218. DOI: 10.17221/10/2020-JFS.

Kuzyakina M.V., *Gura D.A.*, *Sekisov A.N.*, *Granik N.V.* Assessment of potential forest biomass resource on the basis of data of air laser scanning // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018. Cham, 2019. P. 403-416. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8_41.

Liu Z., *Han Ch.*, *Li Q.*, *Li X.*, *Zhou H.*, *Song X.*, *Zu F.* Study on wood chips modification and its application in wood-cement composites // Case Studies in Construction Materials. 2022. Vol. 17. Art. no. 01350. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01350.

Polyanin I.A., *Makarov V.E.*, *Egorov A.V.*, *Lysyannikov A.V.*, *Kaizer Yu.F.*, *Voldaev M.N.*, *Stepanova K.S.* Improving the technology of sorting wood chips obtained

from stump and substandard wood by resin content // Journal of Physics: Conference Series. Int. sci. conf. “Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering – APITECH-2019”. Krasnoyarsk, 2019. Art. no. 44076. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/4/044076.

Spinelli R., *Marchi E.* Trends and perspectives in the design of mobile wood chippers // Croatian Journal of Forest Engineering. 2021. Vol. 42, iss. 1. P. 25-38. DOI: 10.5552/crojfe.2021.787.

References

Ayob S., *Othman N*., *Altowayti W.A.H.* Concentrations of ZN, Mn and Al in wood chips from wood-based manufacturing industries. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 1022, no. 1, art. no. 012065. DOI: 10.1088/1755-1315/1022/1/012065.

Bezrukova T.L., *Shanin I.I*., *Travnikova V.V*. Cost-effective use of secondary raw materials forest industry. *Advances in modern natural science*, 2015, no. 1, pp. 492 – 495. (In Russ.)

Evdokimov N.V., *Keutaeva A.N.* Wood waste characteristics in chips production and evaluation of their posibility as a raw material for additive technologies. *Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design*. *Ser. 4: Industrial technologies*, 2022, no. 2, pp. 119-122. (In Russ.)

Grigorev I., *Shadrin A*., *Katkov S*., *Borisov V*., *Kaznacheeva N*., *Levushkin D*., *Druzyanova V*., *Gnatovskaya I*., *Diev R*., *Akinin D.* Improving the quality of sorting wood chips by scanning and machine vision technology. *Journal of Forest Science*, 2021, vol. 67, no. 5, pp. 212-218. DOI: 10.17221/10/2020-JFS.

Ilyushenko D.A., *Birman A.R*., *Lokshtanov B.M*., *Orlov V.V*., *Guseva T.A*., *Ivanov V.A*., *Nikiforova V.A.* Technologies for the production of fuel chips from logging waste during timber harvesting 250-300 thousand square meters per year. *Systems. Methods. Technologies*, 2021, no. 2 (50), pp. 175-184. (In Russ.)

Khimich A.V. Computer modeling of waste generation volumes during logging. *Youth Bulletin of the Novorossiysk branch of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*, 2022, vol. 2, no. 4 (8), pp. 59-63. (In Russ.)

Kurasov A.A. Rational and efficient use of logging waste, logging, woodworking and processing as a factor in increasing the profitability of the enterprise. *New Economy*, *Business and Society:* collection of mat. of the April sci.-pract. conf. of young scientists. Vladivostok, 2020, pp. 854-864. (In Russ.)

Kuzyakina M.V., *Gura D.A*., *Sekisov A.N*., *Granik N.V.* Assessment of potential forest biomass resource on the basis of data of air laser scanning. *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018.* Cham, 2019, pp. 403-416. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8_41.

Liu Z., *Han Ch*., *Li Q*., *Li X*., *Zhou H*., *Song X*., *Zu F.* Study on wood chips modification and its application in wood-cement composites. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, vol. 17, art. no. 01350. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01350.

Makarov V.E., *Polyanin I.A.*, *Nikonorov K.N.* Sorting of process chips using an electrostatic separator. *Actual problems of forestry and wood processing:* proc. of the All-Russ. sci.-pract. conf. Kazan, 2023, pp. 290-293. (In Russ.)

Polyanin I.A., *Makarov V.E.* Advancing the sorting technology based on the gummosity of the pulpchips, obtained from stumpwood and non-standard timber. *Systems. Methods. Technologies*, 2016, no. 4 (32), pp. 176-180. (In Russ.)

Polyanin I.A., *Makarov V.E.*, *Nikonorov K.N.* Patent No. 2651715 Russian Federation, IPC B03C 7/12. Device for sorting wood materials by resin content. Appl. 02/13/2017, publ. 04/23/2018, bull. no. 12. (In Russ.)

Polyanin I.A., *Makarov V.E.*, *Egorov A.V.*, *Lysyannikov A.V.*, *Kaizer Yu.F.*, *Voldaev M.N.*, *Stepanova K.S.* Improving the technology of sorting wood chips obtained from stump and substandard wood by resin content. *Journal of Physics: Conference Series*. Int. sci. conf. *"Conference on Applied Physics*, *Information Technologies and Engineering – APITECH-2019"*. Krasnoyarsk, 2019, art. no. 44076. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/4/044076.

Sannikov Yu.G., *Myrov Yu.G.*, *Ivonin Yu.P.*, *Rotarenko P.I.*, *Andreev G.A.* Copyright certificate No. 858920 Union of Soviet Socialist Republics, MKI B03 C1/00. Method of electrostatic separation of materials, primarily wood. Appl. 07/02/79, publ. 08/30/81, bull. no. 32. (In Russ.)

Shegelman I.R., *Vasilyev A.S.*, *Shchukin P.O.*, *Galaktionov O.N.*, *Sukhanov Yu.V.* Waste recycling: topicality is increasing. *Engineering Bulletin of the Don*, 2014, no. 3 (30), p. 28. (In Russ.)

Solovyev N.I., *Krokhin V.N.*, *Kugushev I.D.*, *Arefyev N.R.* Copyright certificate No. 1270195 Union of Soviet Socialist Republics. IPC D21 B1/100, B07 B 1/06. Device for sorting wood chips. Appl. 11/29/84, publ. 11/15/86, bull. no. 42. (In Russ.)

Spinelli R., *Marchi E.* Trends and perspectives in the design of mobile wood chippers. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2021, vol. 42, iss. 1, pp. 25-38. DOI: 10.5552/crojfe.2021.787.

Stepanov V.I., *Mezina N.A.* Forest industry waste and its use in the national economy. *Bulletin of the Plekhanov Russian University of Economics*, 2012, no. 3 (45), pp. 83-88. (In Russ.)

Vyukov B.E., *Polykovskiy M.T.*, *Tuulas P.A.*, *Shchadilov E.V.* Copyright certificate No. 1377316 Union of Soviet Socialist Republics. IPC D 21 B /02. Device for sorting chips by thickness. Appl. 12/04/84, publ. 02/29/88, bull. no. 8. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 14.12.2025

Макаров В.Е. Анализ эффективности работы экспериментально-лабораторной установки по разделению древесных частиц по степени смолистости // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2026. Вып. 259. С. 345–358. DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.345-358

В статье рассмотрены вопросы рационального природопользования, задачи, по использованию всей биомассы дерева, являющейся сырьем для выработки технологической щепы или щепы для выработки тепловой энергии и генераторного газа, а также для множества перспективных химических производств. Актуальность заключается в сепарации щепы не только по размерным признакам, но и по смолистости, разделением ее на фракции в электростатическом поле. Целью работы является разработка экспериментальной установки для сортировки древесных частиц с различным содержанием смолы в среде электростатического поля. Исследуемые в статье объекты – это конструкции устройств для сепарации щепы по разным признакам. Использовался метод поиска с проведением обзора существующих конструкций сортировочных устройств, их анализа, сравнения, обобщения и конкретизации с выявлением аналогов и прототипов и с вытекающими недостатками. На основе этого были определены несколько перспективных направлений научно-исследовательской деятельности в области сортировки щепы по смолистости. Разработана принципиальная схема сепарационной установки по разделению щепы в электростатическом поле и представлена основа ее функционирования. Представлен натурный экспериментальный лабораторный образец сепаратора по разделению щепы по смолистости. Определены его параметрические размеры. Приведена методика исполнения натурных лабораторных экспериментов по сепарации технологической щепы и результаты эксперимента по дифференциации технологической щепы по степени смолистости. В заключении приводятся входные параметры экспериментальной лабораторной установки, при которых происходит полное разделение щепы по фракциям смолистости, намечены следующие этапы исследования процесса разделения щепы по смолистости.

Ключевые слова: щепа, смолистость, сортировка, пневая древесина, канифольно-скипидарное производство, сепаратор, электростатическое поле.

Makarov V.E. Analysis of the efficiency of the experimental laboratory setup for separating wood particles by resin content. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2026, iss. 259, pp. 345–358 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.345-358

This article examines issues of rational environmental management. It addresses the challenges of utilizing all wood biomass as raw material for producing process chips or chips for generating thermal energy and generator gas, as well as for a variety of promising chemical industries. The relevance of the study lies in the separation of wood chips not only by size but also by resin content, dividing them into fractions in an electrostatic field. The aim of the study is to develop an experimental setup for sorting wood particles with different resin contents in an electrostatic field. The objects of study in this article are the designs of devices for separating chips by various characteristics.

A search method was used, including a review of existing sorting device designs, their analysis, comparison, generalization, and specification, identifying analogs and prototypes and their attendant shortcomings. Based on this, several promising areas of research in the field of wood chip sorting by resin content were identified. A schematic diagram of a separation unit for separating wood chips in an electrostatic field was developed, and the basis for its operation was presented. A full-scale experimental laboratory prototype of a separator for separating wood chips by resin content is presented. Its parametric dimensions are determined. A methodology for performing full-scale laboratory experiments on the separation of industrial chips and the results of an experiment on differentiating industrial chips by resin content are presented. The input parameters of the experimental laboratory setup, which completely separates wood chips by resin content fractions, are presented. Subsequent stages of research into the process of separating wood chips by resin content are outlined.

Keywords: chips, resin content, sorting, stump wood, rosin-turpentine production, separator, electrostatic field.

МАКАРОВ Владимир Евгеньевич – доцент кафедры транспортно-технологических машин Поволжского государственного технологического университета, кандидат технических наук. ORCID: 0000-0003-2564-0832.

424000, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия. E-mail: MakarovVE@volgatech.net

MAKAROV Vladimir E. – PhD (Technical), Associate Professor, Department of Transport and Technological Machines, Volga State Technological University. ORCID: 0000-0003-2564-0832.

424000. Lenina sq. 3. Yoshkar-Ola. Russia. Email: MakarovVE@volgatech.net

УДК 674.06

А.А. Федяев, А.В. Теплякова, Е.В. Откидычева, А.Д. Соловьева, О.В. Юркова, А.Н. Чубинский

ВЛИЯНИЕ СУЧКОВ НА ПРОХОЖДЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА В ДРЕВЕСИНЕ

Введение. Одним из направлений повышения качества продукции из древесины является внедрение неразрушающих методов контроля на основных этапах переработки сырья. В настоящее время оценку пиловочных бревен и пиломатериалов до и после сушки проводят в основном визуальным способом. Такой контроль основывается преимущественно на рекомендациях ГОСТ или внутренних документах. На практике визуальная оценка не всегда дает возможность оценить реальное назначение материалов с обеспечением требуемых характеристик в процессе их эксплуатации. При диагностике характеристик древесины разрушающими методами контроля можно судить только о свойствах некоторой выборки испытанных образцов. Перспективными в вопросе оценки свойств, состояния и внутреннего строения древесины являются неразрушающие методы контроля.

Для диагностики скрытых дефектных зон при сортировке бревен на предприятии, оценки состояния сырья и определения его сорта применяют компьютерную томографию. При помощи томографии появляется возможность не только идентифицировать особенности внутреннего строения, но и сформировать поставы пил, обеспечивающие максимальный объемный выход пиломатериалов с минимальным наличием дефектов или пороков. При этом прямо определяют: размеры и форму сортиментов; вид, форму, размеры и местоположение основных пороков сырых сортиментов; размеры ядра и заболони; размеры и форму годичного слоя и его составных частей и т. п. Однако определение плотности древесины, оказывающей решающее влияние на дальнейшее функциональное назначение пиломатериалов, при помощи томографии возможно только косвенно, причём для сырых пиломатериалов.

В дальнейшем при сушке пиломатериалов в зависимости от объема камеры, её наполнения, соблюдений требований по укладке, скорости движения агента сушки, равномерности распределения потоков воздуха, различной плотности и влажности древесины и иных факторов могут появляться видимые дефекты, такие как коробление, растрескивание и т. п., а также скрытые зоны с микротрещинами. Образованию микротрещин и их развитию предшествуют неравномерные деформации древесины от усушки. Такие

деформации характерны для зоны у сучков, характеризующейся различной плотностью, а также непосредственно в самих сучках (в том числе и здоровых сросшихся). Одними из возможных методов для проведения подобной диагностики являются акустические.

Акустические методы диагностики в деревообработке активно применяют с середины XX века. Особый интерес к изучению возможности этих методов для оценки качества древесины и древесных материалов наблюдается в последние 20 лет, что, безусловно, связано с развитием и совершенствованием как самих методов, так и средств контроля. Акустические исследования делят на ультразвуковые, с частотой от 20 кГц и выше, а также методы, основанные на использовании колебаний звуковой (до 20 кГц) и инфразвуковой (до 20 Гц) частот. При этом, с точки зрения возможности использования для идентификации дефектных зон, наибольшее развитие получила ультразвуковая диагностика.

В различное время исследования в деревообработке были направлены на: установление зависимости между скоростью ультразвука и динамическим модулем упругости древесины [Бобылева и др., 1978; Колесникова, 2002; Wang et al., 2003; Bucur, 2006; Baar et al., 2015; Vázquez et al., 2015; Arriaga et al., 2022]; оценку связи параметров ультразвука с механическими свойствами древесины [Чубинский и др., 2011; Tippner et al., 2016]; адаптации ультразвуковой диагностики в производстве пиломатериалов [Лакатош, 1966; Кармадонов, 1987; Уголев, 2007].

Полученные результаты позволили установить, что основными факторами, влияющими на результаты прохождения ультразвука в древесине, являются её порода и влажность, пороки и дефекты обработки, тип и частота преобразователей и др. Установлено, что применение малых частот ультразвука (до 250 кГц) нерационально, так как искажает получаемый результат за счет увеличения длины волны и, как следствие, «огибания» ряда отдельных элементов строения древесины. При этом наличие недостатков или особенностей ультразвуковой диагностики древесины может расширить применение акустических методов контроля в деревообработке. Наличие пороков или дефектов в древесине снижает качество сигнала и требует дополнительного его усиления. Наличие мест ненадлежащего качества в древесине можно оценивать по выходу значений сигнала из границ нормальных значений в бездефектных зонах.

Определению наличия пороков строения в каком-либо сортименте из древесины также посвящено большое число исследований [Ермолов, Ланге, 2004; Чубинский и др., 2014, 2015, 2017], результаты которых доказали возможность такой оценки на основе теневого метода ультразвукового контроля. Также следует отметить, что в наших ранних исследованиях

применение теневых методов контроля позволило определять плотность древесины в зависимости от скорости прохождения ультразвука, прогнозировать на основе плотности древесины прочность клеевых соединений цельной древесины [Чубинский и др., 2011], оценивать направление волокон древесины [Федяев, 2025], идентифицировать непроклеенные места (пустоты) в клеевом слое клееного бруса [Чубинский и др., 2017].

Известно, что к качеству пиломатериалов для изготовления ответственных несущих деревянных конструкций предъявляют повышенные требования. Для отбора таких досок целесообразно сочетание компьютерной томографии и ультразвукового исследования для углубленной оценки состояния сучков и околосучковой зоны. Последнее явилось предметом исследований, рассмотренных в настоящей статье.

Методика исследований. В рамках исследований были проведены измерения отклонения фронта ультразвуковых волн в древесине. При проведении эксперимента был выбран ультразвуковой теневой метод контроля с использованием дефектоскопа «А 1214 ЭКСПЕРТ» с 2 преобразователями ПЭП 111-2,5-К6. Выбор частоты был основан на исследованиях, проведенных ранее различными авторами [Лакатош, 1966; Полубояринов, 1976; Артемов, Паврос, 1981; Добротин, Паврос, 1986, 1999; Кармадонов, 1987; Голубев, Паврос, 1989; Ермолов, Ланге, 2004; Уголев, 2007], собственных исследованиях [Чубинский и др. 2011, 2012], при которых высокая точность результата измерений была достигнута при частоте 2,5 МГц [Чубинский и др., 2011].

На приемник поступает несколько сигналов, в том числе ослабленных, прошедших не по кратчайшему расстоянию, отклоненных из-за различных дефектов или особенностей строения и т. д. В процессе исследований определяли время прохождения сигнала через древесину с максимальной амплитудой. При измерении излучатель фиксировался в одном положении. Перемещением приемника определяли место на другой стороне образца с наиболее высокой амплитудой сигнала при помощи А-скана на экране дефектоскопа. После получения максимального прошедшего сигнала положение обоих датчиков фиксировали для последующего определения углов отклонения фронта волны. Так же измерялась амплитуда прошедшей волны для оценки затухания ультразвука. В зоне измерений определяли усредненный угол наклона волокон к кромке пиломатериала.

В рамках исследований был применен контактный слой из густой консистентной смазки. Следует уточнить, что в поточном производстве возможно применение датчиков с силиконовыми контактными элементами для обеспечения акустического контакта между ними и пиломатериалом.

Результаты экспериментов были обработаны по методике, представленной в [Чубинский, 2024]. Обоснование количества наблюдений проводилось

с учетом критерия Стьюдента, проверка однородности дисперсий была реализована с учетом критерия Кохрена. Методическая сетка проведения эксперимента представлена в табл. 1.

Таблица 1

Методическая сетка проведения эксперимента по исследованию влияния сучков на прохождение ультразвука в древесине

Methodological grid for conducting an experiment to study the influence of knots on the passage of ultrasound in wood

Задача исследования	Постоянные факторы		Критерий оценки	Переменные факторы		Общее количество наблюдений			
	Наименование	Значение		Наименование	Значение	Количество опытов	Количество повторений опытов	Количество наблюдений в одном опыте	Общее количество наблюдений
Установить влияние сучков на прохождение ультразвука в древесине	1. Влажность древесины, %	12 ± 2	Усиление амплитуды ультразвукового сигнала, дБ	Сучки	Сросшиеся здоровые	28	3	4-6	420
	2. Плотность древесины, кг/м^3	505 ± 25							
	3. Шероховатость поверхности, мкм	24 ± 8							
	4. Порода древесины	Сосна			Частично сросшиеся и несросшиеся	35	3	4-6	525
	5. Частота, МГц	2,5							
	6. Влажность окружающей среды, %	65							
	7. Температура окружающей среды, °С	20 ± 2							
	8. Номинальная толщина ламелей, мм	26,5			Загнившие, гнилые и табачные	20	3	4-6	300

Результаты исследований. Фотографии некоторых образцов, схемы расположения и установки датчиков представлены на рис. 1 – 3. Схема установки датчика в точке 5 на рис. 2 не представлена, так как установка датчика соосно расположению сучка и не требует деталировки, при этом амплитуда сигнала в этой точке равна 69 дБ.

Из представленных рисунков видно, что в бездефектных зонах (рис. 1, точки 3 и 4; рис. 2, точки 3 и 6; рис. 3, точки 1 и 6) величина усиления

амплитуды сигнала находится примерно в одном диапазоне, от 55 до 70 дБ. Разница в усилении сигнала в этом диапазоне может быть объяснена особенностью строения древесины: различной плотностью, размерами и особенностью строения клеток, величиной зон ранней и поздней древесины и т. п. Следует отметить, что на всех исследованных образцах уровень усиления сигнала в бездефектных зонах находился в указанных пределах.

В ходе исследований были предприняты попытки идентифицировать пороки и дефекты на основе анализа ультразвуковых волн: амплитуды, формы, времени прихода и т. д. При этом об однородности структуры материала, отсутствии каких-либо дефектных зон можно говорить при отсутствии аномального изменении траектории движения звуковых волн. Сама по себе древесина является анизотропным материалом с неравномерными свойствами. При дефектоскопии с применением ультразвуковых методов контроля следует установить понимание однородной структуры, а именно первоначальную оценку образцов древесины с отсутствием любых пороков и дефектов.

Основным видами дефектов и пороков материалов из цельной древесины являются: сучки, трещины, смоляные кармашки, вырывы, сколы и т. п. Наиболее распространенными пороками древесины, снижающими качество пиломатериалов, а также в значительной степени их различные функциональные назначения, являются, в первую очередь, сучки.

При прохождении ультразвука через зону сучка с трещинами (рис. 1, точка 2) требуется большее усиление сигнала (до 105 дБ), что обусловлено наличием пустот значительного размера (трещин) и необходимостью преодоления этого дефекта ультразвуком.

Исходя из фото образца (рис. 1, I), без учета трещины в зоне 2, представленный порок можно отнести к здоровому сросшемуся сучку, особенно при визуальной оценке зоны 1. С учетом такой оценки зоны 1, учитывая, что плотность сучка выше плотности древесины в зонах 4 и 3, усиление амплитуды сигнала должно быть либо ниже, чем в бездефектной зоне, либо в том же диапазоне. Однако усиление амплитуды сигнала составляет 103 дБ, что практически идентично зоне 2. Такая аналогия может свидетельствовать о наличии скрытых трещин значительного размера внутри сучка области зоны 1, как и видимых трещин в зоне 2. На рис. 2 в зоне 5 сучка амплитуда усиления сигнала составляет 69 дБ, на рис. 3 в точке 3 – 9 дБ. Такой уровень амплитуды усиления сигнала свидетельствует об отсутствии дефектных зон, равномерно распределенной плотности материала. При этом в случае с рис. 2, точка 5, можно сделать вывод, что представленный сучок является здоровым сросшимся. Ультразвук в пиломатериалах при отсутствии дефектов не требует дополнительного усиления сигнала.

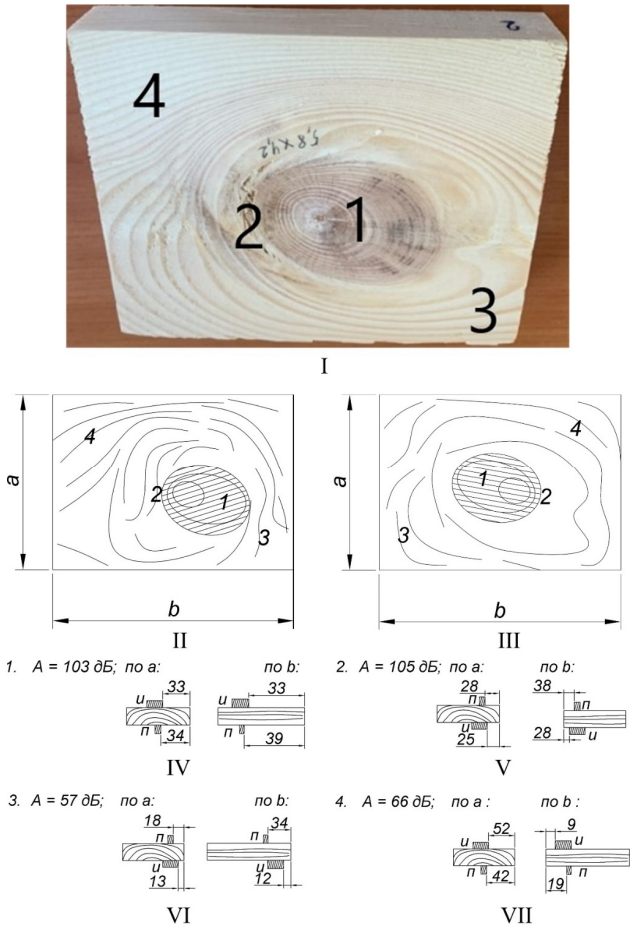


Рис. 1. Схемы расположения и установки датчиков:

I – фотография объекта; II – схема расположения датчиков (лицевая сторона объекта исследования); III – схема расположения датчиков (оборотная сторона объекта исследования); IV-VII – схемы установки датчиков с размерами в различных точках; 1-4 – точки расположения датчиков на образце; *A* – амплитуда сигнала, дБ; *u* – излучатель; *n* – приемник; *a*, *b* – стороны образца

Fig. 1. Sensor arrangement and installation diagrams:

I – photograph of the object; II – sensor arrangement diagram (front side of the object under study); III – sensor arrangement diagram (rear side of the object under study); IV-VII – sensor installation diagrams with dimensions at various points; 1-4 – sensor locations on the sample; *A* – signal amplitude, dB; *u* – emitter; *n* – receiver; *a*, *b* – sample sides

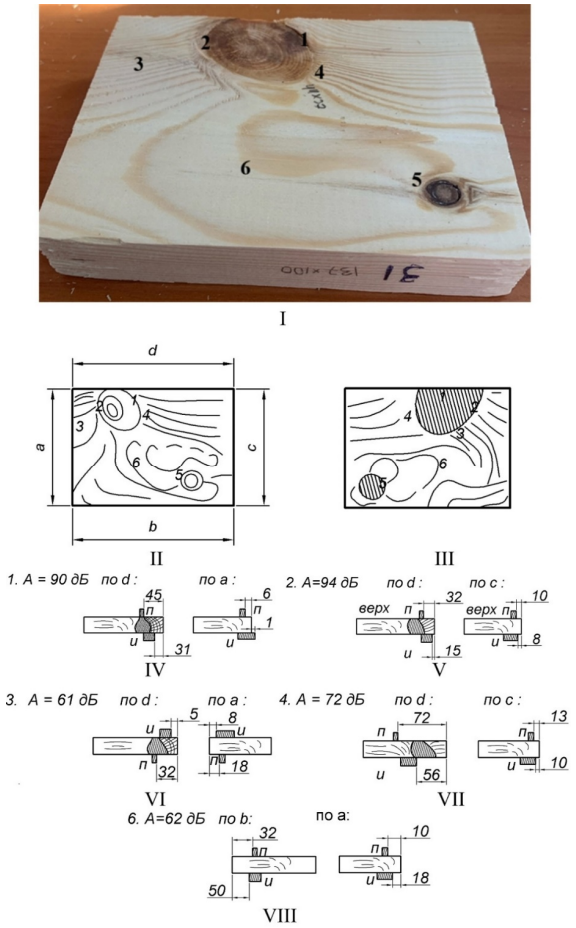


Рис. 2. Схемы расположения и установки датчиков:

I – фотография объекта; II – схема расположения датчиков (лицевая сторона объекта исследования); III – схема расположения датчиков (оборотная сторона объекта исследования); IV-VIII – схемы установки датчиков с размерами в различных точках; 1-6 – точки расположения датчиков на образце; *A* – амплитуда сигнала, дБ; *u* – излучатель; *n* – приемник; *a*, *b*, *c*, *d* – стороны образца

Fig. 2. Sensor arrangement and installation diagrams:

I – photograph of the object; II – sensor arrangement diagram (front side of the object under study); III – sensor arrangement diagram (rear side of the object under study); IV-VIII – sensor installation diagrams with dimensions at various points; 1-6 – sensor locations on the sample; *A* – signal amplitude, dB; *u* – emitter; *n* – receiver; *a*, *b*, *c*, *d* – sample sides

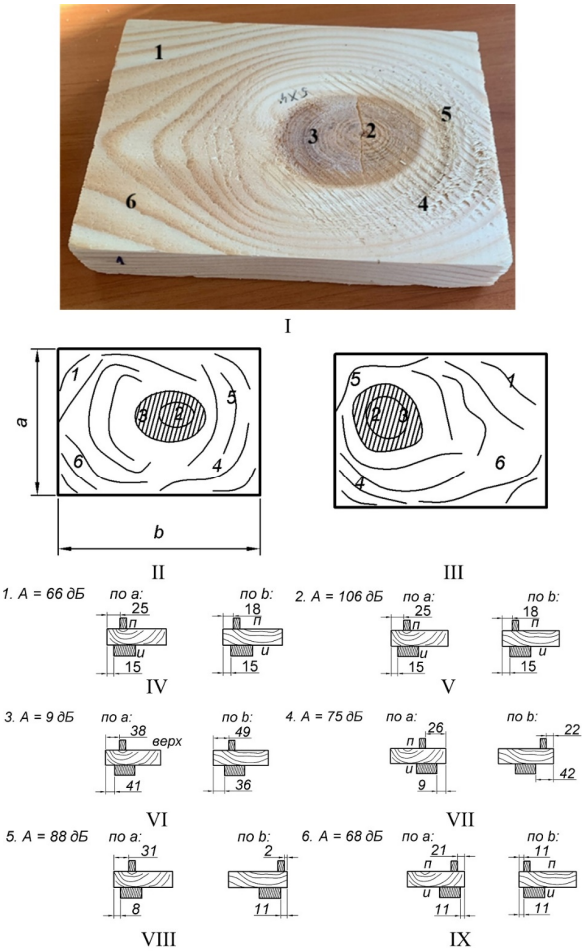


Рис. 3. Схемы расположения и установки датчиков:

I – фотография объекта; II – схема расположения датчиков (лицевая сторона объекта исследования); III – схема расположения датчиков (оборотная сторона объекта исследования); IV-IX – схемы установки датчиков с размерами в различных точках; 1-6 – точки расположения датчиков на образце; *A* – амплитуда сигнала, дБ; *u* – излучатель; *n* – приемник; *a*, *b* – стороны образца

Fig. 3. Sensor arrangement and installation diagrams:

I – photograph of the object; II – sensor arrangement diagram (front side of the object under study); III – sensor arrangement diagram (rear side of the object under study); IV-IX – sensor installation diagrams with dimensions at various points; 1-6 – sensor locations on the sample; *A* – signal amplitude, dB; *u* – emitter; *n* – receiver; *a*, *b* – sample sides

В зоне 2, рис. 2, наличие трещины на сучке также приводит к необходимости усиления амплитуды сигнала в 106 дБ. В точке 5 требуется усиление амплитуды сигнала в 88 дБ, предшествуя появлению сучка. Вероятно, оно показывает наличие микротрещин, предшествующих появлению сучка, что может быть вызвано рядом факторов, в том числе наличием внутренних напряжений, дефектами обработки и пр. Несмотря на то, что зона 3 характеризуется равномерно распределённой плотностью, представленный порок нельзя отнести к разряду здоровых сросшихся сучков, так как с одной из сторон наблюдается наличие скрытых, невидимых при визуальной оценке дефектов. При дальнейшей эксплуатации их наличие может привести к развитию трещин, способных привести к разрушению как одного элемента, так и всей конструкции в целом. Следует отметить, что образование трещин в первую очередь характерно для околосучковой зоны древесины и связано, в основном, с её усушкой.

Аналогичный характер прохождения ультразвука наблюдается и в точках 1, 2, 4 на рис. 3. Предшествуя появлению сучка, с зоной появления невидимых при визуальной оценке дефектов или пороков (зона 4) усиление амплитуды сигнала составляет 72 дБ. При этом на самом сучке в точке 1 оно составляет 90 дБ, в точке 2 – 94 дБ, что также позволяет предположить наличие внутри сучка трещин, пустот, внутренней гнили или иных аномалий строения, способных привести к снижению вариантов функционального назначения пиломатериалов.

Представленные результаты доказывают возможность использования ультразвуковых технологий при проведении сортировки пиломатериалов с определением их сорта, оценки состояния внутренней структуры на наличие пороков и дефектов. При этом область возможного применения ультразвука в деревообработке достаточна обширна, а результаты исследований последних лет показывают их высокую эффективность.

Заключение. Применение ультразвука позволяет не только определить значение плотности древесины, но и равномерность её распределения в объёме пиломатериала, оценить качество сучков, в том числе наличие в них пороков и дефектов обработки, в первую очередь трещин и гнили.

Критерием оценки наличия дефектных зон является величина усиления амплитуды сигнала. Усиление амплитуды сигнала в диапазоне от 55 до 70 дБ является наиболее характерным для древесины в бездефектных зонах или показывает наличие здоровых сросшихся сучков. Усиление амплитуды сигнала свыше 70 дБ свидетельствует о недопустимых пороках для изготовления ответственных изделий и конструкций из древесины.

В зависимости от породы древесины, её структуры и особенностей строения значения границ уровней амплитуды усиления сигнала могут быть различны, что предопределяет актуальность проведения дальнейших исследований.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Артемов В.Е., *Паврос С.К.* Исследование акустического тракта теневого метода ультразвуковой дефектоскопии с регистрацией второго прошедшего импульса // Дефектоскопия. 1981. №8. С. 68 – 73.

Бобылева Ю.Н., *Давыдов С.Л.*, *Зарецкий-Феоктистов Г.Г.* К вопросу об определении упругих параметров древесины ультразвуковым методом // ИВУЗ. Лесной журнал. 1978. №3. С. 156–159.

Голубев А.С., *Паврос С.К.* Неразрушающий контроль материалов и изделий. Л.: ЛЭТИ, 1989. 60 с.

Добротин Д.Д., *Паврос С.К.* Обработка сигналов при неразрушающем контроле. Л.: ЛЭТИ, 1986. 80 с.

Добротин Д.Д., *Паврос С.К.* Обработка и анализ случайных сигналов. Л.: ЛЭТИ, 1999. 80 с.

Ермолов И.Е, *Ланге Ю.В.* Ультразвуковой контроль // Неразрушающий контроль: справочник в 7 т. под общ. ред. В.В. Клюева. М., 2004. Т. 3. 864 с.

Кармадонов А.Н. Дефектоскопия древесины, М.: Лесная промышленность, 1987. 120 с.

Колесникова А.А. Исследование свойств древесины по кернам. Йошкар-Ола: Марийский Государственный Технический Университет, 2002. 178 с.

Лакатош Б.К. Дефектоскопия древесины, М.: Лесная промышленность, 1966. 183 с.

Полубояринов О.И. Плотность древесины. М.: Лесная промышленность, 1976. 160 с.

Уголев Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения. 4-е изд. М.: МГУЛ, 2007. 351 с.

Федяев А.А. Определение видов пиломатериалов (радиальные, тангенциальные) // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 403–416. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.403-416.

Чубинский А.Н. Методы и средства научных исследований. Методология, методы планирования и обработки результатов экспериментов: учеб. пособие. СПб.: Медиапапир, 2024. 130 с.

Чубинский А.Н., *Федяев А.А.*, *Паврос К.С.*, *Теплякова А.В.* Прогнозирование прочности склеивания строганных пиломатериалов методом ультразвуковой диагностики // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. №7. С. 109–115.

Чубинский А.Н., *Федяев А.А.*, *Паврос К.С.*, *Теплякова А.В.*, *Лозак А.А.* Исследование отклонения ультразвукового пучка при прозвучивании древесины // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. №6. С. 77–82.

Чубинский А.Н., *Тамби А.А.*, *Теппоев А.В.*, *Ананьева Н.И.*, *Семишкур С.О.*, *Бахшиева М.А.* Физические неразрушающие методы испытания и оценка структуры древесных материалов // Дефектоскопия. 2014. Т. 50, №11. С. 76-84.

Чубинский А.Н., *Тамби А.А.*, *Федяев А.А.*, *Федяева Н.Ю.*, *Кульков А.М.* Направления использования физических методов контроля структуры и свойств древесины // Системы. Методы. Технологии. 2015. №2 (26). С. 152-158.

Чубинский А.Н., *Федяев А.А.*, *Шумякова Н.*, *Федяева Н.Ю.* Определение сплошности клеевого соединения в древесном материале с помощью ультразвука // Системы. Методы. Технологии. 2017. №2 (34). С. 101-105. DOI: 10.18324/2077-5415-2017-2-101-105.

Arriaga F., *Osuna-Sequera C.*, *Bobadilla I.*, *Esteban M.* Prediction of the mechanical properties of timber members in existing structures using the dynamic modulus of elasticity and visual grading parameters // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 322, iss. 3. Art. no. 126512. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126512.

Baar J., *Tippner J.*, *Rademacher P.* Prediction of mechanical properties – modulus of rupture and modulus of elasticity – of five tropical species by nondestructive methods // Maderas. Ciencia y tecnología. 2015. Vol. 17, no. 2. P. 239–252. DOI: 10.4067/S0718-221X2015005000023.

Bucur V. Acoustics of wood. Berlin: Springer, 2006. 393 p. DOI: 10.1007/3-540-30594-7.

Tippner J., *Hrivnák J.*, *Kloiber M.* Experimental evaluation of mechanical properties of softwood using acoustic methods // BioResources. 2016. Vol. 11, no. 1. P. 503–518. DOI: 10.15376/biores.11.1.503-518.

Vázquez C., *Gonçalves R.*, *Bertoldo C.*, *Baño V. Vega A.*, *Crespo J.*, *Guaita M.* Determination of the mechanical properties of *Castanea sativa* Mill. using ultrasonic wave propagation and comparison with static compression and bending methods // Wood Science and Technology. 2015. Vol. 49. P. 607-622. DOI: 10.1007/s00226-015-0719-7.

Wang S.-Y., *Lin C.-J.*, *Chiu C.-M.* The adjusted dynamic modulus of elasticity above the fiber saturation point in *Taiwania* plantation wood by ultrasonic-wave measurement // Holzforschung. 2003. Vol. 57. P. 547–552. DOI: 10.1515/HF.2003.081.

References

Arriaga F., *Osuna-Sequera C.*, *Bobadilla I.*, *Esteban M.* Prediction of the mechanical properties of timber members in existing structures using the dynamic modulus of elasticity and visual grading parameters. *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 322, iss. 3, art. no. 126512. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126512.

Artemov V.E., *Pavros S.K.* Study of the acoustic path of the shadow method of ultrasonic flaw detection with registration of the second transmitted pulse. *Defectoscopy*, 1981, no. 8, pp. 68-73. (In Russ.)

Baar J., *Tippner J.*, *Rademacher P.* Prediction of mechanical properties – modulus of rupture and modulus of elasticity – of five tropical species by nondestructive methods. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 2015, vol. 17, no. 2, pp. 239–252. DOI: 10.4067/S0718-221X2015005000023.

Bobyleva Yu.N., *Davydov S.L.*, *Zaretsky-Feoktistov G.G.* On the issue of determining the elastic parameters of wood by the ultrasonic method. *Russian forestry journal*, 1978, no. 3, pp. 156-159. (In Russ.)

Bucur V. Acoustics of wood. Berlin: Springer, 2006. 393 p. DOI: 10.1007/3-540-30594-7.

Chubinsky A.N. Methods and Tools of Scientific Research. Methodology, Methods of Planning and Processing Experimental Results: study guide. St. Petersburg: Mediapapir, 2024. 130 p. (In Russ.)

Chubinsky A.N., *Fedyaev A.A.*, *Pavros K.S.*, *Teplyakova A.V.* Predicting the gluing strength of planed lumber using ultrasonic diagnostics. *Bulletin of SPbSETU "LETI"*, 2011, no. 7, pp. 109–115. (In Russ.)

Chubinsky A.N., *Fedyaev A.A.*, *Pavros K.S.*, *Teplyakova A.V.*, *Lozak A.A.* Study of ultrasonic beam deviation during wood sounding. *Bulletin of SPbSETU "LETI"*, 2012, no. 6, pp. 77 – 82. (In Russ.)

Chubinsky A.N., *Tambi A.A.*, *Teppoev A.V.*, *Ananyeva N.I.*, *Semishkur S.O.*, *Bakhshieva M.A.* Physical non-destructive testing methods and evaluation of wood material structure. *Russian journal of non-destructive testing*, 2014, vol. 50, no. 11, pp. 76-84. (In Russ.)

Chubinsky A.N., *Tambi A.A.*, *Fedyaev A.A.*, *Fedyaeva N.Yu.*, *Kulkov A.M.* Directions for using physical methods to control the structure and properties of wood. *Systems. Methods. Technologies*, 2015, no. 2 (26), pp. 152-158. (In Russ.)

Chubinsky A.N., *Fedyaev A.A.*, *Shumyakova N.*, *Fedyaeva N.Yu.* Determination of the continuity of the adhesive joint in wood material using ultrasound. *Systems. Methods. Technologies*, 2017, no. 2 (34), pp. 101-105. (In Russ.)

Dobrotin D.D., *Pavros S.K.* Processing of signals in non-destructive testing. Leningrad: LETI, 1986. 80 p. (In Russ.)

Dobrotin D.D., *Pavros S.K.* Processing and analysis of random signals. Leningrad: LETI, 1999. 80 p. (In Russ.)

Ermolov I.E., *Lange Yu.V.* Ultrasonic testing. *Non-destructive testing*: handbook in 7 vol. under the gen. ed. of V.V. Klyuev. Moscow, 2004, vol. 3, 864 p. (In Russ.)

Fedyaev A.A. Definition of types of lumber (radial, tangential). *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehniceskoj akademii*, 2025, iss. 255, pp. 403–416. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.403-416. (In Russ.)

Golubev A.S., *Pavros S.K.* Non-destructive testing of materials and products. Leningrad: LETI, 1989. 60 p. (In Russ.)

Karmadonov A.N. Wood flaw detection. Moscow: Lesnaya Promyshlennost, 1987. 120 p. (In Russ.)

Kolesnikova A.A. Study of wood properties using cores. Yoshkar-Ola: Mari State Technical University, 2002. 178 p. (In Russ.)

Lakatosh B.K. Wood flaw detection, Moscow: Lesnaya Promyshlennost, 1966. 183 p. (In Russ.)

Poluboyarinov O.I. Wood density. Moscow: Lesnaya Promyshlennost, 1976. 160 p. (In Russ.)

Tippner J., *Hrivnák J.*, *Kloiber M.* Experimental evaluation of mechanical properties of softwood using acoustic methods. *BioResources*, 2016, vol. 11, no. 1, pp. 503–518. DOI: 10.15376/biores.11.1.503-518.

Ugolev B.N. Wood science with the basics of forest commodity science. 4th ed. Moscow: MSUL, 2007. 351 p. (In Russ.)

Vázquez C., *Gonçalves R.*, *Bertoldo C.*, *Baño V. Vega A.*, *Crespo J.*, *Guaita M.* Determination of the mechanical properties of *Castanea sativa* Mill. using ultrasonic wave propagation and comparison with static compression and bending methods. *Wood Science and Technology*, 2015, vol. 49, pp. 607-622. DOI: 10.1007/s00226-015-0719-7.

Wang S.-Y., *Lin C.-J.*, *Chiu C.-M.* The adjusted dynamic modulus of elasticity above the fiber saturation point in *Taiwania* plantation wood by ultrasonic-wave measurement. *Holzforschung*, 2003, vol. 57, pp. 547–552. DOI: 10.1515/HF.2003.081.

Материал поступил в редакцию 19.02.2026

Федяев А.А., Теплякова А.В., Откидычева Е.В., Соловьева А.Д., Юркова О.В., Чубинский А.Н. Влияние сучков на прохождение ультразвука в древесине // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2026. Вып. 259. С. 359–374. DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.359-374

Рассмотрена возможность использования ультразвука для определения наличия и оценки состояния сучков в древесине. Сортировка пиломатериалов по наличию пороков или дефектов осуществляется в основном визуальным способом, что не всегда дает возможность корректного определения дальнейшего функционального назначения этих полуфабрикатов с требуемыми эксплуатационными характеристиками. При этом в случае визуальной оценки сорта и состояния пиломатериалов высока вероятность ошибочного принятия решения, так как ряд пороков является скрытыми. Наличие скрытых внутренних пороков или дефектов, в том числе сучков и трещин в зонах их расположения, может приводить к дальнейшему разрушению как одного элемента, так и всей конструкции в целом. Для оценки наличия и состояния этих материалов может быть применена ультразвуковая диагностика. Высокую степень достоверности при диагностике цельной древесины показывает теневой метод акустического контроля. В рамках проведенных исследований применяли частоту 2,5 МГц. При прозвучивании древесины вследствие её анатомического строения возникает ряд

особенностей самой диагностики, которые позволяют расширить возможности использования метода. К таким особенностям можно отнести необходимость усиления амплитуды сигнала для его прохождения через древесину, что свидетельствует о наличии или отсутствии пороков или дефектов, а также дает возможность оценки их состояния и определения функционального назначения. Бездефектная зона, а также зона со здоровыми сросшимися сучками требуют усиления амплитуды сигнала до 70 дБ. Увеличение усиления амплитуды сигнала выше 70 дБ свидетельствует о появлении зоны концентрации внутренних напряжений, а также пороков и дефектов, значительно снижающих качество пиломатериалов.

Ключевые слова: пиломатериалы, пороки древесины, дефекты древесины, сучки, трещины, теневой метод, усиление амплитуды сигнала, ультразвук.

Fedyaev A.A., Teplyakova A.V., Otkidycheva E.V., Solovyeva A.D., Yurkova O.V. Chubinsky A.N. The effect of knots on the passage of ultrasound in wood. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2026, iss. 259, pp. 359–374 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.359-374

The possibility of using ultrasound to detect the presence and assess the condition of knots in wood is considered. Sorting lumber for defects or flaws is primarily done visually, which does not always allow for an accurate determination of the intended use of these semi-finished products with the required performance characteristics. Furthermore, visual assessment of the grade and condition of lumber is highly prone to making erroneous decisions, as some defects are hidden. The presence of hidden internal defects or flaws, including knots and cracks in the areas where they are located, can lead to further failure of either a single element or the entire structure. Ultrasonic diagnostics can be used to assess the presence and condition of these materials. The shadow method of acoustic testing demonstrates a high degree of reliability in the diagnostics of solid wood. A frequency of 2.5 MHz was used in the studies. Due to the anatomical structure of wood, several diagnostic features arise during the sounding process, which expand the scope of this method. These characteristics include the need to amplify the signal amplitude to pass through the wood, which indicates the presence or absence of defects and flaws, and allows for an assessment of their condition and the determination of their functional purpose. A defect-free zone, as well as a zone with healthy intergrown knots, requires signal amplification to 70 dB. Increasing the signal amplitude above 70 dB indicates the presence of a zone of internal stress concentration, as well as defects and flaws that significantly reduce the quality of the lumber.

Keywords: lumber, wood defects, wood flaws, knots, cracks, shadow method, signal amplitude amplification, ultrasound.

ФЕДЯЕВ Артур Александрович – заведующий кафедрой технологии материалов, конструкций и сооружений из древесины Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук. ORCID: 0000-0001-8036-7432. SPIN-код: 8169-9209.

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

FEDYAEV Artur A. – PhD (Technical), Head of the Department of Materials Technology, Designs and Constructions of Wood, St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0000-0001-8036-7432. SPIN-code: 8169-9209.

194021. Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: art_fedyaev@mail.ru

ТЕПЛЯКОВА Александра Викторовна – доцент кафедры электроакустики и ультразвуковой техники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), кандидат технических наук. ORCID: 0009-0005-9887-2345. SPIN-код: 8103-2766.

197022, ул. Профессора Попова, д. 5, лит. Ф, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: smaest@mail.ru

TEPLYAKOVA Aleksandra V. – PhD (Technical), Associate Professor, Department of Electroacoustics and Ultrasound Technology, St. Petersburg Electrotechnical University “LETI”. ORCID: 0009-0005-9887-2345. SPIN-code: 8103-2766.

197022. Professora Popova str. 5. Let. F. St. Petersburg. Russia. E-mail: smaest@mail.ru

ОТКИДЫЧЕВА Елизавета Вячеславовна – инженер, АО «НПП Радар ММС». ORCID: 0009-0005-4576-974X.

197375, ул. Новосельковская, д. 37, лит. А., Санкт-Петербург, Россия. E-mail: o.liza2003@yandex.ru

OTKIDYCHEVA Elizaveta V. – engineer, AO “NPP Radar MMS”. ORCID: 0009-0005-4576-974X.

197375. Novoselkovskaya str. 37. Let. A. St. Petersburg. Russia. E-mail: o.liza2003@yandex.ru

СОЛОВЬЕВА Анастасия Дмитриевна – аспирант кафедры технологии материалов, конструкций и сооружений из древесины Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. ORCID: 0009-0007-3783-6003. SPIN-код: 9353-3872.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: nastya.solo.spb2016@yandex.ru

SOLOVYEVA Anastasia D. – PhD student, Department of Materials Technology, Designs and Constructions of Wood, St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0000-0002-1157-3731. SPIN-code: 9353-3872.

194021. Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: nastya.solo.spb2016@yandex.ru

ЮРКОВА Олеся Викторовна – руководитель технологического отдела ООО «Ставрос». ORCID: 0009-0003-7637-4834. SPIN- код: 2636-2304.

190020, наб. Обводного канала, д. 134, к. 12, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: olesya_urkova.tiger22@yandex.ru

YURKOVA Olesya V. – Head of the Technology Department, LLC «Stavros». ORCID: 0009-0003-7637-4834. SPIN-code: 2636-2304.

190020. Obvodnogo kanala emb. 134, build. 12. St. Petesrburg. Russia. E-mail: olesya_urkova.tiger22@yandex.ru

ЧУБИНСКИЙ Анатолий Николаевич – профессор кафедры технологии материалов, конструкций и сооружений из древесины Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор технических наук,. ORCID: 0000-0001-7914-8056. SPIN-код: 9752-4460.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: a.n.chubinsky@gmail.com

CHUBINSKY Anatoly N. – DSc (Technical), Professor, Department of Materials Technology, Designs and Constructions of Wood, St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0000-0001-7914-8056. SPIN-code: 9752-4460.

194021. Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: a.n.chubinsky@gmail.com

УДК 674.038.5

Н.А. Вохмянин, С.А. Угрюмов, М.В. Тарабан

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НИЗКОТОВАРНОЙ ДРЕВЕСИНЫ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА «SHELON»

Введение. Лесопромышленный комплекс «SHELON» является одним из флагманов лесоперерабатывающей отрасли на Северо-Западе Российской Федерации и имеет в своём составе следующие производственные подразделения:

- Лесозавод «СУДОМА» (поселок городского типа Дедовичи, Псковская область) – современное лесопильно-деревообрабатывающее предприятие, ориентированное на выпуск широкой номенклатуры продукции: пиломатериалов транспортной влажности, изделий из термомодифицированной, импрегнированной и строганой древесины, мебельного щита и топливных брикетов;
- «Дедовичская лесная компания» (посёлок городского типа Дедовичи, Псковская область) – лесозаготовительная компания с площадью арендной базы 100 тыс. га и годовым объемом заготовки древесины на уровне 250 тыс. м^3;
- Лесопитомник «Экополис» (поселок городского типа Дедовичи, Псковская область) – единственный в Псковской области и один из немногих в Северо-Западном федеральном округе частный проект высокотехнологичного тепличного комплекса, где выращивают сеянцы ели и сосны с закрытой корневой системой, устойчивые к морозам и вредителям;
- Завод по производству древесно-полимерного композита «Варяжский композит» (г. Ульяновск) – первое в России предприятие, применившее инновационную технологию изготовления гранул ДПК с добавлением твердого пластика.

В процессе лесозаготовки на делянках «Дедовичской лесной компании», как и у любого другого лесозаготовительного предприятия, наряду с пиловочным сырьём скапливается значительное количество низкотоварной древесины: тонкомера, баланса, технологического сырья (табл. 1).

До недавнего времени вопросы утилизации большей части низкотоварной древесины решались за счет ее продажи в рамках долгосрочных экспортных контрактов в европейские страны. На сегодняшний день, в силу известных внепроизводственных проблем, возможность подобных работ практически сведена к нулю. По этой причине перед ЛПК «SHELON» остро встал вопрос поиска альтернативных вариантов утилизации низкотоварной древесины или передела её в ликвидные на внутреннем рынке виды продукции.

Таблица 1

Структура низкотоварной древесины «Дедовичской лесной компании»

Structure of low-value wood from Dedovichskaya Forest Company

№	Состав низкокачественной древесины	Годовой объем, пл. м^3
1.	Тонкомер еловый	5 813
2.	Тонкомер сосновый	3 226
3.	Баланс сосновый	8 611
4.	Баланс еловый	17 410
5.	Баланс березовый	51 696
6.	Баланс осиновый	9 656
7.	Технологическое сырьё (порубочные остатки)	39 903
	ИТОГО:	136 315

Цель работы – исследование и выработка рациональных направлений эффективной переработки низкокачественного древесного сырья на предприятиях лесопромышленного комплекса «SHELON».

Материалы и методика исследования. При реализации исследований задача по выбору и обоснованию перспективных направлений переработки имеющегося низкокачественного древесного сырья решалась не только исходя из имеющегося объема и породного состава низкотоварной древесины, но и с учетом анализа целого ряда важных сопутствующих факторов: логистических, технических, технологических, экологических, энергетических, обеспеченности водными ресурсами, экономических.

Результаты исследований. Основные исходные данные, взятые в качестве основы для данной работы, выглядят следующим образом. Характеристика и объем низкотоварной древесины приведены в табл. 1. Лесозаготовка ведется ООО «Дедовичская лесная компания» (лесничество «Порховское», участковые лесничества «Дедовичское» и «Полистовское»). Территориальный район планируемого размещения производства по переработке низкотоварной древесины – Псковская область, Великолукский район.

Проект освоения лесов содержит сведения о лесном участке, разрешенных объемах заготовки древесины, запроектированных мероприятиях по охране, защите и воспроизводству лесов. Заготовка древесины осуществляется ООО «Дедовичская лесная компания» для ее продажи в целях получения коммерческой прибыли, а также в целях обеспечения многоцелевого,

рационального, непрерывного, неистощительного использования арендованного лесного участка.

Предполагаемый тип строительства – «Гринфилд», подразумевает строительство нового завода или производственного объекта на чистом участке, который ранее не использовался в промышленных целях. При отсутствии существующих структур или инфраструктуры, которые необходимо учитывать, проект «Гринфилд» предоставляет проектировщикам и инженерам большую гибкость и свободу при проектировании планировки завода и производственных процессов.

Обеспечение планируемой промплощадки энергоресурсами, водоподведением и водоотведением, газоподведением выглядит следующим образом: электроэнергия – лимитированное энергоподведение мощностью до 100 МВт/час; с учетом региона предполагаемого расположения предприятия требования к водоподведению могут быть существенно ограничены [Великолукский…, 2026]; газификация новых производственных площадок в Великолукском районе не осуществляется.

Логистические характеристики промышленной площадки: расстояние до основной производственной площадки г. Дедовичи – 179 км, до г. Москва – 470 км, до г. Санкт-Петербург – 490 км, до границы с Республикой Беларусь – 80 км, до границы с Латвией – 150 км. Можно считать, что площадка имеет достаточно удобное расположение между основными рынками потребления практически любого вида выбранной производственной продукции.

Требования к возможным видам готовой продукции:

- в составе готовой продукции древесина должна составлять наибольшую долю;
- предлагаемый продукт должен, по возможности, быть изготовленным из всех имеющихся пород древесины;
- доля закупаемых на стороне ингредиентов (клеи, наполнители и пр.) должна быть минимизирована;
- продукция не должна быть опытно-экспериментальной и должна иметь подтверждённые рыночные перспективы, возможно, низкую производственную себестоимость и высокую маржинальность;
- продукция должна иметь всесезонный спрос [Вохмянин, Тарабан, 2024a, b].

Требования к применяемым технологиям:

- технологические и технические решения должны быть апробированными; оборудование должно быть серийно выпускаемым в Российской Федерации или в дружественных странах;

• характеристики технологии и оборудования должны в целом корреспондироваться с имеющимися ограничениями по электроэнергии, газу, воде, соответствовать всем экологическим, санитарным, пожарным требованиям, требованиям по охране труда;

• технология и оборудование должны предполагать высокую степень автоматизации и, как следствие, обеспечивать минимальную численность производственного персонала.

Ниже представлены отобранные для сравнения возможные виды продукции, ее характеристики и целесообразность выпуска:

1. Лесопиление с использованием круглых лесоматериалов малого диаметра. Организация подобного направления переработки имеющегося сырья технически возможна, но имеет ряд отрицательных аспектов:

• малый полезный выход пиломатериалов (рис. 1);

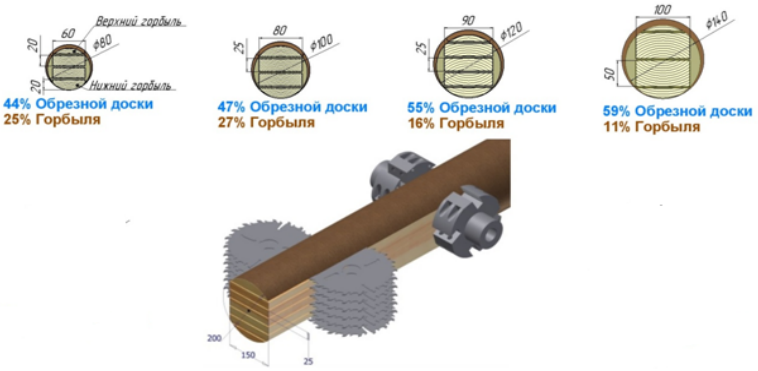


Рис. 1. Средние оптимистические значения полезного выхода пиломатериалов при использовании низкотоварной древесины
Fig. 1. Average optimistic values of the useful yield of lumber when using low-value wood

• крайне ограниченная спецификация получаемых пиломатериалов;

• низкая добавленная стоимость получаемой продукции;

• сложность подбора оптимального состава технологического оборудования, поскольку автоматизированные линии имеют избыточную производительность, потоки на основе позиционных станков требуют привлечения большого количества персонала и значительных производственных площадей.

2. Изготовление различных строительных конструкционных материалов на основе измельченной древесины и цемента (гипса):

• Гипсостружечная плита (ГСП), гипсостружечная влагостойкая плита (ГСПВ). Данный вид продукции востребован потребительским рынком (рис. 2).

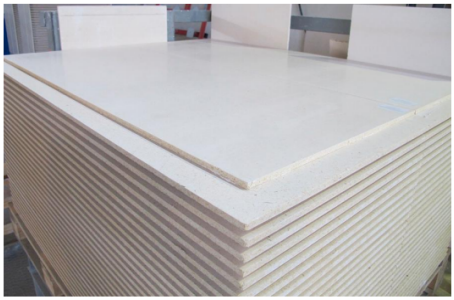


Рис. 2. Гипсостружечная плита
Fig. 2. Gypsum board

Технология производства гипсостружечных плит не является сложной и дорогостоящей, хотя и требует задействования значительных производственных и складских площадей. Несмотря на вышесказанное, ГСП и ГСПВ не могут быть рекомендованы к производству, так как состав гипсостружечной плиты включает три компонента – гипс (83%), древесную стружку (15%) и воду (2%). Таким образом, данный вид продукции не решает поставленной задачи по утилизации низкотоварной древесины;

• Фибролитовые панели и плиты различных типов (NORDECO, GreenBoard) (рис. 3).

(a) (b)

Рис. 3. Фибролитовые плиты: (a) «NORDECO»; (b) «GreenBoard»
Fig. 3. Fiberboard plates: (a) “NORDECO”; (b) “GreenBoard”

Состав фибролитовых плит: древесная шерсть (волокна длиной 250 мм) – 60%; портландцемент серого или белого цвета – 39,8%; силикат натрия (жидкое стекло) – 0,2%. Содержание древесины в готовом продукте на уровне 60% – это приемлемый показатель по сравнению с ГСП, но он значительно уступает ряду других видов продукции. Технологии производства фибролитовых плит достаточно просты и недороги. К минусам данных материалов можно отнести тот факт, что рынок сбыта в достаточной степени ограничен и уже заполнен продукцией других производителей;

3. Несъемная опалубка: блоки TECOLIT, Durisol, несъемная опалубка VELOX и их аналоги (рис. 4).

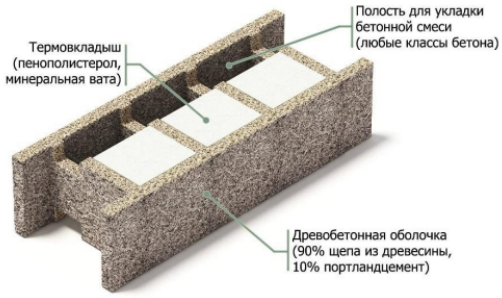


Рис. 4. Блок несъемной опалубки «Durisol»
Fig. 4. Durisol non-removable formwork block

Содержание древесины в готовом продукте достигает 90%, что отвечает требованиям заказчика. Технологический процесс не отличается большой сложностью, но требует значительных производственных и складских площадей.

Главным минусом в развитии данного направления является консерватизм потребителя, предпочитающего традиционные материалы и технологии для загородного строительства. Доля данного материала в частном индивидуальном строительстве чрезвычайно мала, и объективных предпосылок для её увеличения не наблюдается. К минусам также можно отнести транспортно-логистические вопросы, стабильность и сезонность спроса на данную группу продукции;

4. Термомеханическая масса (ТММ). Производящаяся по экструзивной технологии химико-термомеханическая масса (рис. 5) представляет из себя волокнистый полуфабрикат для производства бумаги и картона.

Рис. 5. Термомеханическая масса
Fig. 5. Thermomechanical mass

По своим механическим и химическим свойствам это широко востребованный вид волокна. Содержание древесины в готовом продукте близко к 100%. Производство технологично и высоко автоматизировано. Продукция высоколиквидна и рентабельна. К минусам можно отнести ограниченность используемого породного состава сырья (100% сосна), требуется сортировка хвойных пород, большой расход чистой воды, проблемы с водоочисткой и атмосферными выбросами вредных веществ, иные экологические риски;

5. Различные виды продукции на основе пиролизных процессов.

• Производство активированного угля марок БАУ-А и ОУ-А (рис. 6). Одним из приоритетных вариантов переработки низкотоварной берёзовой древесины может стать организация современного высокотехнологичного производства активированного древесного угля марки БАУ-А по ГОСТ 6217-74 и ОУ-А по ГОСТ 4453-74 общим объемом до 800 т/год.

Рис. 6. Активированный уголь
Fig. 6. Activated carbon

Данное направление решает поставленную задачу переработки более 50 тыс. м^3 березовых балансов в год. Продукция востребована, рентабельна и ликвидна. Следует учитывать, что на определенных этапах технологического

процесса (предварительный нагрев сушилки и печи карбонизации) требуется использование природного газа. В целом данное направление можно рассматривать, как одно из приоритетных;

• Производство древесного кускового угля. Данное направление решает поставленную задачу переработки низкокачественных березовых балансов на выпуск кускового угля по ГОСТ 24260-80. Технология достаточно проста, отработана и может быть размещена в непосредственной близости от источника сырья (рис. 7).

Рис. 7. Пиролизная печь
Fig. 7. Pyrolysis furnace

К факторам риска следует отнести сезонность спроса на продукцию в РФ (потребуются значительные складские помещения) и транспортно-логистические издержки при экспортных поставках в восточном направлении;

6. Производство высушенных колотых дров по ГОСТ 3243-88. Является еще более простым и бюджетным вариантом переработки лиственной низкотоварной древесины по сравнению с активированными углями БАУ-А и ОУ-А и кусковым углем по ГОСТ 24260-80. Оборудование для получения данного вида продукции вполне доступно по ценовым характеристикам и выпускается в РФ (рис. 8, 9).

К недостаткам производства данного вида продукции можно отнести малую добавленную стоимость и закрытие рынка сбыта в Европе. Это направление деятельности можно рассматривать как первый, промежуточный этап для организации выпуска кускового, а затем и активированного угля;

7. Изготовление конструкционного плитного материала OSB. Плиты OSB относятся к категории строительных плит из древесины (рис. 10), их производство и применение регламентируется требованиями ГОСТ Р 56309-2014, в котором, однако, не регламентируется породный состав сырья.

В исследованиях [Еспаева, 2011; Баяндин, Криворотова, 2021] приводятся рекомендации по используемому сырью, сводящиеся к предпочтительному применению хвойных и мягколиственных пород древесины. Таким образом,

имеется возможность переработки в плиты OSB всего объема имеющейся низкотоварной древесины, доля которой в готовой продукции составляет до 90%. Плита OSB является высокомаржинальным и востребованным на внутреннем рынке продуктом [Мехренцев и др., 2017; Гайфуллина, 2023]. Технология изготовления апробирована, производство высоко автоматизировано (рис. 11).

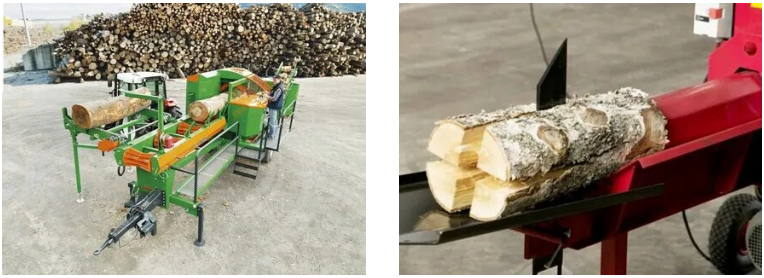


Рис. 8. Дровокольное оборудование отечественного производства
Fig. 8. Domestic wood-chopping equipment

Рис. 9. Отечественные сушильные камеры для колотых дров
Fig. 9. Domestic drying chambers for split firewood

Рис. 10. Ориентированная стружечная плита
Fig. 10. Oriented strand board

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

Рис. 11. Основные этапы производства плит OSB: (a) сортировка сырья; (b) подготовка сырья и изготовление стружки; (c) подготовка стружечного ковра; (d) горячее прессование плит; (e) охлаждение и нормализация качества

Fig. 11. The main stages of OSB board production: (a) raw material sorting; (b) raw material preparation and shavings production; (c) shavings carpet preparation; (d) hot pressing of boards; (e) cooling and quality normalization

Проблема выбора направления развития лесопильного-деревообрабатывающего комплекса «SHELON» в части переработки имеющегося объема низкотоварной древесины является комплексной. Необходим всесторонний

анализ всех факторов, влияющих на успешность планируемых в будущем инвестиций. Речь идет о системном учете как технологических, так логистических, сбытовых, экологических, финансовых и иных важных составляющих проекта.

Заключение.

На основании вышеизложенного можно сделать ряд предварительных выводов и рекомендаций по организации производств по переработке низкотоварной древесины:

1. Лесопиление с использованием круглых лесоматериалов малого диаметра – это возможный вариант развития как средство переработки части имеющейся низкотоварной древесины, может быть оперативно реализован и интегрирован в действующее производство. Экономическая целесообразность создания отдельного лесопильного участка требует детальной проработки;

2. Изготовление различных строительных конструкционных материалов на основе измельченной древесины и минеральных вяжущих. Из данной группы материалов наиболее целесообразно производство фибролитовых панелей (плит). Содержание древесины в них находится на уровне 60%, что позволяет переработать значительный объем имеющегося сырья. Технология производства достаточно проста и бюджетна. Гипсостружечные плиты с содержанием древесины на уровне 15% не решают поставленную заказчиком задачу.

Различные варианты изготовления несъемных опалубок, несмотря на высокое содержание древесины (до 85%) и относительную простоту производства, вызывают сомнения как в части стабильности спроса на данный вид продукции, так и в логистических вопросах;

3. Изготовление термомеханической массы. Данное направление можно было бы считать одним из приоритетных как с точки зрения утилизации низкокачественного сырья, так и с коммерческой и технологической точек зрения. Однако у него имеются серьезные ограничения, в первую очередь по экологическим и водоохранным вопросам;

4. Получение различных видов продукции на основе пиролизных процессов. Данное направление также можно считать одним из приоритетных как с точки зрения утилизации низкокачественного сырья, так и с коммерческой и технологической точек зрения. В настоящее время требуется более детальное изучение рынка сбыта. Возможна реализация любого из поднаправлений как самостоятельного и как этапного (изготовление дров–сушка–уголь–активированный уголь);

5. Изготовление конструкционного плитного материала (плит OSB). Данное направление можно рассматривать как наиболее перспективное. Это обусловлено следующими факторами: высоким содержанием (до 90%) в продукте древесины всех имеющихся пород; возможностью утилизировать большую часть низкотоварной древесины; отработанностью технологии; стабильным спросом на продукцию.

Вклад авторов. Авторы заявляют о равноценном участии в подготовке данного материала.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Баяндин М.А., *Криворотова А.И.* Современные процессы и технологии производства древесных плит. Красноярск: СибГУ им. академика М.Ф. Решетнева, 2021. 84 с.

Великолукский район. URL: https://priroda.pskov.ru/velikolukskiy-rayon-0 (дата обращения: 24.02.2026).

Вохмянин Н.А., *Тарабан М.В.* Обоснование выбора направлений переработки низкотоварной древесины лесопромышленного комплекса «SHELON» (постановка задачи и критерии сравнения) // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: мат. IX Всерос. науч.-техн. конф. СПб., 2024a. С. 353-356.

Вохмянин Н.А., *Тарабан М.В.* Обоснование выбора направлений переработки низкотоварной древесины лесопромышленного комплекса «SHELON» (результаты анализа и рекомендации) // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: мат. IX Всерос. науч.-техн. конф. СПб., 2024b. С. 356-359.

Гайфуллина Э.В. Управление процессами импортозамещения на производстве ОСП плит // Вектор научной мысли. 2023. №5 (5). С. 189-191.

Еспаева А.С. Технология плитных материалов: учебник. Алматы: ТОО РПИК Дәуір, 2011. 488 с.

Мехренцев А.В., *Стариков Е.Н*., *Мезенцева Е.С.* Обзор развития рынка древесных плит в Российской Федерации // Аграрный вестник Урала. 2017. №10 (164). С. 77-85.

References

Bayandin M.A., *Krivorotova A.I.* Modern processes and technologies of wood panels production. Krasnoyarsk: SibSU named after academician M.F. Reshetnev, 2021. 84 p. (In Russ.)

Espaeva A.S. Technology of Board Materials: textbook. Almaty: LLP RPIK Dauir, 2011. 488 p. (In Russ.)

Gayfullina E.V. Management of import substitution processes in the production of OSB boards. *Vector of scientific thought*, 2023, no. 5 (5), pp. 189-191. (In Russ.)

Mekhrentsev A.V., *Starikov E.N.*, *Mezentseva E.S.* Overview of the Development of the Wood Panel Market in the Russian Federation. *Agrarian Bulletin of the Urals*, 2017, no. 10 (164), pp. 77-85. (In Russ.)

Velikoluksky district. URL: https://priroda.pskov.ru/velikolukskiy-rayon-0 (accessed February 24, 2026). (In Russ.)

Vokhmyanin N.A., *Taraban M.V.* Justification of the Choice of Directions of Processing of Low-Value Wood of the SHELON Timber Industry Complex (Problem Statement and Comparison Criteria). *Forests of Russia: Politics*, *Industry*, *Science*, *and Education*: proc. of the IX All-Russ. sci.-tech. conf. St. Petersburg, 2024a, pp. 353-356. (In Russ.)

Vokhmyanin N.A., *Taraban M.V.* Substantiation of the Choice of Directions of Processing of Low-Value Wood of the SHELON Timber Industry Complex (Results of the Analysis and Recommendations). *Forests of Russia: Politics*, *Industry*, *Science*, *and Education*: proc. of the IX All-Russ. sci.-tech. conf. St. Petersburg, 2024b, pp. 356-359. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 27.02.2026

Вохмянин Н.А., Угрюмов С.А., Тарабан М.В. Обоснование выбора приоритетных направлений использования низкотоварной древесины лесопромышленного комплекса «SHELON». *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2026, iss. 259, pp. 375–389 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.375-389

Работа посвящена обоснованию выбора приоритетных направлений использования низкотоварной древесины лесопромышленного комплекса «SHELON» – одного из флагманов лесоперерабатывающей отрасли на Северо-Западе Российской Федерации. В процессе лесозаготовки на предприятии образуется значительное количество низкотоварной древесины в виде тонкомера, баланса и технологического сырья, которое в настоящее время недостаточно эффективно перерабатывается. В работе исследованы и выработаны альтернативные рациональные направления эффективной переработки низкокачественного древесного сырья на предприятиях лесопромышленного комплекса «SHELON». При реализации исследований задача по выбору и обоснованию перспективных направлений переработки имеющегося низкокачественного древесного сырья решалась с учетом анализа логистических, технических, технологических, экологических, энергетических, сырьевых и экономических факторов, обеспеченности водными ресурсами. Учитывались следующие требования к потенциально выпускаемой готовой продукции: в составе готовой продукции древесина должна составлять наибольшую долю; предлагаемый продукт должен, по возможности, быть изготовленным из всех имеющихся пород древесины; доля закупаемых на стороне ингредиентов (клеи, наполнители и пр.) должна быть минимизирована; продукция не должна быть

опытно-экспериментальной и должна иметь подтверждённые рыночные перспективы, возможно, низкую производственную себестоимость и высокую маржинальность; продукция должна иметь всесезонный спрос. Рекомендованы следующие варианты переработки низкотоварной древесины: лесопиление с использованием круглых лесоматериалов малого диаметра; изготовление различных строительных конструкционных материалов на основе измельченной древесины и минеральных вяжущих; изготовление термомеханической массы; получение различных видов продукции на основе пиролизных процессов; изготовление конструкционного плитного материала (плит OSB).

Ключевые слова: пиловочник, низкотоварная древесина, пиломатериалы, плитные материалы, несъемная опалубка, древесный уголь, дрова, термомасса, активированный уголь, ориентированная стружечная плита.

Vokhmyanin N.A., Ugryumov S.A., Taraban M.V. Substantiation of the choice of pr–iority areas for the use of low-commodity timber from the “SHELON” timber industry complex. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2026, iss. 259, pp. 375–389 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.375-389

The work is devoted to substantiating the choice of priority areas for the use of low-commodity timber from the “SHELON” timber industry complex – one of the flagships of the timber processing industry in the North-West of the Russian Federation. In the process of logging, a significant amount of low-quality wood is formed at the enterprise in the form of fine grain, balance and technological raw materials, which are currently not being processed efficiently enough. The paper investigates and develops alternative rational directions for the effective processing of low-quality wood raw materials at the enterprises of the “SHELON” timber industry complex. During the research, the task of selecting and substantiating promising areas for processing existing low-quality wood raw materials was solved taking into account the analysis of logistical, technical, technological, environmental, energy, raw materials, economic factors, water resources. The following requirements for potentially manufactured finished products were taken into account: wood should make up the largest share of the finished product; the proposed product should, if possible, be made from all available wood species; the share of ingredients purchased on the side (adhesives, fillers, etc.) should be minimized; products should not be experimental and should have proven market advantages. prospects, possibly low production cost and high marginality; products should have an all-season demand. The following options for processing low-commodity wood are recommended: sawmilling using small-diameter roundwood; production of various building structural materials based on crushed wood and mineral binders; production of thermomechanical mass; production of various types of products based on pyrolysis processes; production of structural slab material (OSB slabs).

Keywords: sawmill, low-grade wood, lumber, slab materials, permanent formwork, charcoal, firewood, thermal mass, activated carbon, oriented chipboard.

ВОХМЯНИН Николай Александрович – доцент кафедры начертательной геометрии и инженерной графики Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук. SPIN-код: 8306-1032.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: 7520910@gmail.com

VOKHMYANIN Nikolay A. – PhD (Technical), Associate Professor, Department of Descriptive Geometry and Engineering Graphics, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 8306-1032.

194021. Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: 7520910@gmail.com

УГРЮМОВ Сергей Алексеевич – заведующий кафедрой технологии лесозаготовительных производств Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор технических наук, профессор. ResearcherID: F-6510-2016. ORCID: 0000-0002-8077-3542. SPIN-код: 6246-6269.

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

UGRYUMOV Sergei A. – DSc (Technical), Head of the Department of Technology of Logging Industries, St.Petersburg State Forest Technical University, Professor. ResearcherID: F-6510-2016. ORCID: 0000-0002-8077-3542. SPIN-code: 6246-6269.

194021. Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: ugr-s@yandex.ru

ТАРАБАН Мария Всеволодовна – доцент кафедры математики Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета, кандидат технических наук. SPIN-код: 7023-1741.

190005, 2-я Красноармейская ул., д. 4, Санкт-Петербург, Россия.

TARABAN Maria V. – PhD (Technical), Associate Professor, Department of Mathematics, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. SPIN-code: 7023-1741.

190005. 2nd Krasnoarmeyskaya str. 4. St. Petersburg. Russia.

4. ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ. БИОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 676.16.022.6.034; 676.164.2; 676.166.6

А.В. Вураско, М.А. Агеев, А.Л. Шерстобитов, И.А. Губанов

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВЛЕНИЯ НАТРОННОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ КОСТРЫ КОНОПЛИ В КОМПОЗИЦИЮ ТАРОУПАКОВОЧНЫХ ВИДОВ БУМАГИ

Введение. В настоящее время в странах с развитой целлюлозно-бумажной промышленностью 85...90% бумаги и картона производится с преобладанием вторичного волокна [Вураско, Сиваков, 2025]. Применение бумаги и картона из макулатурной массы в гофрокартонном производстве значительно удешевило стоимость ящиков из гофрокартона, обеспечило ресурсосбережение древесного сырья и снизило нагрузку на экологию. Однако интенсивно развивающаяся сырьевая база гофрокартонного производства требует совершенствования технологий и оборудования для изготовления бумаги и картона с использованием макулатурного (вторичного) волокна [Вураско, Сиваков, 2025].

Наиболее востребованным изделием из гофрокартона являются ящики. Стандарт на ящики из гофрокартона (ГОСТ 9142–90) включает только общие требования к физико-механическим свойствам ящиков (сопротивление сжатию, перевалкам, ударам при падении и т. д.), а стандарты для упаковки конкретных видов продукции – другие требования, например, условия транспортирования и хранения, способность упаковываемой продукции воспринимать нагрузку штабеля при штабелировании [Судоплатова, 2022].

В требованиях к ящикам выделяют два вида нагрузок – динамические (при падении) и статические (при штабелировании и перемещении) [Смолин и др., 2014]. В связи с тем, что промышленность перешла, преимущественно, на перевозки в транспортной палетированной упаковке, вероятность падения ящиков снизилась. При этом экономия складских площадей и вместимость транспорта приводит к необходимости штабелирования с увеличением высоты

штабеля и, как следствие, повышения жесткости тары [Смолин и др., 2025]. Такие особенности логистики потребовали изменений технических требований к ящикам из гофрированного картона. Так, в п. 4 ГОСТ 9142-2014 «Ящики из гофрированного картона» указано: «Показатели механической прочности ящиков: сопротивление сжатию, прочность при штабелировании, сопротивление ударам при свободном падении, сопротивление горизонтальному удару устанавливают в технической документации на ящики для конкретных видов продукции в зависимости от способности продукции воспринимать или не воспринимать нагрузку при штабелировании».

Современные технологии переработки макулатурного сырья позволяют многократно использовать растительные волокна при производстве бумаги и картона [Вураско, Сиваков, 2025], однако они имеют свой «ресурс» и при многократном использовании теряют прочностные свойства. Одним из решений улучшения прочностных характеристик считается добавление к макулатурному волокну различных видов первичных волокон [Албаррам и др., 2025] растительного происхождения.

В последнее время в России, вновь возрождается интерес к выращиванию конопли технической [Великанова, 2024; Шипова и др., 2024]. Из литературных данных известно, что в ее стеблях содержание волокна составляет 30…25 %, остальная часть стебля (70…75%) – это костра [Серков и др., 2018; Агеев и др., 2023].

В настоящее время лубяные волокна стеблей конопли технической, отделяемые декортизацией, используют для изготовления тканей, канатов и других изделий. Образующийся после декортизации отход переработки – костра. Ее можно использовать для получения целлюлозы и бумаги [Агеев и др., 2023; Шипова и др., 2024].

Цель работы – повышение прочности тароупаковочных видов бумаги и картона за счет применения в композиции с макулатурой марки МС-5Б целлюлозы из костры конопли технической.

Задачи работы: определить компонентный состав костры конопли технической; определить условия щелочной варки для получения жесткой целлюлозы; изготовить образцы картона для плоских слоев гофрированного картона и бумаги для гофрирования разного композиционного состава; оценить возможность использования волокнистого полуфабриката из костры конопли технической в композиции тароупаковочных видов бумаги.

Методика исследования. Объекты исследований – образцы бумаги и картона, изготовленные из композиции вторичных волокон (макулатура марки МС-5Б) и первичных волокон, и целлюлоза, полученная в лабораторных условиях из костры конопли.

В качестве сырья для получения целлюлозы использовали отходы переработки стеблей конопли технической урожая 2024 г. из Курганской области в виде частиц костры разных размеров. Частицы костры усредняли по размерам обработкой в ножевой дробилке «СТДБ-50» с последующим просеиванием. Для варок использовали фракцию частиц, задержанную на сите с отверстиями 1,5 мм и прошедшую через сито с отверстиями 7,0 мм. Соотношение остаточного лубяного волокна и костры находилось в следующем диапазоне: костра – 85…90%, лубяное волокно – 10…15%. Подготовленное сырье промывали холодной водопроводной водой, высушивали до комнатной влажности и анализировали.

Натронные варки костры конопли проводили при следующих условиях: расход NaOH в ед. Na_2O – 18…30% от абсолютно сухого сырья (а.с.с.), гидромодуль – 5:1, продолжительность подъема температуры до варочной – 60 мин, температура варки – 170°С, продолжительность варки – 60 мин. По окончании варки целлюлозу промывали до нейтрального значения pH, сортировали и анализировали [Шерстобитов и др., 2025].

Структурно-морфологические характеристики волокон целлюлозы исследовали на анализаторе Fiber Tester фирмы Lorentzen & Wettre (Швеция). Микроскопические исследования проведены на исследовательском моторизированном микроскопе высокого разрешения «ImagerZ2m Carl Zeiss».

Для изготовления отливок навески целлюлозной массы, полученной из костры конопли, размалывали в мельнице PFI «ZB-PL11» при концентрации 10% до степени помола 35…36 °ШР. Навески макулатуры замачивали на 24 ч в водопроводной воде, после этого размалывали в лабораторной мельнице PFI при концентрации 10% до степени помола 35…36 °ШР.

Из подготовленных волокнистых полуфабрикатов составляли композиции с различным соотношением целлюлозы из костры (К) и макулатурной массы (М). На листоотливном аппарате изготавливали образцы бумаги из расчета массы 1 $м^2$ в 125±6 г.

Обсуждение и результаты исследования. Результаты исследований компонентного состава костры конопли технической представлены в табл. 1.

Из полученных результатов (табл. 1) видно, что по основным компонентам: массовая доля лигнина, целлюлоза и экстрактивных вещества – отходы переработки стеблей конопли технической в виде костры сопоставимы с лиственными породами. Отличием является повышенное содержание зольных веществ, что характерно для недревесного растительного сырья. По компонентному составу результаты анализа костры конопли технической вегетационного периода 2024 г. согласуются с результатами, полученными

при исследовании аналогично подготовленных образцов вегетационного периода 2022 г. [Агеев и др., 2023]. Компонентный состав костры конопли технической подобен древесине, вследствие чего мы использовали расходы активной щелочи, характерные для варки древесины. Результаты варок представлены в табл. 2.

Таблица 1

Компонентный состав растительного сырья

The component composition of vegetable raw materials

Показатели, % от массы а.с.с.	Костра конопли технической	Древесина лиственная [Азаров и др., 2022]	
		береза	осина
Влажность, ГОСТ 16932	7,5±0,5	–	–
Массовая доля экстрактивных веществ, растворимых:			
• в дихлорметане, ГОСТ 6841	2,1±0,5	2,7	0,8
• в горячей воде [Оболенская и др., 1991]	2,9±0,5	2,9	2,8
Массовая доля лигнина, ГОСТ 11960	24,1±0,2	20,1	21,8
Массовая доля золы, ГОСТ 18461	0,9±0,1	0,5	0,3
Массовая доля целлюлозы Кюршнера-Хоффера [Оболенская и др., 1991]	43,0±1,0	42,5	41,8

Таблица 2

Условия и результаты натронных варок костры конопли технической

Conditions and results of natron brews straw of technical cannabis

Показатели	Режим варки		
	1	2	3
Расход NaOH в ед. Na_2O к а.с.с., %	18,0	24,0	30,0
Выход сортированной целлюлозы, % от а.с.с.	59,8	45,4	43,2
Непровар, % от а.с. целлюлозы	18,6	нет	нет
Массовая доля лигнина, % от а.с. целлюлозы	16,1±0,5	10,8±0,2	10,0±0,2
Средняя длина волокон, мм	0,8…1,2		

Анализируя результаты натронных варок, можно сделать следующие выводы:

• при расходе активной щелочи 18% от а.с.с. имеется большое количество непровара (18,6%) при высоком выходе и содержании лигнина 16,1%. Такие показатели характерны для целлюлозы высокого выхода [Непенин, 1990];

• при расходе активной щелочи 24% в целлюлозной массе непровара нет, выход соответствует жесткой сульфатной технической целлюлозе нормального выхода при повышенном содержании лигнина;

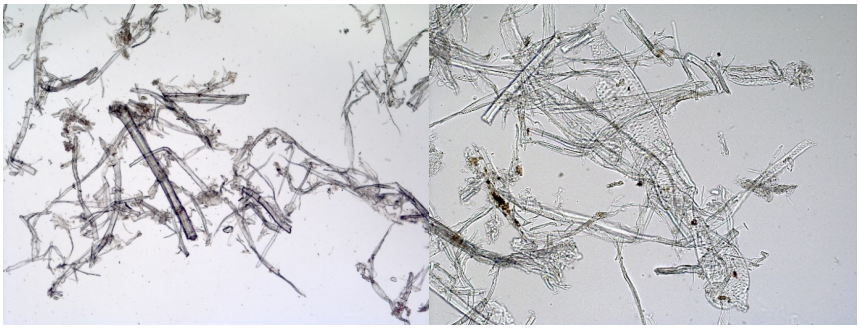
• расход щелочи 30% от а.с.с. приводит к снижению избирательности процесса, следовательно, снижению выхода (43,2%) без изменения динамики удалении лигнина (10,0% от а.с. целлюлозы). В дальнейших исследованиях использовали техническую целлюлозу, полученную по второму режиму варки.

Отличительной особенностью данного вида сырья является длина волокна технической целлюлозы после варки. Если длина лубяного волокна составляет 6…7 мм [Дудорова и др., 2023], костры – 0,46 мм [Агеев и др., 2023], то при наличии в сырье лубяного волокна (до 15%) средняя длина волокна по результатам измерений находится в диапазоне 0,8…1,2 мм.

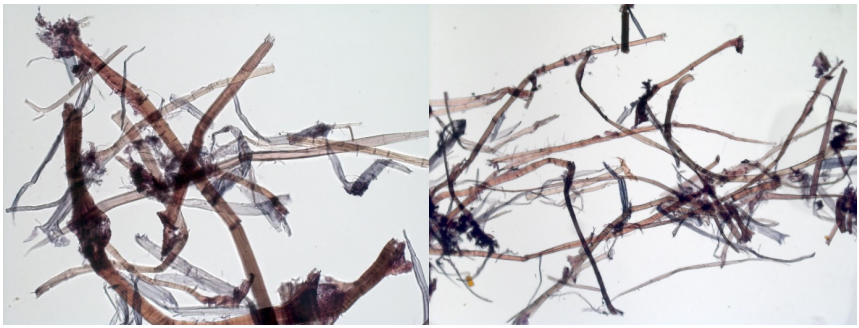
Известно [Диагностические…, 1981], что в стебле растения ксилема выполняет проводящую и механическую функции. Пустотелые трахеи (сосуды) проводят растворы питательных веществ от корня к макушке, а короткие волокна, подобные клеткам либриформа, выполняют механическую функцию. Флоэма, содержащая и живые вытянутые паренхимные клетки, обеспечивает перемещение растворов питательных веществ и продуктов метаболизма и в восходящем, и в нисходящем направлениях. Лубяные волокна выполняют механическую функцию: первичные находятся в перицикле, а вторичные – во флоэме. Основные анатомические элементы технической целлюлозы, полученной по режиму 2, представлены на рис. 1.

На рис. 1a и b представлены волокна целлюлозы в водной среде. Они представлены волокнами типа либриформа, перерезанными лубяными волокнами, вытянутыми паренхимными клетками, мелочью. На рис. 1b представлен широкополостной сосуд с лестничным расположением пор.

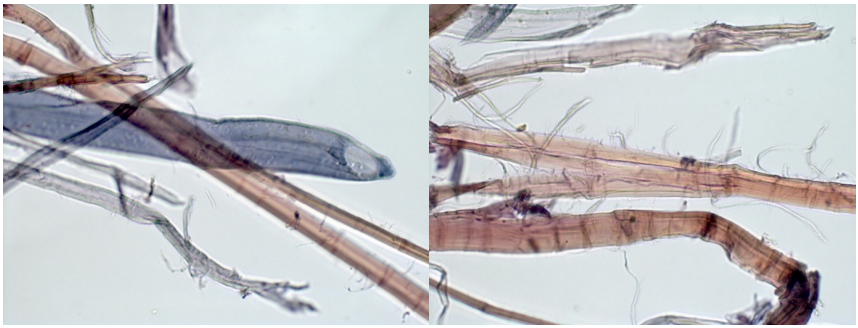
Целлюлозные волокна, окрашенные раствором Зеллегера, имеют разное окрашивание. По цветовым характеристикам они подобны волокнам древесины лиственных пород. В растворе Зеллегера тонкостенные вторичные лубяные волокна, клетки либриформа дают серое окрашивание, сосуды – синее окрашивание (рис. 1c, e). Вторичные лубяные волокна окрашены в коричневый цвет. Поверхность волокон ровная, гладкая, без фибрилляции (рис. 1e, f). Лубяное волокно толстостенное (канал не просматривается), обнаруживаются поперечные сдвиги и продольная шероховатость, что характерно для зрелого волокна (рис. 1f). Волокна перерублены, расщеплены вдоль, встречаются длинные и относительно короткие толстостенные первичные и вторичные лубяные волокна (рис. 1c, d, e, f). Следующий этап – оценка прочностных свойств полученных волокон и бумаги из них.



(a) (b)



(c) (d)



(e) (f)

Рис. 1. Анатомические элементы технической целлюлозы из отходов переработки конопли технической: (a), (b) в воде; (c), (d), (e), (f) окрашенные раствором Зеллегера

Fig. 1. Anatomical elements of technical cellulose from industrial hemp processing waste: (a), (b) in water; (c), (d), (e), (f) stained with Zelleger's solution

В ГОСТ Р 52901-2007 «Картон гофрированный для упаковки продукции. Технические условия» регламентированы номенклатура и значения следующих показателей качества: «Абсолютное сопротивление продавливанию», «Удельное сопротивление разрыву с приложением разрушающего усилия вдоль гофров по линии рилевки после выполнения одного двойного перегиба на 180°», «Сопротивление торцевому сжатию вдоль гофров», «Сопротивление расслаиванию». Однако в литературных источниках отмечается, что в настоящее время актуальными считаются только те показатели, которые характеризуют (определяют) способность гофрированного картона и изготовленных из него ящиков воспринимать деформационные нагрузки, возникающие при штабелировании, т. е. большое значение приобретает жесткость тары.

Так, в частности, в работе [Смолин и др., 2014], в том числе со ссылками на исследования УкрНИИБ, представлены подробные обоснования малозначимости для оценки надежности тарного картона и ящиков из гофрированного картона таких показателей, как «Сопротивление продавливанию», «Удельное сопротивление разрушению по линии рилевки», «Сопротивление расслаиванию гофрированного картона», и предложено в качестве альтернативы для оценки надежности тарного картона и ящиков из гофрированного картона использовать следующие показатели: «Удельное сопротивление разрыву»; «Сопротивление сжатию кольца»; «Сопротивление торцовому сжатию гофрированного образца бумаги».

На основании вышеизложенного в нашей работе для плоских слоев гофрированного картона были определены показатели «Масса 1 м^2» и «Разрушающее усилие при сжатии кольца в поперечном направлении», а для образцов бумаги для гофрирования – «Сопротивление плоскостному сжатию гофрированного образца бумаги», «Удельное сопротивление разрыву в машинном направлении» и «Сопротивление торцовому сжатию гофрированного образца бумаги».

Результаты представлены в табл. 3 и 4.

Видно (табл. 3), что для образцов, состоящих из 100% макулатуры, а также из композиции макулатурной массы с 25% целлюлозы из костры технической не удалось достичь требуемого значения показателя «Разрушающее усилие при сжатии кольца в поперечном направлении» для картона-лайнера с низкой массоёмкостью (125±6 г/м^2) марок К-0 и К-1.

Для композиции с целлюлозой из костры в количестве от 40 до 75%, а также для композиции, состоящей из 100% целлюлозы костры, удалось получить образцы картона, соответствующие требованиям к показателю «Разрушающее усилие при сжатии кольца в поперечном направлении» для марок картона К-0 и К-1.

Таблица 3

Результаты измерений прочностных показателей образцов картона для плоских слоев гофрированного картона

The results of measurements of the strength parameters of cardboard samples for flat layers of corrugated cardboard

Показатели	Требования ГОСТ			Экспериментальные значения					
	ГОСТ Р 53207-2008			100М	75М 25К	60М 40К	50М 50К	25М 75К	100К
	КВС	К-0	К-1						
Масса 1 м^2, г	125±6	125±6	125±7	125	126	125	125	124	125
Разрушающее усилие при сжатии кольца в поперечном направлении, Н, не менее	180	160	150	120	125	155	160	165	170
Влажность, %	8^{+1}_{-2}			7,7	7,4	7,1	7,5	7,9	8,2

Таблица 4

Результаты измерений прочностных показателей образцов бумаги для гофрирования

The results of measurements of strength parameters of paper samples for corrugation

Показатели	Требования ГОСТ				Экспериментальные значения					
	ГОСТ Р 53206-2008				100М	75М 25К	60М 40К	50М 50К	25М 75К	100К
	Б-0	Б-1	Б-2	Б-3						
Масса бумаги площадью 1 м^2, г	125±6				125±6					
Сопротивление плоскостному сжатию гофрированного образца бумаги (СМТзо), Н, не менее, при ширине полоски 15 мм	310	280	230	150	235	240	240	285	320	290
Удельное сопротивление разрыву в машинном направлении, кН/м, не менее	8	8	6	5,5	5,9	7,1	7,5	8,7	8,7	8,8
Сопротивление торцовому сжатию гофрированного образца бумаги ($ССТ_{30}$), кН/м, не менее	1,35	1,15	0,95	0,75	1,13	1,40	1,69	1,76	1,89	2,12
Влажность, %	7^{+2}_{-1}				8,1	7,9	8,0	7,7	8,3	7,5

Очевидно, это обуславливается тем, что волокна костры более жесткие, чем макулатурные волокна, и, соответственно, лучше воспринимают нагрузку на сжатие.

Анализ результатов (табл. 4) показал, что при увеличении содержания в композиции целлюлозы, полученной из костры конопли, прочность бумаги значительно возрастает относительно прочности бумаги из 100% макулатурной массы. Однако было замечено, что увеличение количества целлюлозы из костры конопли свыше 50% не приводит к существенным изменениям значений показателя «Удельное сопротивление разрыву в машинном направлении», а у показателя «Сопротивление плоскостному сжатию гофрированного образца» они начинают снижаться.

Таким образом, лучшими соотношениями в данном эксперименте можно принять 50% макулатуры и 50% целлюлозы из костры конопли (50/50) и 25% макулатуры и 75% целлюлозы из костры конопли (25/75).

Композиция 25/75 по прочности превосходит требования к бумаге марки Б-0, а композиция 50/50 соответствует требованиям к бумаге марки Б-1 и картону для плоских слоев для марок не ниже К-0.

Заключение. С учетом компонентного состава костры конопли технической определены условия щелочной варки и получена жесткая натронная техническая целлюлоза с выходом 45,4% и содержанием лигнина 10,8±0,2%.

Введение в композицию макулатурной массы целлюлозы из костры конопли технической в количестве от 50 до 75% позволяет достичь значений показателей, регламентированных для бумаги для гофрирования марок Б-0 и Б-1, а также картона-лайнера с низкой массоёмкостью марок К-1 и К-0, используемых при изготовлении гофрокартона.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Агеев М.А., *Вураско А.В.*, *Шерстобитов А.Л.*, *Губанов И.А.* Исследование возможности получения тароупаковочных видов бумаги из костры конопли // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: мат. VII межд. науч.-техн. конф. им. профессора В.И. Комарова. Архангельск, 2023. С. 70-75.

Азаров В.И., *Буров А.В.*, *Оболенская А.В.* Химия древесины и синтетических полимеров: учебник. СПб: СПбЛТА, 2022. 624 с.

Албаррам Ф., *Балыбердин К.И.*, *Казаков Я.В.* Свойства сульфатной целлюлозы высокого выхода из ветвей осины как волокнистого полуфабриката для производства компонентов гофрокартона // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 443-457. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.443-457.

Великанова И.В. Производство технической конопли: современное состояние, проблемы и перспективы развития // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. 2024. №7 (113). С. 138-146. DOI: 10.33938/247-138.

Вураско А.В., *Сиваков В.П.* Гофроагрегаты и гофротара: учеб. пособие. Екатеринбург: УГЛТУ, 2025. 140 с.

Диагностические признаки недревесных растительных и химических волокон. М.: Лесная промышленность, 1981. 120 с.

Дудорова А.Ю., *Шестаков Д.И.*, *Вураско А.В.*, *Минакова А.Р.* Перспективы применения волокон конопли технической для получения альфа-целлюлозы // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: мат. XIX Всерос. (нац.) науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. Екатеринбург, 2023. С. 790-794.

Непенин Ю.Н. Технология целлюлозы. В 3 т. Т. 2. Производство сульфатной целлюлозы. М.: Лесная промышленность, 1990. 600 с.

Оболенская А.В., Ельницкая З.П., Леонович А.А. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы. М.: Экология, 1991. 320 с.

Серков В.А., *Смирнов А.А.*, *Александрова М.Р.* История коноплеводства в России // Масличные культуры: научно-технический бюллетень Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур. 2018. Вып. 3 (175). С. 132-141.

Смолин А.С., *Комаров В.И.*, *Дубовый В.К.*, *Белоглазов В.И.* Технология гофрокартона. Ч. I. СПб.: СПбГТУРП, 2014. 46 с.

Смолин А.С., *Дубовый В.К.*, *Комаров В.И.*, *Казаков Я.В.*, *Симонова Е.И.* Технология гофрокартона. СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2025. 412 с.

Судоплатова А.Д. Исследование способности к штабелированию коробок из трехслойного гофрокартона различных марок // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. №12. С. 654-656. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-12-654-656.

Шерстобитов А.Л., *Губанов И.А.*, *Вураско А.В.*, *Кривоногов П.С.* Делигнификация отходов переработки конопли технической с раствором гидроксида натрия // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: мат. XXI Всерос. (нац.) науч.-техн. конф. Екатеринбург, 2025. С. 991-995.

Шипова С.Е., *Алеева С.В.*, *Матрохин А.Ю.* Влияние условий выращивания и первичной обработки технической конопли на ее полимерный состав // Технологии и качество. 2024. №1 (63). С. 20–26. DOI: 10.34216/2587-6147-2024-1-63-20-26.

References

Ageev M.A., *Vurasko A.V.*, *Sherstobitov A.L.*, *Gubanov I.A.* Investigation of the possibility of obtaining taropackage types of paper from hemp bark. *Problems of mechanics of pulp and paper materials*: proc. of the VII int. sci.-tech. conf. named after Professor V.I. Komarov. Arkhangelsk, 2023, pp. 70-75. (In Russ.)

Albarram F., *Balyberdin K.I.*, *Kazakov Ya.V.* Properties of high yield kraft pulp from aspen branches as a fibrous raw material for the production of corrugated cardboard components. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehniceskoj akademii*, 2025, iss. 255, pp. 443–457. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.443-457. (In Russ.)

Azarov V.I., *Burov A.V.*, *Obolenskaya A.V.* Chemistry of wood and synthetic polymers: textbook. St. Petersburg: SPbLTA, 2022. 624 p. (In Russ.)

Diagnostic signs of non-woody plant and chemical fibers. Moscow: Lesnaya promyshlennost, 1981. 120 p. (In Russ.)

Dudorova A.Yu., *Shestakov D.I.*, *Vurasko A.V.*, *Minakova A.R.* Prospects of using technical hemp fibers to produce alpha-cellulose. *Scientific creativity of youth – to the Russian forest complex*: proc. of the XIX All-Russ. (nat.) sci.-tech. conf. of students and PhD students. Yekaterinburg, 2023, pp. 790-794. (In Russ.)

Nepenin Yu.N. Cellulose technology. In 3 vols. Vol. 2: Production of sulphate cellulose. Moscow: Lesnaya promyshlennost, 1990. 596 p. (In Russ.)

Obolenskaya A.V., *Elnitskaya Z.P.*, *Leonovich A.A.* Practical work on the chemistry of wood and cellulose. Moscow: Ekologiya, 1991. 320 p. (In Russ.)

Serkov V.A., *Smirnov A.A.*, *Aleksandrova M.R.* The history of hemp breeding in Russia. *Oilseed crops: scientific and technical bulletin of the All-Russian scientific research institute of oilseeds*, 2018, iss. 3 (175), pp. 132-141. (In Russ.)

Sherstobitov A.L., *Gubanov I.A.*, *Vurasko A.V.*, *Krivonogov P.S.* Delignification of industrial hemp processing waste with sodium hydroxide solution. *Scientific creativity of youth – to the Russian forest complex:* proc. of the XXI All-Russ. (nat.) sci.-tech. conf. Yekaterinburg, 2025. pp. 991-995. (In Russ.)

Shipova S.E., *Aleeva S.V.*, *Matrokhin A.Yu.* Influence of growing conditions and primary processing of technical hemp on its polymer composition. *Technologies and quality*, 2024, no. 1 (63), pp. 20–26. DOI: 10.34216/2587-6147-2024-1-63-20-26. (In Russ.)

Smolin A.S., *Komarov V.I.*, *Dubovy V.K.*, *Beloglazov V.I.* Technology of corrugated cardboard. Part. I. St. Petersburg: SPbGTURP, 2014. 46 p. (In Russ.)

Smolin A.S., *Dubovy V.K.*, *Komarov V.I.*, *Kazakov Ya.V.*, *Simonova E.I.* Technology of corrugated cardboard. St. Petersburg: SPbSTURP, 2025. 412 p. (In Russ.)

Sudoplatova A.D. Investigation of the stacking ability of boxes made of three-layer corrugated cardboard of various brands. *Proceedings of Tula State University. Technical sciences*, 2022, no. 12, pp. 654-656. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-12-654-656. (In Russ.)

Velikanova I.V. Production of technical cannabis: current state, problems and prospects of development. *Economics*, *labor and management in agriculture*, 2024, no. 7(113), pp. 138-146. DOI: 10.33938/247-138. (In Russ.)

Vurasko A.V., *Sivakov V.P.* Corrugated aggregates and corrugated containers: textbook. Yekaterinburg: USLTU, 2025. 140 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 19.02.2026

Вураско А.В., Агеев М.А., Шерстобитов А.Л., Губанов И.А. Изучение влияния добавления натронной целлюлозы из костры конопли в композицию тароупаковочных видов бумаги // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2026. Вып. 259. С. 390–403. DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.390-403

Цель работы – получение образцов тароупаковочных видов бумаги и картона повышенной прочности за счет применения в композиции с макулатурой марки МС-5Б целлюлозы из костры конопли технической. Костра конопли технической по содержанию основных компонентов сопоставима с лиственными породами, но отличается повышенным содержанием золы. Натронные варки костры конопли проводили при следующих условиях: расход NaOH в ед. Na_2O – 18…30% от а.с.с., гидромодуль – 5:1, подъем температуры до варочной, 170ºС – 60 мин, продолжительность варки – 60 мин. При расходе щёлочи 18% NaOH целлюлоза содержит непровар до 18,6%, массовая доля лигнина – 16,1%. При расходе в 24% NaOH непровара нет, выход соответствует жёсткой сульфатной целлюлозе. При расходе щелочи 30% выход снижается до 43,2%. В дальнейших исследованиях использовали целлюлозу, полученную по второму режиму варки. Отличительной особенностью данного вида сырья является длина волокна технической целлюлозы после варки 0,8–1,2 мм при содержании лубяного волокна до 15%. Образцы картона-лайнера (картон для плоских слоев гофрированного картона) из 100% макулатуры и с 25% целлюлозы из костры не достигли требуемого показателя сжатия кольца для марок К‑0 и К‑1. При 40, 75 и 100% костры показатели соответствуют нормам: волокна костры жёстче макулатурных. Анализ результатов измерения физико-механических показателей образцов бумаги для гофрирования показал, что при увеличении доли целлюлозы из костры конопли прочность бумаги растёт, но при превышении ей 50% рост удельного сопротивления разрыву прекращается, а сопротивление плоскостному сжатию снижается. Оптимальные составы – 50% макулатуры + 50% костры (соответствует марке Б‑1 и картону не ниже К‑0) и 25% макулатуры + 75% костры (превосходит требования к марке Б‑0).

Ключевые слова: натронная варка, лигнин, гофрированный картон, картон‑лайнер, бумага для гофрирования, макулатура, целлюлоза из костры конопли, костра конопли.

Vurasko A.V., Ageev M.A., Sherstobitov A.L., Gubanov I.A. Study of the effect of adding sodium cellulose from cannabis straw to the composition of packaging types of paper. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2026, iss. 259, pp. 390–403 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.390-403

The purpose of the work is to obtain samples of packaging types of high-strength paper and cardboard due to the use of cellulose from technical hemp bonfire in a composition with MC-5B waste paper. The technical hemp bonfire is comparable to hardwood in terms of its

main components, but it has a high ash content. Natron cooking of cannabis fires was carried out under the following conditions: consumption of NaOH in units of Na_2O – 18...30% of a.s.s., hydraulic module – 5:1, temperature rise to 170°C – 60 min, cooking time – 60 min. With an alkali consumption of 18% NaOH, cellulose contains up to 18.6% unwanted inclusions, and the mass fraction of lignin is 16.1%. At a consumption of 24% NaOH there is no unwanted inclusions, the yield corresponds to hard sulfate cellulose. With an alkali consumption of 30%, the yield is reduced to 43.2%. In further studies, cellulose obtained by the second cooking mode was used. Cardboard liner samples (cardboard for flat layers of corrugated cardboard) made of 100% waste paper and with 25% cellulose from the bonfire did not reach the required ring compression index for grades K-0 and K-1. At 40, 75 and 100% of the fires, the indicators correspond to the norms: fiber fires are tougher than waste paper. The analysis of the results of measuring the physico-mechanical parameters of paper samples for corrugation was as follows: with an increase in the proportion of pulp from the hemp bonfire, the strength of the paper increases, but over 50% the increase in the specific resistance to rupture stops, and the resistance to planar compression decreases. Optimal compositions – 50% waste paper + 50% bonfires (corresponds to the B-1 brand and cardboard not lower than K-0) and 25% waste paper + 75% bonfires (exceeds the requirements for the B-0 brand).

Keywords: soda cooking, lignin, corrugated cardboard, cardboard liner, corrugated paper, waste paper, pulp from hemp straw, hemp straw.

ВУРАСКО Алеся Валерьевна – профессор кафедры технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров Уральского государственного лесотехнического университета, доктор технических наук.

620100, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: vurasko2010@yandex.ru

VURASKO Alesya V. – DSc (Technical), Professor, Department of Technology of Pulp and Paper Industries and Polymer Processing, Ural State Forest Engineering University.

620100. Siberian tract str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: vurasko2010@yandex.ru

АГЕЕВ Максим Аркадьевич – доцент кафедры технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров Уральского государственного лесотехнического университета, кандидат технических наук.

620100, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: ageevma@m.usfeu.ru

AGEEV Maksim A. – PhD (Technical), Associate Professor, Department Technology of Pulp and Paper Industries and Polymer Processing, Ural State Forest Engineering University.

620100. Siberian tract str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: ageevma@m.usfeu.ru

ШЕРСТОБИТОВ Алексей Леонидович – ассистент кафедры технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров Уральского государственного лесотехнического университета.

620100, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: sherstobitoval@m.usfeu.ru

SHERSTOBITOV Aleksey L. – Assistant, Department of Technologies of Pulp and Paper Production and Polymer Processing, Ural State Forest Engineering University.

620100. Siberian tract str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: sherstobitoval@m.usfeu.ru

ГУБАНОВ Иван Александрович – техник-лаборант кафедры технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров Уральского государственного лесотехнического университета.

620100, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: gubanovia@m.usfeu.ru

GUBANOV Ivan A. – Laboratory Technician, Department of Technologies of Pulp and Paper Production and Polymer Processing, Ural State Forest Engineering University

620100. Siberian tract str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: gubanovia@m.usfeu.ru

УДК 676.16.022.6.034

И.С. Содиков, Н.В. Щербак

ПОЛУЧЕНИЕ И ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ВОЛОКНИСТОГО ПОЛУФАБРИКАТА ИЗ СТЕБЛЕЙ ХЛОПЧАТНИКА НАТРОННЫМ СПОСОБОМ ВАРКИ

Введение. Развитие мировой целлюлозно-бумажной промышленности в последние десятилетия сопровождается ростом экологических и экономических вызовов. Основные из них включают дефицит древесного сырья, увеличение объемов сельскохозяйственных отходов и необходимость минимизации выбросов углерода. В этих условиях особую актуальность приобретает использование альтернативных, возобновляемых источников сырья, таких как стебли хлопчатника [Fahmy et al., 2017]. Ежегодно в мире образуется около 50 млн т стеблей хлопчатника, которые в основном утилизируются сжиганием, что приводит к выбросам парниковых газов. Однако исследования показывают, что благодаря высокому содержанию целлюлозы (до 50%) и низкому содержанию лигнина стебли хлопчатника могут успешно использоваться для производства целлюлозно-бумажной продукции, в том числе упаковочных материалов [Jimenez, Rodríguez, 2010]. Спрос на целлюлозу стабильно высок и продолжает расти, что обусловлено развитием электронной коммерции (рост потребности в упаковке) и тенденциями устойчивого развития (спрос на биоразлагаемые материалы). Объём рынка бумажной упаковки в 2025 г. превысил 403,73 млрд долларов США и, по прогнозам, к 2035 г. достигнет 621,01 млрд долларов США, демонстрируя среднегодовой темп роста около 4,4% в течение прогнозируемого периода (с 2026 по 2035 гг.). Рост мирового потребления бумаги и упаковочных материалов требует увеличения объемов производства целлюлозы, что приводит к интенсивной вырубке лесов [Отчет…, 2025]. Использование стеблей хлопчатника как возобновляемого ресурса позволяет решить проблему дефицита древесного сырья, снизить экологическую нагрузку на окружающую среду и повысить экономическую эффективность производства [Eugenio et al., 2019]. Стебли хлопчатника состоят из коры (22–27%) и древесной части (73–78%) с содержанием целлюлозы до 50%, лигнина около 13–17% и пентозанов 20–25%. По своим свойствам волокна хлопчатника

схожи с древесными волокнами лиственных пород, что делает их подходящими для целлюлозно-бумажного производства [Prakash et al., 2024].

Стебли хлопчатника представляют собой перспективный источник сырья для бумажной промышленности в хлопкопроизводящих странах. Их использование позволяет решить ряд экологических, экономических и социальных проблем, обеспечить переработку сельскохозяйственных отходов и сокращение выбросов углекислого газа. Исследования в этой области подтверждают возможность создания эффективных и экологически устойчивых технологий для переработки стеблей хлопчатника [Tarig et al., 2012; Lami, 2021].

Недревесное сырье, такое как солома, кукурузные и хлопковые стебли, обладает рядом особенностей, влияющих на свойства получаемой целлюлозы. Важнейшими параметрами являются длина волокон, содержание целлюлозы, лигнина и пентозанов, а также наличие минеральных примесей, таких как кремнезем. Исследования показывают, что высокое содержание α-целлюлозы положительно влияет на выход полуфабриката, в то время как лигнин оказывает обратное влияние [Ferdous et al., 2021].

Одним из наиболее распространенных методов варки недревесного сырья является натронный способ, основанный на использовании раствора едкого натрия (NaOH) без добавления сернистых соединений. Данный метод позволяет эффективно отделить лигнин и получить целлюлозосодержащий полуфабрикат. Исследования показывают, что содержание лигнина и гемицеллюлоз в сырье существенно влияет на эффективность варки. Например, у волокнистых материалов с высоким содержанием пентозанов и низким уровнем лигнина выход полуфабриката оказывается выше [Abd El-Sayed et al., 2020; Ferdous et al., 2021].

Выход полуфабриката зависит от химического состава сырья и параметров варки. В исследовании [Ferdous et al., 2021] было выявлено, что содержание α-целлюлозы и холоцеллюлозы (holocellulose) положительно коррелирует с выходом целлюлозы. В то же время содержание лигнина оказывает отрицательное влияние. Так, при натронной варке различных видов недревесного сырья выход полуфабриката варьировался от 30% до 65%, а качество полученной целлюлозы зависело от содержания примесей и степени очистки [Abd El-Sayed et al., 2020].

При этом сохраняются проблемы при переработке недревесного растительного сырья: вариативность химического состава сырья (лигнин/пентозаны/зола), склонность к накипеобразованию из-за кремнезёма, повышенные нагрузки на щелочное восстановление и утилизацию чёрного щёлока, а также необходимость тонкой настройки условий варки для балансировки выхода,

числа Каппа и прочностных показателей. Современные исследования предлагают решения через кислородные стадии, предгидролиз, использование «зелёных» растворителей и оптимизацию реакторов [Lee et al., 2022].

Длина волокон является ключевым параметром, определяющим механические свойства бумаги. Например, исследование показало, что у целлюлозы из недревесного сырья с высокой гибкостью волокон наблюдается улучшенная прочность на разрыв и разрывная длина [Ferdous et al., 2021]. В то же время более толстые стенки волокон могут отрицательно влиять на способность бумаги к формированию прочной структуры.

Использование недревесного сырья в целлюлозно-бумажной промышленности позволяет снизить нагрузку на лесные ресурсы и уменьшить углеродный след производства. Однако необходимо учитывать вопросы сбора и транспортировки сырья, а также эффективную переработку отходов, включая извлечение кремнезема, характерного для некоторых видов недревесного сырья [Abd El-Sayed et al., 2020].

В ходе исследования были проанализированы публикации, посвящённые получению целлюлозы из хлопчатниковых стеблей различного происхождения [Ali, Byrd, 2001; Akgül, Tozlu, 2009; Tarig et al., 2012]. В большинстве работ основное внимание уделяется сортам хлопчатника, произрастающим в Египте, США или Судане [Ali, Byrd, 2001; Akgül, Tozlu, 2009; Tarig et al., 2012]. Отличительной особенностью настоящего исследования является использование узбекского сорта хлопчатника, характерного для агроэкологических условий Республики Узбекистан.

В ряде зарубежных публикаций для оптимизации процесса варки применялись модифицированные методы: сода-антрахиноновый (soda-AQ), сода-аминовый, щелочная этаноловая варка [El-Saied et al., 1984; Ali, Byrd, 2001; Akgül, Tozlu, 2009] – что предполагает дополнительное использование реагентов (AQ, этанол, амин) для повышения выхода целлюлозы и качества волокон. К примеру, при сода-AQ процессе отмечаются более низкие числа Каппа и улучшенные механические свойства, однако возрастает сложность технологии и себестоимость [Ali, Byrd, 2001].

В настоящей работе применён классический натронный способ с использованием только гидроксида натрия, отличающийся простотой. Режимы варки отличались по концентрации NaOH (17-20%), гидромодулю, температуре и длительности варки. В международных источниках чаще исследовались условия с более высокой концентрацией щелочи (до 50%) [Ali, Byrd, 2001; Akgül, Tozlu, 2009], а также с добавлением антрахинона, что позволило получить низкие числа Каппа (9–10), однако выход полуфабриката снижался до 29-33%, требуя дополнительных затрат [Akgül, Tozlu, 2009].

Таким образом, результаты отличаются от ранее опубликованных работ уникальной комбинацией исходного сырья узбекского сорта хлопчатника и применяемых режимов натронной варки, что обеспечивает учёт региональных особенностей и экономическую целесообразность производства целлюлозы [Ali, Byrd, 2001; Akgül, Tozlu, 2009; Tarig et al., 2012].

Следует отметить, что при натронной варке недревесного сырья образуется меньшее количество вредных выбросов по сравнению с сульфитной или крафт-варкой древесины, что повышает экологическую привлекательность данного метода [Морозова, 2018].

Несмотря на многочисленные исследования, остаются нерешёнными ряд вопросов, касающихся оптимизации параметров натронной варки с целью повышения выхода целлюлозы и снижения содержания остаточного лигнина. Отсутствует единая методология оценки влияния анатомических особенностей стеблей хлопчатника разных сортов на эффективность варки. Кроме того, в отечественной литературе наблюдается дефицит свежих публикаций (после 2010 г.) по данной теме, в то время как международные источники предоставляют больше информации по аналогичной переработке рисовой соломы, бамбука [Zhang et al., 2023] и льна, чем по хлопчатнику. В работах зарубежных авторов, например, [Hellstén et al., 2013] упоминаются способы регенерации щёлочи и повторного использования растворов, что в российских источниках представлено фрагментарно. Несмотря на недостаточность изучения вопроса утилизации отработанных щелоков при варке недревесного сырья, в данной работе такая задача не стояла.

Цель данных исследований – установить закономерность и выявить критические значения влияния расхода щелочи при натронной варке на выход и качество целлюлозы и пригодность ее использования в композиции упаковочных бумаг.

Материалы и методика исследования. Исследование волокнистых полуфабрикатов и их получение из стеблей хлопчатника выполнялось на оборудовании Инновационно-технологического центра «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова, г. Архангельск.

В качестве исходного образца использовали стебли хлопчатника (*Gossypium hirsutum* L.), привезенного из Узбекистана, скороспелого сорта С-6524, распространенного в Ташкентской области.

В исследовании использовались неокоренные, предварительно измельченные до 4-5 см длиной стебли хлопчатника. В предыдущих наших работах были представлены данные по сульфатной варке, где установлено, что неокоренные стебли хлопчатника дают снижение выхода целлюлозы после

варки на 20%, а показателей качества полуфабриката на 8-30%, по сравнению с предварительно окоренными стеблями хлопчатника, что обосновано отличием компонентного состава коры, меньшим содержанием в ней целлюлозы и, как следствие, большим количеством непровара и сора [Содиков, Щербак, 2023, 2024]. С учётом полученного низкого уровня сопротивления сжатия кольца сульфатной целлюлозы из стеблей хлопчатника в данных исследованиях было принято решение о проведении натронной варки.

Натронную варку проводили в лабораторном автоклаве при следующем режиме:

- расход NaOH – от 10 до 50% от массы абсолютно сухого сырья;
- гидромодуль – 10:1;
- температура пропитки – 110°С, продолжительность пропитки – 25 мин, конечная температура варки – 155°С, продолжительность стоянки на конечной температуре – 120 мин.

В стеблях хлопчатника определяли содержание целлюлозы по азотно-спиртовому методу (метод Кюршнера) [Оболенская и др., 1991; Kürschner, Hoffer, 1929].

В стеблях и полуфабрикате после варки определяли:

- содержание лигнина, ГОСТ 11960–79;
- содержание экстрактивных веществ, ГОСТ 6841–77;
- зольность, ГОСТ 18461–93;
- влажность, ГОСТ 50316–92.

В полуфабрикате после варки дополнительно определяли выход и число Каппа в соответствии с методикой ISO 302:2004 и соответствующей ей методикой ГОСТ 10070–74.

После варки полуфабрикаты промывали до нейтральной реакции и подвергали размолу с использованием мельницы Йокро; центробежный размалывающий аппарат (ЦРА) стандартизован в соответствии с ISO 5264–3.

Для оценки показателей качества полученную целлюлозу размалывали в ЦРА до достижения степени помола (СП) 30 °ШР. Изготовление лабораторных образцов бумаги массой 100 г/м^2 осуществлялось на листоотливном аппарате «Рапид-Кетен».

Подготовка проб и физико-механические испытания проводились по стандартным методикам в соответствии с требованиями, регламентированными для картона для плоских слоев гофрированного картона по ГОСТ Р 57207–2008 «Картон для плоских слоев гофрированного картона», ГОСТ Р ИСО 9895–2013, ГОСТ 10711-97 «Бумага и картон. Метод определения разрушающего усилия при сжатии кольца (RCT)», ГОСТ Р ИСО 2759–2017

«Картон. Метод определения сопротивления продавливанию», ГОСТ Р ИСО 9895–2013 «Бумага и картон. Определение сопротивления сжатию. Метод испытания на коротком расстоянии между зажимами (SCT)». Перед испытаниями образцы подвергались кондиционированию по ГОСТ Р ИСО 187–2012.

Для определения структурно-морфологических характеристик волокон использовали анализатор Fiber Tester фирмы Lorentzen&Wettre.

Результаты исследования. Был проведён сравнительный анализ компонентного состава стеблей хлопчатника разного происхождения (табл. 1). Данные по стеблям хлопчатника из Египта, США и Китая взяты из открытых источников [Ali, Byrd, 2001].

Таблица 1

Компонентный состав стеблей хлопчатника разного происхождения

The component composition of cotton stalks of different origin

Наименование	Узбекистан	Египет	США	Китай
Экстрактивные вещества, %	1,75	2,93*	3,03*	-
Целлюлоза, %	49,4	48,8	42,2	34,7
Лигнин, %	21,4	22,5	26,9	20,9
Зольность, %	4,6	1,8	1,1	1,9

Примечание: * – спирто-бензольный растворитель [Ali, Byrd, 2001]

Выявлены основные отличия компонентного состава узбекских стеблей хлопчатника: повышенное содержание целлюлозы (49,4%) при меньшем количестве лигнина (21,4%) и экстрактивных веществ (1,75%) по сравнению с египетским, американским и китайским делают стебли хлопчатника узбекского происхождения более пригодными для получения волокнистого полуфабриката для бумаг.

В процессе натронной варки были получены волокнистые полуфабрикаты, отличающиеся по свойствам при варьировании расхода NaOH. Как видно из табл. 2, при увеличении расхода NaOH от 10 до 50% наблюдалось закономерное снижение выхода полуфабриката с 50,2 до 29% и содержания остаточного лигнина с 20,3 до 9,6%, что свидетельствует об эффективной делигнификации.

Коэффициент парной корреляции всех определяемых параметров (за исключением содержания экстрактивных веществ) от расхода щелочи выше по модулю 0,90, что подтверждает высокую достоверность полученных экспериментальных данных.

Таблица 2

Результаты натронной варки стеблей хлопчатника

The results of soda process of cotton stalks

Расход NaOH, %	Выход, %	Непровар, %	Число Каппа, ед.	Экстрактивные,%	Содержание лигнина, %	Зольность, %	Содержание остаточного NaOH, г/л
10	50	10,0	128	0,16	20,3	2,6	1,10
15	46	9,2	116	0,22	19,8	2,3	4,34
17	45	7,7	112	0,13	18,1	2,2	6,40
20	41	4,5	106	0,04	16,2	2,2	6,98
30	34	0,3	81	0,08	13,8	2,2	–*
40	33	0	60	0,10	10,4	2,0	–
50	29	0	60	0,12	9,6	1,8	–
r**	–0,97	–0,91	–0,98	–0,35	–0,98	–0,92	0,98

Примечание: * – не контролировалось вследствие завышенных расходов NaOH на варку; ** – коэффициент парной корреляции при коэффициенте достоверности (p), равном 0,05

Определение компонентного состава полуфабрикатов показало, что увеличение расхода NaOH в диапазоне 17-40% не оказывает значительного влияния на изменение содержания экстрактивных веществ и зольности. При этом общий уровень содержания экстрактивных веществ невысокий, условно принимаемый за постоянный уровень в указанном диапазоне варьирования щелочи, а колебания абсолютных значений можно проигнорировать ввиду эффекта малых чисел.

Исследование структурно-размерных и бумагообразующих свойств волокон (рис. 1, 2, табл. 3, 4) продемонстрировало закономерное снижение средней длины волокон и повышение доли мелочи при увеличении расхода щелочи вследствие повышения деструкции клеточной стенки целлюлозного волокна. Варьирование расхода щелочи в широком диапазоне от 10 до 50% выявило несимбатные закономерности изменения свойств волокна. Так, средняя длина и ширина волокна при повышении расхода NaOH снижаются линейно, в то же время доля мелочи растет нелинейно: резкий прирост мелочи наблюдается при расходе в 20%, дальнейшее повышение расхода NaOH к значимому приросту мелочи не приводит. Анализ данных структурно-размерных показателей волокна позволил установить отличие в поведении среднего индекса излома и грубости волокна. Наблюдаемое резкое изменение их значений при расходе щелочи в 50% свидетельствует о происходящих с клеточной стенкой изменениях, к которым оказались нечувствительны показатели

средней длины и ширина волокна. Данный факт позволяет выдвинуть предположение о недостаточной информативности общепринятых показателей средней длины, ширины волокна и доли мелочи для происходящих в процессах варки изменений клеточной стенки целлюлозы.

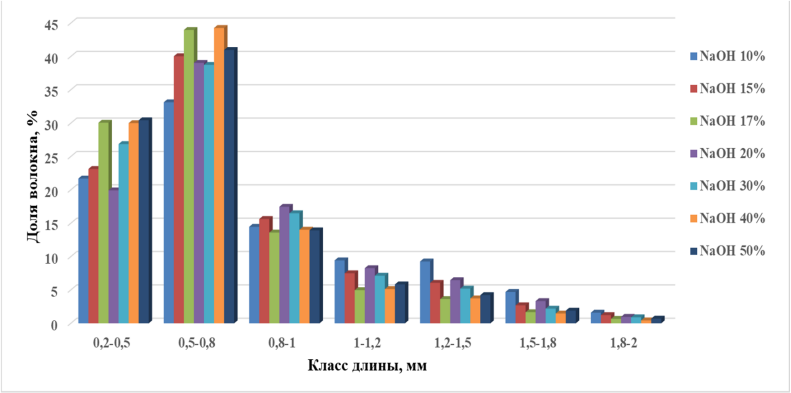


Рис. 1. Влияние расхода NaOH на фракционное распределение по длине волокна до размола

Fig. 1. The effect of NaOH consumption on fractional distribution along the fiber length

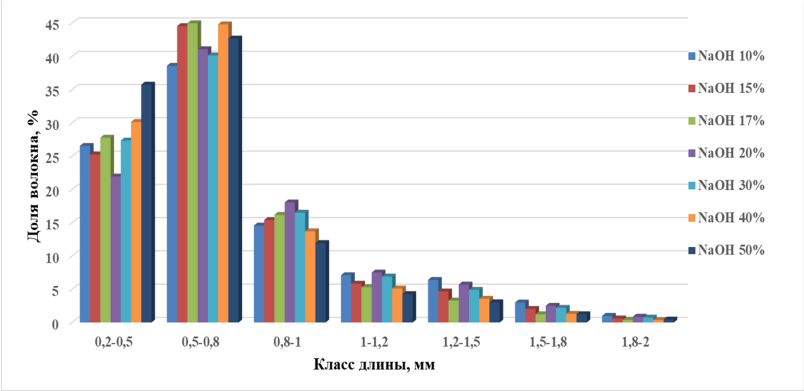


Рис. 2. Влияние расхода NaOH на фракционное распределение по длине волокна после размола СП 30°

Fig. 2. The effect of NaOH consumption on the fractional distribution along the fiber length after refining at 30°

Таблица 3

Исследование структурно-размерных показателей целлюлозных волокон до размола

Investigation of the structural and dimensional parameters of cellulose fibers

Расход NaOH, %	Средняя длина, мм	Средняя ширина, мкм	Средний фактор формы, %	Грубость, мг/м	Средний угол излома, °	Средний индекс излома, °	Средняя длина сегмента, мм	Доля мелочи, %
10	0,93	26,3	88	237	47,6	1,51	0,71	4,2
15	0,82	25,0	89	179	47,6	1,31	0,66	4,4
17	0,86	24,6	89	157	47,7	1,31	0,69	4,3
20	0,79	23,4	90	140	44,5	1,43	0,58	7,2
30	0,77	23,6	88	122	47,9	1,59	0,61	7,5
40	0,68	21,7	89	103	48,0	1,61	0,56	7,6
50	0,72	21,0	87	88	49,5	2,16	0,53	7,8

Таблица 4

Исследование структурно-размерных показателей целлюлозных волокон после размола 30°ШР

Investigation of the structural and dimensional parameters of cellulose fibers after refining to 30°SR

Расход NaOH, %	Средняя длина, мм	Средняя ширина, мкм	Средний фактор формы, %	Грубость, мг/м	Средний угол излома, °	Средний индекс излома, °	Средняя длина сегмента, мм	Доля мелочи, %
10	0,78	24,6	91	120	47,7	0,84	0,70	6,2
15	0,73	23,3	92	102	48,2	0,75	0,66	6,4
17	0,79	23,0	93	130	52,4	0,45	0,75	6,5
20	0,69	22,7	93	129	47,2	0,59	0,66	7,0
30	0,73	21,8	91	102	48,1	0,75	0,68	7,3
40	0,68	20,7	91	82	47,7	1,07	0,63	8,3
50	0,64	19,8	90	81	44,8	1,43	0,55	10,8

Выдвинутое предположение находит подтверждение в изменении структурно-размерных характеристик и после размола. Так, средняя длина, ширина волокна сохраняют тенденцию к снижению, но выравниваются по абсолютным значениям. Аналогичный тренд, но с повышением значений отмечается для доли мелкого волокна. При этом средний индекс излома и

грубость волокна после размола при расходе щелочи в 50% также имеют явные отличия значений, не укладывающиеся в общие тренды изменений.

В то же время фактор формы улучшается по сравнению с исходной целлюлозой после размола до степени помола 30 °ШР, что обусловлено повышенной способностью к набуханию клеточной стенки целлюлозного волокна. При этом уровень значений фактора формы можно считать постоянным независимо от расхода щелочи (табл. 3, 4).

Физико-механические испытания бумаги (табл. 5) показали, что максимальный уровень значений разрывной длины (4830 м), сопротивления продавливанию (328 кПа) и прочности при растяжении (4,77 кН/м) наблюдался при 40% расходе щелочи. Дальнейшее повышение расхода до 50% привело к резкому снижению большинства показателей качества. Это отражает отмеченный ранее тренд по изменению среднего индекса излома и грубости при расходе щелочи в 50%. Учитывая ведущие отраслевые практики, можно выделить удовлетворительный уровень качественных показателей, достигаемый при расходе 17–20% активной щелочи. Построение кривой «напряжение-деформация» (рис. 3) подтвердило полученные закономерности влияния расхода активной щелочи на качественные показатели образцов. Максимальное напряжение до разрушения отмечается при расходе в 40% щелочи, при этом удовлетворительный уровень деформативности (оценивает способность к удлинению) и прочности достигается уже при расходе 17–20%.

Таблица 5

Прочностные характеристики

Strength property

Наименование показателя	Расход активного щелока, %						
	10	15	17	20	30	40	50
Плотность, г/см^3	0,61	0,69	0,71	0,74	0,77	0,80	0,73
Толщина, мкм	159	138	136	134	123	124	133
Сопротивление продавливанию, кПа	154	199	231	253	285	328	242
Сопротивление разрушающему усилию при сжатии кольца, Н	154	156	158	161	160	165	122
Сопротивление сжатию на коротком расстоянии, кН/м	2,63	2,85	2,99	2,85	2,95	3,23	2,98
Разрывная длина, м	3525	4260	4350	4380	4250	4830	3560
Прочность при растяжении, кН/м	3,40	4,09	4,17	4,35	4,03	4,77	3,46
ТЕА, Дж/м^2	25,4	38,4	41,3	45,3	28,2	44,7	18,0
Удлинение, %	1,3	1,5	1,6	1,7	1,6	1,5	0,9

Примечание: ТЕА – энергия, затраченная при растяжении

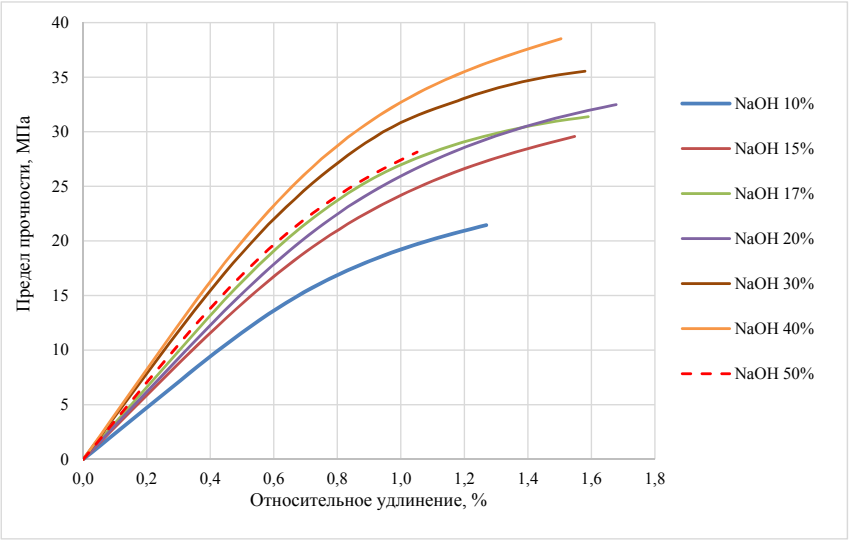


Рис. 3. Зависимости «напряжение–деформация»
Fig. 3. "Stress–strain" relations

Обсуждение. Полученные результаты подтверждают возможность эффективного применения целлюлозы из стеблей хлопчатника, полученной натронной варкой, для производства картона. Варка при расходе NaOH в 17-20% приводит к снижению числа Каппа до 112-106 ед., что, несмотря на его относительно высокое значение, является допустимым для целлюлозных полуфабрикатов, применяемых при производстве упаковочных видов бумаги и картона. Установлено, что в интервале расхода NaOH в 17-20% достигается удовлетворительное сочетание выхода и прочностных характеристик целлюлозы для упаковочных видов бумаги.

Аналогичные значения приведены в исследованиях [Tarig et al., 2012; Fahmy et al., 2017], где целлюлозные полуфабрикаты из стеблей хлопчатника с числом Каппа до 120 демонстрировали удовлетворительные технологические и физико-механические свойства, позволяющие их эффективное использование в производстве упаковочных материалов.

Механические свойства бумаги, полученной из полуфабриката при NaOH 17–20%, соответствуют техническим условиям ведущих производителей тароупаковочных видов бумаги и картона:

- разрывная длина – 4350-4380 м,

- сопротивление продавливанию – 231-253 кПа,
- прочность при растяжении – 4,17-4,35 кН/м,
- SCT и RCT – также в допустимых пределах.

В ряде исследований [Ferdous et al., 2021] подчеркивается, что при производстве картона требуется сбалансированное соотношение прочности и способности к формованию, а также стабильность размеров при повышенной влажности. Образцы, полученные при расходе NaOH в 17%, демонстрируют длину волокна (до 0,69 мм), сопоставимую с длиной лиственных целлюлозных волокон, производимых в промышленных масштабах из эвкалипта, осины, березы. Образующаяся при этих условиях доля мелочи (до 7,2%) также сопоставима с уровнем значений, характерных для производства лиственных пород древесины. Отметим, что мелкое волокно положительно сказывается на образовании структуры и равномерности листа.

Проведенные исследования позволили опровергнуть ранее опубликованные результаты. Так, в работе [Abd El-Sayed et al., 2020] также показано, что при варке недревесного сырья увеличение расхода щелока свыше 20% даёт лишь умеренный прирост качества при снижении выхода на 10-20%.

В результате проведенных авторами исследований, представленных в данной работе, установлено, что применительно к стеблям хлопчатника скороспелого сорта С-6524, распространенного в Ташкентской области, прирост показателей качества при повышении расхода щелочи с 20 до 40% возможен до 22% для сопротивления продавливанию и 9-11% для показателей короткого сжатия и прочности при растяжении. При этом выход целлюлозы снижается на 8%. Это дает возможность направленно регулировать уровень качественных показателей получаемой целлюлозы варьированием расхода щелочи.

Заключение. Проведенные исследования позволили экспериментальным путем установить условия варки волокнистого полуфабриката из стеблей хлопчатника скороспелого сорта С-6524, распространенного в Ташкентской области, с высокими значениями числа Каппа для упаковочных и тароупаковочных бумажно-картонных изделий. Установлено, что целлюлоза, полученная из стеблей хлопчатника при натронной варке с расходом NaOH в 17–20% и продолжительностью варки в течение 2 ч, имеет повышенную жесткость, число Каппа – 106–112 ед. Полученный в данных условиях полуфабрикат имеет среднюю длину волокон 0,69-0,86 мм и долю мелочи 4,4–7,5%, что сопоставимо с показателями полуцеллюлозы из лиственных пород древесины, традиционно применяемых для производства тароупаковочных видов бумаги и картона.

Прочностные показатели лабораторных образцов картона из натронной целлюлозы стеблей хлопчатника: разрывная длина до 4380 м, прочность на продавливание до 253 кПа – соответствуют техническим условиям ведущих производителей тароупаковочных видов бумаги и картона, что подтверждает пригодность ее использования в композиции тароупаковочных бумаг и картонов.

Экспериментально подтверждено положительное влияние расхода каустика при натронной варке на повышение показателей механической прочности целлюлозы. Установлен критический уровень расхода каустика. Максимум приходится на 40%, дальнейшее повышение расхода каустика приводит к резкому снижению всех показателей прочности вследствие чрезмерной деструкции клеточной стенки целлюлозного волокна.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Морозова Н.Ю. Экологические преимущества щелочной варки недревесного сырья // Технология целлюлозы. 2018. № 2. С. 21–25.

Оболенская А.В., *Ельницкая З.П.*, *Леонович А.А.* Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы. М.: Экология, 1991. 320 с.

Отчет о размере, доле и прогнозе рынка бумажной упаковки до 2035 г. // Research Nester. 2025. URL: https://www.researchnester.com/ru/reports/paper-packaging-market/6141 (дата обращения: 16.11.2025).

Содиков И.С, *Щербак Н.В.* Получение волокнистого полуфабриката из стеблей хлопчатника для упаковочных видов бумаг // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: мат. VII межд. науч.-техн. конф. имени профессора В.И. Комарова. Архангельск, 2023. С. 286–289.

Содиков И.С., *Щербак Н.В.* Влияние расхода активной щелочи на изменение качественных показателей сульфатной целлюлозы из стеблей хлопчатника // Ломоносовские научные чтения студентов, аспирантов и молодых ученых-2024: мат. конф. Архангельск, 2024. С. 616-618.

Abd El-Sayed E., *El-Sakhawy M.*, *Sakhawy M.* Non-wood fibers as raw material for pulp and paper industry // Nordic Pulp & Paper Research Journal. 2020. Vol. 35. P. 1–10. DOI: 10.1515/npprj-2019-0064.

Akgül M., *Tozlu A.* Comparison of soda and soda-AQ pulps from cotton stalks // Bioresource Technology. 2009. Vol. 100, no. 24. P. 6680–6684.

Ali M., *Byrd M.* Soda-AQ pulping of cotton stalks // Pulping Conference. Proceedings of the Technical Association of the Pulp and Paper Industry. 2001. P. 1–5.

El-Saied H., *Nada A.M.A.*, *El-Ashmawy A.E.* Soda-anthraquinone pulping of whole cotton stalks // Holzforschung. 1984. Bd. 38, h. 3. S. 167–170. DOI: 10.1515/hfsg.1984.38.3.167.

Eugenio M.E., *Ibarra D.*, *Martín-Sampedro R.*, *Espinosa E.*, *Bascón I.*, *Rodríguez A.* Alternative raw materials for pulp and paper production in the concept of a lignocellulosic biorefinery // Cellulose. 2019. P. 1-26. DOI: 10.5772/intechopen.90041.

Fahmy Y., *Fahmy T.Y.A.*, *Mobarak F.*, *El-Sakhawy M.*, *Fadl M.H.* Agricultural residues (wastes) for manufacture of paper, board, and miscellaneous products: Background overview and future prospects // International Journal of ChemTech Research. 2017. Vol. 10, no. 2. P. 424–448.

Ferdous T., *Ni Y.*, *Quaiyyum M.*, *Uddin M.*, *Jahan M.* Non-wood fibers: Relationships of fiber properties with pulp properties // ACS Omega. 2021. Vol. 6, iss. 33. P. 21613–21622. DOI: 10.1021/acsomega.1c02933.

Hellstén S., *Lahti J.*, *Heinonen J.*, *Kallioinen M.* Purification process for recovering hydroxy acids from soda black liquor // Chemical Engineering Research and Design. 2013. Vol. 91, no. 12. P. 2765–2774. DOI: 10.1016/j.cherd.2013.06.001.

Jiménez L., *Rodríguez A.* Valorization of agricultural residues by fractionation of their components // The Open Agricultural Journal. 2010. Vol. 4. P. 125–134. DOI: 10.2174/1874331501004010125.

Kürschner K., *Hoffer A.* Ein neues Verfahren zur Bestimmung der Cellulose in Hölzern und Zellstoffen // Tech. Chem. Pap. Zellst. Fabr. 1929. No. 26. S. 125–129.

Lami A.E. Pulp production from cotton stalks // Journal of Textile Engineering & Fashion Technology. 2021. Vol. 3, no. 1. P. 23–28. DOI: 10.33140/JTEFT.03.01.01.

Lee T.-J., *Gwon J.-G.*, *Youe W.-J.*, *Oh Y.*, *Ahn B.-J.*, *Seo J.-H.* Effect of soda-ethanol cooking with caustic extraction prior to bleaching on the properties of hardwood pulp // BioResources. 2022. Vol. 17, no. 2. P. 2884–2895. DOI: 10.15376/biores.17.2.2884-2895.

Prakash S., *Radha R.*, *Sharma K.*, *Dhumal S.*, *Senapathy M.*, *Deshmukh V.*, *Kumar M.*, *Anitha T.*, *Balamurugan V.*, *Pandiselvam R.*, *Kumar M.* Unlocking the potential of cotton stalk as a renewable source of cellulose: A review on advancements and emerging applications // International Journal of Biological Macromolecules. 2024. Vol. 261. Art. no. 129456. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.129456.

Tarig K., *Omer S.*, *Taha O.*, *Shomeina S.* Suitability of Sudanese cotton stalks for alkaline pulping with additives // Iranica Journal of Energy and Environment. 2012. Vol. 3, no. 2. P. 167-172.

Zhang Y., *Xu Y.*, *Pei Y.*, *Yin X.* Green liquor desilication via black liquor combustion process for bamboo pulping // BioResources. 2023. Vol. 18, no. 1. P. 733–747. DOI: 10.15376/biores.18.1.733-747.

References

Abd El-Sayed E., *El-Sakhawy M.*, *Sakhawy M.* Non-wood fibers as raw material for pulp and paper industry. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 2020, vol. 35, pp. 1–10. DOI: 10.1515/npprj-2019-0064.

Akgül M., *Tozlu A.* Comparison of soda and soda-AQ pulps from cotton stalks. *Bioresource Technology*, 2009, vol. 100, no. 24, pp. 6680–6684.

Ali M., *Byrd M.* Soda-AQ pulping of cotton stalks. *Pulping Conference. Proceedings of the Technical Association of the Pulp and Paper Industry*, 2001, pp. 1–5.

El-Saied H., *Nada A.M.A.*, *El-Ashmawy A.E.* Soda-anthraquinone pulping of whole cotton stalks. *Holzforschung*, 1984, bd. 38, h. 3, ss. 167–170. DOI: 10.1515/hfsg.1984.38.3.167.

Eugenio M.E., *Ibarra D.*, *Martín-Sampedro R.*, *Espinosa E.*, *Bascón I.*, *Rodríguez A.* Alternative raw materials for pulp and paper production in the concept of a lignocellulosic biorefinery. *Cellulose*. 2019, pp. 1-26. DOI: 10.5772/intechopen.90041.

Fahmy Y., *Fahmy T.Y.A.*, *Mobarak F.*, *El-Sakhawy M.*, *Fadl M.H.* Agricultural residues (wastes) for manufacture of paper, board, and miscellaneous products: Background overview and future prospects. *International Journal of ChemTech Research*, 2017, vol. 10, no. 2, pp. 424–448.

Ferdous T., *Ni Y.*, *Quaiyyum M.*, *Uddin M.*, *Jahan M.* Non-wood fibers: Relationships of fiber properties with pulp properties. *ACS Omega*, 2021, vol. 6, iss. 33, pp. 21613–21622. DOI: 10.1021/acsomega.1c02933.

Hellstén S., *Lahti J.*, *Heinonen J.*, *Kallioinen M.* Purification process for recovering hydroxy acids from soda black liquor. *Chemical Engineering Research and Design*, 2013, vol. 91, no. 12, pp. 2765–2774. DOI: 10.1016/j.cherd.2013.06.001.

Jiménez L., *Rodríguez A.* Valorization of agricultural residues by fractionation of their components. The Open Agricultural Journal. 2010, vol. 4, pp. 125–134. DOI: 10.2174/1874331501004010125.

Kürschner K., *Hoffer A.* Ein neues Verfahren zur Bestimmung der Cellulose in Hölzern und Zellstoffen. *Tech. Chem. Pap. Zellst. Fabr.*, 1929, no. 26, ss. 125–129.

Lami A.E. Pulp production from cotton stalks. *Journal of Textile Engineering & Fashion Technology*, 2021, vol. 3, no. 1, pp. 23–28. DOI: 10.33140/JTEFT.03.01.01.

Lee T.-J., *Gwon J.-G.*, *Youe W.-J.*, *Oh Y.*, *Ahn B.-J.*, *Seo J.-H.* Effect of soda-ethanol cooking with caustic extraction prior to bleaching on the properties of hardwood pulp. *BioResources*, 2022, vol. 17, no. 2, pp. 2884–2895. DOI: 10.15376/biores.17.2.2884-2895.

Morozova N.Yu. Environmental advantages of alkaline pulping of non-wood raw materials. *Pulp Technology*, 2018, no. 2, pp. 21–25. (In Russ.)

Obolenskaya A.V., *Elnitskaya Z.P.*, *Leonovich A.A.* Laboratory works on chemistry of wood and cellulose. Moscow: Ekologiya, 1991. 320 p. (In Russ.)

Prakash S., *Radha R.*, *Sharma K.*, *Dhumal S.*, *Senapathy M.*, *Deshmukh V.*, *Kumar M.*, *Anitha T.*, *Balamurugan V.*, *Pandiselvam R.*, *Kumar M.* Unlocking the potential of cotton stalk as a renewable source of cellulose: A review on advancements and emerging applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, vol. 261, art. no. 129456. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.129456.

Report on the size, share and forecast of the paper packaging market until 2035. *Research Nester*. 2025. URL: https://www.researchnester.com/ru/reports/paper-packaging-market/6141(accessed November 16, 2025). (In Russ.)

Sodikov I.S., *Shcherbak N.V*. Obtaining a fibrous semi-finished product from cotton stalks for packaging types of papers. *Problems of mechanics of pulp and paper materials*: proc. of the VII int. sci.-tech. conf. named after Professor V.I. Komarov. Arkhangelsk, 2023, pp. 286-289. (In Russ.)

Sodikov I.S., *Shcherbak N.V*. The effect of active alkali consumption on changes in the quality parameters of sulfate cellulose from cotton stalks. *Lomonosov Scientific readings for students*, *postgraduates and young scientists-2024*: mat. of the conf. Arkhangelsk, 2024, pp. 616-618. (In Russ.)

Tarig K., *Omer S*., *Taha O*., *Shomeina S.* Suitability of Sudanese cotton stalks for alkaline pulping with additives. *Iranica Journal of Energy and Environment*, 2012, vol. 3, no. 2, pp. 167-172.

Zhang Y., *Xu Y*., *Pei Y*., *Yin X.* Green liquor desilication via black liquor combustion process for bamboo pulping. *BioResources*, 2023, vol. 18, no. 1, pp. 733–747. DOI: 10.15376/biores.18.1.733-747.

Материал поступил в редакцию 24.10.2025

Содиков И.С., Щербак Н.В. Получение и изучение свойств волокнистого полуфабриката из стеблей хлопчатника натронным способом варки // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2026. Вып. 259. С. 404–421. DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.404-421

В статье рассматривается возможность получения волокнистого полуфабриката из стеблей хлопчатника узбекского происхождения сорта С-6524 натронным способом варки. Установлено влияние расхода гидроксида натрия на выход, компонентный состав и физико-механические свойства целлюлозы. В качестве сырья использованы неокоренные стебли хлопчатника, предварительно измельченные до 4–5 см длиной, с содержанием целлюлозы 49,4%, лигнина 21,4% и зольностью 4,6%. Варку проводили при расходе NaOH в 10–50%, гидромодуле 10:1, температуре 155 °С и продолжительности 120 мин. Установлено, что увеличение расхода щелочи приводит к снижению выхода полуфабриката с 50 до 29% и уменьшению содержания остаточного лигнина с 20,3 до 9,6%. Показано, что в диапазоне 17-40% содержание экстрактивных веществ и зольность изменяются незначительно. Выявлено снижение средней длины и ширины волокон и рост доли мелочи при увеличении расхода щелочи, а также изменение показателей, характеризующих состояние клеточной стенки. Максимальные прочностные характеристики бумаги достигаются при расходе NaOH в 40%, однако при 50% наблюдается их резкое снижение вследствие деструкции волокон. Установлено, что при расходе щелочи в 17-20% механические свойства бумаги,

полученной из полуфабриката, соответствуют техническим условиям ведущих производителей тароупаковочных видов бумаги и картона. Данный факт подтверждается экспериментальными значениями физико-механических характеристик качества: разрывная длина – 4350–4380 м, сопротивление продавливанию – 231–253 кПа, прочность при растяжении – 4,17–4,35 кН/м, SCT и RCT – также в допустимых пределах. Практическая значимость результатов заключается в возможности использования стеблей узбекского хлопчатника для производства упаковочного картона.

Ключевые слова: натронная варка, стебли хлопчатника, целлюлоза, упаковочный картон, картон-лайнер.

Sodikov I.S., Shcherbak N.V. Obtaining and studying the properties of a fibrous semi-finished product from cotton stems using the soda cooking method. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2026, iss. 259, pp. 404–421 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.404-421

The article examines the possibility of obtaining a fibrous semi-finished product from cotton stalks of Uzbek origin (variety S-6524) using the soda pulping process. The effect of sodium hydroxide consumption on pulp yield, chemical composition, and physical and mechanical properties is established. The raw material consisted of unbarked cotton stalks, pre-cut to 4–5 cm, with a cellulose content of 49.4%, lignin 21.4%, and ash content 4.6%. Pulping was carried out at a NaOH charge of 10-50%, a liquor-to-solid ratio of 10:1, a temperature of 155 °C, and a cooking time of 120 minutes. Increasing alkali consumption leads to a decrease in pulp yield from 50 to 29% and a reduction in residual lignin from 20.3 to 9.6%. In the range of 17-40%, the content of extractives and ash changes insignificantly. A decrease in fiber length and width and an increase in fines content are observed with increasing alkali consumption. Maximum strength properties are achieved at a NaOH charge of 40%, while at 50% a sharp decrease occurs due to fiber degradation. At 17-20% NaOH, the pulp provides a balance of yield and strength properties. The obtained paper demonstrates tensile length 4350–4380 m, bursting strength 231–253 kPa, and tensile strength 4.17–4.35 kN/m. The results confirm the suitability of cotton stalks for packaging board production.

Keywords: soda cooking, cotton stalks, cellulose, packaging cardboard, liner cardboard.

СОДИКОВ Исмоил Сайфутдин угли – аспирант Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова. SPIN-код: 9971-7190. ORCID: 0000-0002-2537-360X.

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: sodikovismoil@gmail.com

SODIKOV Ismoil S. – PhD student, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. SPIN-code: 9971-7190. ORCID: 0000-0002-2537-360X.

163002. Severnoy Dviny emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: sodikovismoil@gmail.com

ЩЕРБАК Наталья Владимировна – заведующий кафедрой целлюлозно-бумажных и лесохимических производств Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова, кандидат технических наук, доцент. SPIN-код: 7249-8934. ORCID: 0000-0002-7383-3826.

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: n.sisoeva@narfu.ru

SHCHERBAK Natalia V. – PhD (Technical), Head of the Department of Pulp & Paper and Forest Chemical Processing, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Associate Professor. SPIN-code: 7249-8934. ORCID: 0000-0002-7383-3826.

163002. Severnoy Dviny emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: n.sisoeva@narfu.ru

УДК 547.992.3

Э.И. Евстигнеев

ДОСТИЖЕНИЯ И ПРОБЛЕМЫ ХИМИИ ЛИГНИНА (ОБЗОР)

Введение. Лигнин – второй по распространенности на Земле биополимер после целлюлозы. Он был и остается постоянным объектом фундаментальных и прикладных исследований, начиная с 1813 г., когда швейцарский ботаник де Кандоль впервые выделил вещество, позднее названное лигнином.

В соответствии с существующими представлениями предшественники лигнина образуются в ходе последовательных превращений шикимовой кислоты до коричной кислоты и далее до кислот фенилпропанового ряда, которые в ходе ферментативных реакций превращаются в соответствующие альдегиды, а те уже восстанавливаются до, собственно, монолигнолов (рис. 1).

В связи с развитием методов исследования, включая использование методов генной инженерии, за последние годы наблюдается определенная эволюция взглядов на биосинтез и строение лигнина. Так, исследование лигнинов, выделенных из трансгенных и мутантных деревьев, а также травянистых растений, показало, что помимо канонических монолигнолов (кониферилового, синапового и кумарового спиртов), в биосинтезе лигнина могут участвовать и другие соединения (рис. 2).

Как оказалось, биосинтез монолигнолов очень пластичен, что позволяет растениям заменять монолигнолы, когда функционирование одного или нескольких генов нарушено, так что состав и количество лигнина часто одновременно изменяются. Например, подавление одного из генов у гибридного тополя привело к снижению содержания лигнина на 60%, а также сдвигу биосинтеза в сторону образования гидроксифенилпропановых единиц. По существу, любые совместимые фенольные соединения, присутствующие в месте полимеризации в клеточной стенке, являются «кандидатами» на радикальный перенос, радикально-радикальное связывание и полимеризацию лигнина.

Образование макромолекул лигнина из монолигнолов предшественников в настоящее время рассматривают как дегидрогенизационную

полимеризацию под действием пероксидаз, лакказ и пероксида водорода. На рис. 3 показано образование стабилизированного резонансом феноксильного радикала из конифирилового спирта по реакции одноэлектронного переноса.

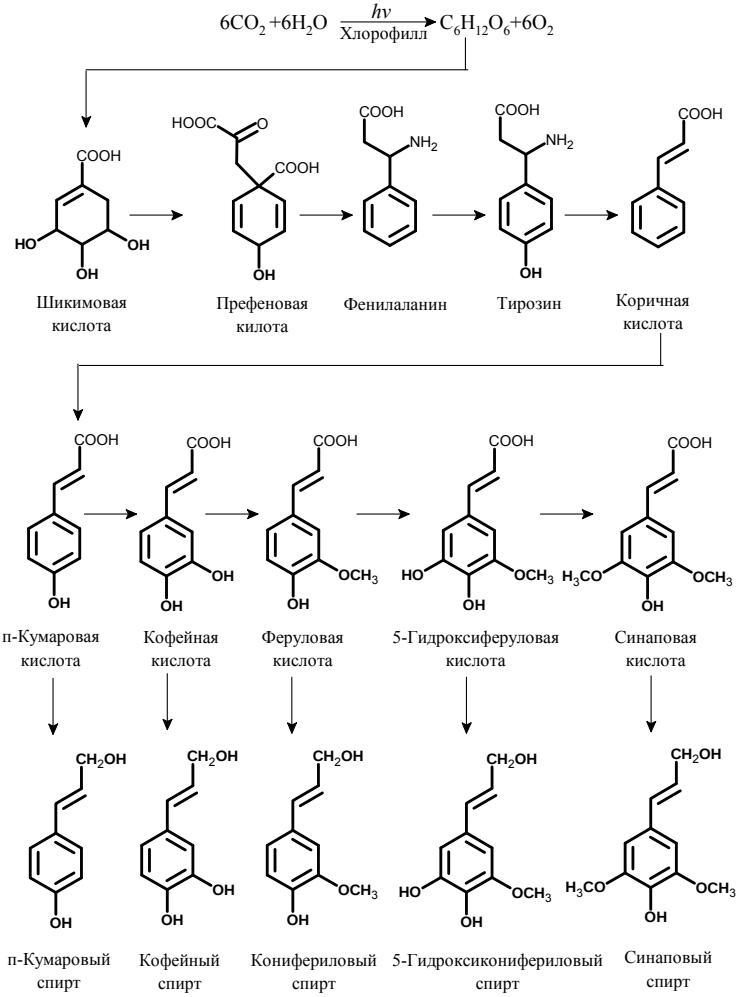


Рис. 1. Упрощенная схема биосинтеза монолигнолов [Фенгел, Вегенер, 1988]
Fig. 1. Simplified scheme of biosynthesis of monolignols

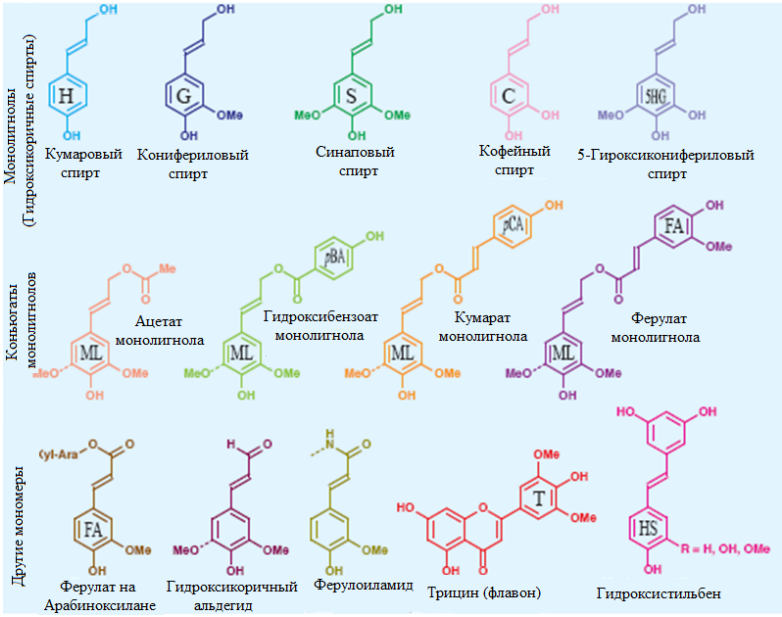


Рис. 2. Канонические монолигнолы и другие соединения, способные участвовать в биосинтезе лигнина [Ralph et al., 2019]

Fig. 2. Canonical monolignols and other compounds able to participate in the lignin biosynthesis [Ralph et al., 2019]

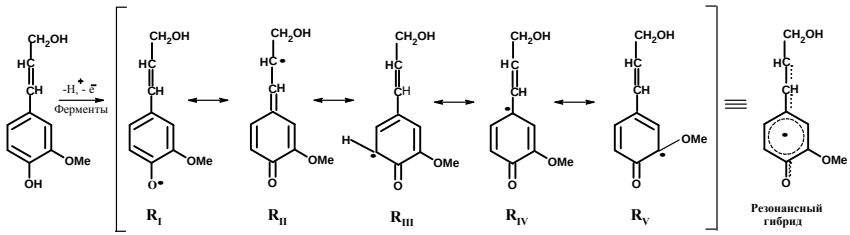


Рис. 3. Образование резонансно-стабилизированного феноксильного радикала из конифирилового спирта [Фенгел, Вегенер, 1988]

Fig. 3. Formation of resonance-stabilized phenoxyl radical from coniferyl alcohol [Фенгел, Вегенер, 1988]

Частота участия в реакциях рекомбинации различных положений фенилпропановых единиц (ФПЕ) зависит от относительного распределения

спиновой электронной плотности и вклада резонансных структур в резонансный гибрид. На основании квантово-химических расчетов резонансные структуры феноксильного радикала по частоте участия в реакциях рекомбинации можно расположить в следующий ряд:

$$R_I > R_{II} > R_{III} > R_{IV}.$$

В соответствии с этим рядом преимущественно будут образовываться связи β–O–4 – основной вид связей в лигнине, а также связи β–5 и β–β. Кроме них, будут образовываться и другие связи за счет различных сочетаний резонансных структур феноксильного радикала (табл. 1) Процесс, по существу, является комбинаторным, возможны все доступные способы сочетания, но они не равновероятны.

Таблица 1

Основные способы сочетания резонансных структур феноксильного радикала [Фенгел, Вегенер, 1988]

Basic methods of combining resonance structures of phenoxyl radical [Фенгел, Вегенер, 1988]

Способ сочетания	Образующаяся связь	Способ сочетания	Образующаяся связь
$R_I + R_I$	Неустойчивый пероксид	$R_{II} + R_{III}$	β–5
$R_I + R_{II}$	β–O–4	$R_{II} + R_{IV}$	β–1
$R_I + R_{III}$	4–O–5	$R_{III} + R_{III}$	5–5
$R_I + R_{IV}$	4–O–1	$R_{III} + R_{IV}$	5–1
$R_{II} + R_{II}$	β–β	$R_{IV} + R_{IV}$	1–1

В силу особенностей процесса биосинтеза, лигнин отличается разнообразием типов связей между фенилпропановыми единицами ФПЕ (рис. 4). В клетке ведется тщательный контроль за подачей монолигнолов и условиями полимеризации. Однако этот контроль не следует путать с контролем сборки полимера лигнина. Реальная структура макромолекулы лигнина контролируется только вовлеченными химическими реакциями, наличием доступных мономеров, способностью генерировать радикалы и условиями в клеточной стенке. На сегодняшний день нет убедительных доказательств какого-либо контроля над первичной структурой лигнина с помощью организованного процесса сборки.

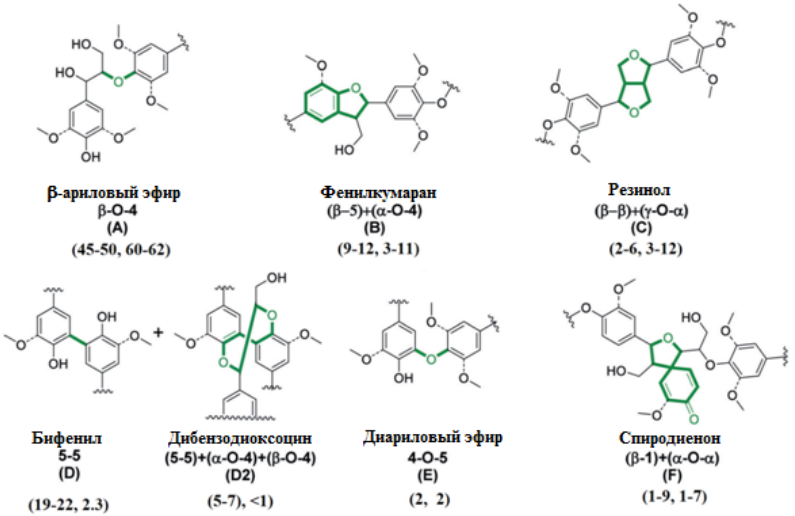


Рис. 4. Типы связей в лигнине [Rinaldi et al., 2016]. Для структуры **D** данные взяты из работ [Sakakibara, 1991; Nimz, 1995]. В скобках – содержание связей, соответственно, в хвойном и лиственном лигнине (n/100 ФПЕ)

Fig. 4. Binding motifs between phenylpropane units in lignin [Rinaldi et al., 2016]. Data for structure **D** were taken from [Sakakibara, 1991; Nimz, 1995]. alues in parentheses are the number of bonds in coniferous and hardwood lignin, respectively (n/100 PPU)

Комбинаторный характер процесса биосинтеза приводит к тому, что лигнин не является индивидуальным соединением, а представляет собой смесь соединений родственного строения. Поэтому его структуру отражают с помощью схем, а не структурных формул, используемых при описании целлюлозы, белков и других биополимеров. На сегодняшний день, вероятно, наиболее полно согласуется с известными данными о строении лигнина схема, предложенная [Balakshin et al., 2020] (рис. 5). Молекулярные массы и полидисперсность выделенных препаратов лигнина приведены в табл. 2, содержание функциональных групп – в табл. 3.

В сочетании с вышеприведенной схемой на рис. 5 эти данные показывают, что лигнин представляет собой полифункциональный, полидисперсный, нерегулярный гетерополимер. Топологическая структура лигнина остается предметом дискуссий: его рассматривают и как линейный (рис. 6), и как разветвленный (рис. 7), и как поперечно связанный полимер. По мнению [Balakshin et al., 2020], макромолекула лигнина является значительно разветвленной и поперечно связанной.

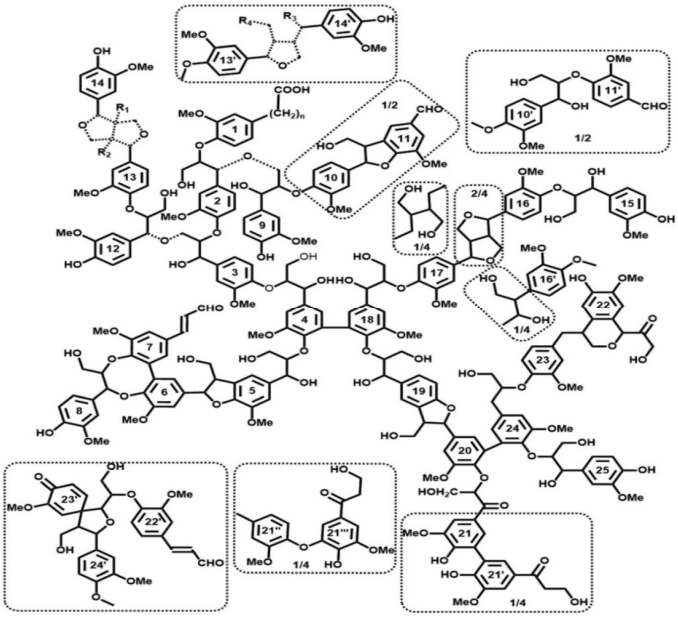


Рис. 5. Схема строения лигнина [Balakshin et al., 2020]
Fig. 5. Scheme of lignin structure [Balakshin et al., 2020]

Таблица 2

Молекулярные массы и полидисперсность (D) препаратов лигнина, выделенных из древесины и другого растительного сырья по методу Бьеркмана [Tolbert et al., 2014]

Average molecular weights and polydispersity from milled wood lignin of various biomasses [Tolbert et al., 2014]

Источник лигнина	$\bar{M}_n$	$\bar{M}_w$	D
Ель	6400	23500	3,7
Пихта Дугласа	2500	7400	3,0
Красное дерево	2400	5900	2,5
Пихта одноцветная	2800	8300	3,0
Эвкалипт	2600	6700	2,6
Сосна	4700	14900	3,2

Таблица 3

Содержание функциональных групп и связей в лигнине Бьеркмана у ели (в расчете на 100 ФПЕ) [Sakakibara, 1991]

Types of bonds and functional groups in mill wood lignin of spruce [Sakakibara, 1991]

Типы функциональных групп и связей	Содер-жание	Типы функциональных групп и связей	Содер-жание
Алифатические ОН	93-109	α-О-γ (открытые)	6
п-Гидроксибензильные ОН	5-6	β-О-4	49-51
п-Алкоксибензильные ОН	10-15	β-5	9-14
Фенольные ОН	26-33	фенилкумарановые	11
Карбонильные общие	20	нециклические	3
α С=О	6-7	β-6, β-2	2.5-3
Несопряженные С=О	10	β-β	13
Ar-CH=CH-CHO	3-4	пинорезинольные	2-10
Ar-CH=CH-CH_2OH	3	β-1	2-15
Ar-CHOH-CHOH-CH_2OH	2	5-5, 5-6	19-22
Ar-C-C-CH_3	4	4-О-5, 4-О-1	7-8
α-О-4 (открытые)	6-13	Конденсированные единицы	45-50
п-Гидроксибензиларил- эфирные (открытые)	2-4		
п-Алкоксибензиларил-эфирные (открытые)	5-9		

По моему мнению, имеется несколько причин таких различий во взглядах. Очевидно, что любой выделенный препарат лигнина представляет собой продукты деструкции природного лигнина (лигнина в древесине), которые в сумме составляют только его часть. Так, выход лигнина механического размола (ЛМР) ели, считающегося наиболее близким к природному, составляет 25-30% от лигнина в древесине, выход лигнина Пеппера – 37,8%, а выход лигнина Фрейденберга – 80%.

Кроме того, в зависимости от метода и условий выделения природный лигнин в той или иной степени подвергается механической и химической деструкции. О степени деструкции свидетельствует содержание основных связей между ФПЕ лигнина, связей алкил-О-арил (сумма связей α-О-4 и β-О-4) (табл.4).

Можно заметить, что по сравнению с природным лигнином среди мягковыделенных препаратов в наибольшей степени деструктирован лигнин

Пеппера, а наиболее близким к природному является лигнин Фрейденберга. В сочетании с данными о выходе указанных препаратов полученные сведения вызывают вопрос, в какой степени они отражают природный лигнин, в том числе и пространственную структуру молекул.

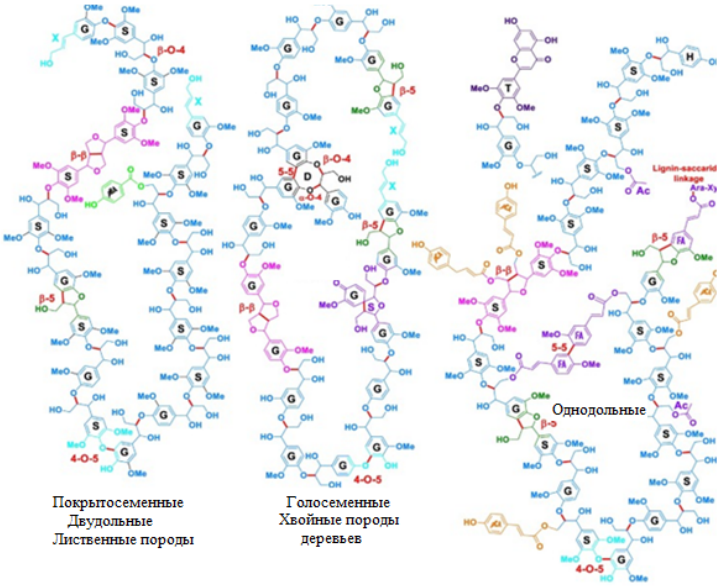


Рис. 6. Схема строения лигнина [Ralph et al., 2019]
Fig. 6. Scheme of lignin structure [Ralph et al., 2019]

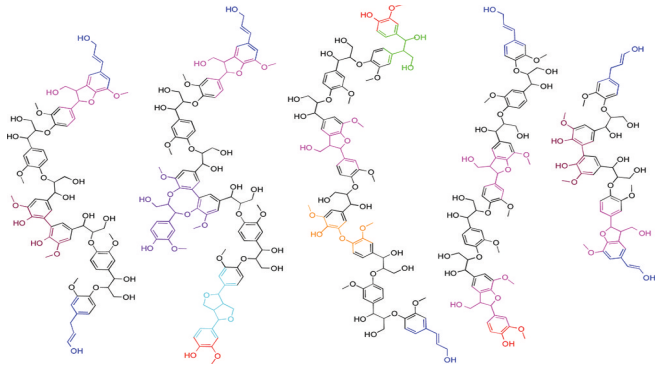


Рис. 7. Схема строения лигнина [Crestini et al., 2011]
Fig. 7. Scheme of lignin structure [Crestini et al., 2011]

Таблица 4

Содержание фенольных гидроксилов и связей алкил-О-арил в препаратах лигнина ели [Evstigneyev et al., 2017]

Contents of phenolic hydroxyl groups and Alkyl-O-Aryl bonds in spruce lignin preparations [Evstigneyev et al., 2017]

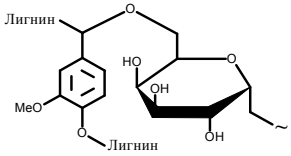
Препарат лигнина	$OH_{фен}$		Связи алкил-О-арил		
	ммоль/г	n/100 ФПЕ	ммоль/г	n/100 ФПЕ	n/100 Ar(ЯМР)
Природный лигнин	0,73	13	4,34	79	–
Лигнин Фрейденберга	1,18	22±4	3,89	71	–
Лигнин Бьеркмана	1,75	32±3	3,32	61	64
Лигнин Пеппера	2,66	49±3	2,41	44	41
Натронный лигнин	3,13	57±4	1,94	36	42
Натронно-АХ лигнин	3,78	69±2	1,29	24	26
Сульфатный лигнин	3,81	70±4	1,26	23	34
Сульфатно-АХ лигнин	3,90	71±3	1,17	22	34

Наконец, при изучении пространственной структуры макромолекул важную роль играет использованный метод определения. В настоящее время в химии лигнина используется различные методы, такие как гельпроникающая хроматография, седиментация, диффузия, светорассеяние и др., каждый из которых имеет свои возможности и ограничения.

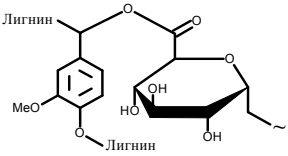
Еще одной важной и нерешенной проблемой являются лигноуглеводные связи в древесине. Если их существование не вызывает сомнений, то характер связей остается предметом дискуссий. В выделенных лигноуглеводных комплексах (ЛУК) предполагается наличие следующих типов связей: простых эфирных, сложноэфирных, фенилгликозидных и некоторых других (рис. 8). Не исключено, что связи между лигнином и углеводами являются не ковалентными, а водородными.

Можно предположить, что лигнин и полисахариды в ЛУК связаны не химической, а «механической» связью. Имеются в виду соединения, образующие структуры типа катенана и ротаксана (рис. 9a, b). Разделить молекулы в таких структурах, не прибегая к деструкции, по понятной причине невозможно.

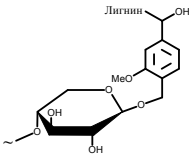
Биосинтез лигнина протекает в матрице из окружающих полисахаридов, поэтому нельзя исключать возможность взаимного проникновения и переплетения образующихся молекул лигнина и цепей гемицеллюлоз.



Простая эфирная связь



Сложноэфирная связь



Фенилгликозидная связь

Рис. 8. Основные типы лигноуглеводных связей [Фенгел, Вегенер, 1988]

Fig. 8. Main types of lignin–carbohydrate linkages in lignin–carbohydrate complexes (LCC) [Фенгел, Вегенер, 1988]

(a) (b)

Рис. 9. Соединения, образованные молекулами без химических связей: (a) катенан [Catenane, 2007]; (b) ротаксан [Rotaxane, 2016]

Fig. 9. Compounds formed by molecules without chemical bonds: (a) catenane [Catenane, 2007]; (b) rotaxane [Rotaxane, 2016]

Сведения о количестве связей лигнина с гемицеллюлозами в ЛУК достаточно противоречивы. Опубликованные данные на этот счет трудно сравнивать. Например, количество таких связей оценивается как очень небольшое – приблизительно одна на каждую индивидуальную полисахаридную цепь. В табл. 5 данные приведены в расчете на 100 ароматических колец лигнина. Если принять модель, строения лигнина, предложенную [Balakshin et al., 2020] (рис. 5), в соответствии с которой молекула лигнина состоит в среднем из 25 ФПЕ, то значения в табл. 5 нужно уменьшить в четыре раза.

Валоризация лигнина. За последние годы проявляется повышенный интерес к проблеме биорефайнинга растительного сырья, в том числе валоризации лигнина. Если для валоризации полисахаридов (целлюлозы и гемицеллюлоз) разработаны технологии переработки и существует рынок востребованных продуктов, то для лигнина на этом пути еще предстоит решить ряд проблем.

Таблица 5

Содержание лигноуглеводных связей в ЛУК [Tarasov et al., 2018]

Quantification of lignin–carbohydrate linkages in LCC [Tarasov et al., 2018]

Источник ЛУК	Количество лигноуглеводных связей на 100 Ar		
	α-Простые эфирные	Фенилгликозидные	γ-Сложноэфирные
Хвойные породы			
Сосна	4,3	6,8	4,5
Ель	3,8	4,4	–
Лиственные породы			
Береза	0,7	5,4	5,6
Эвкалипт	0,3-0,9	5,0-7,9	–

Прежде всего, необходимо выбрать многотоннажный источник лигнина, пригодный для получения продуктов с высокой добавленной стоимостью. В принципе, в качестве такого источника может выступать нативный лигнин (в древесине), однако в этом случае необходима последующая утилизация полисахаридов. Например, в работе [Wu et al., 2018] (рис. 10) на первой стадии нативный лигнин подвергали каталитической фотохимической деструкции при комнатной температуре, а из полисахаридов в результате кислотного и энзиматического гидролиза выделили, соответственно, ксилозу с выходом 84% и глюкозу с выходом 91%.

Существует ряд технических лигнинов, представляющих собой побочные продукты целлюлозно-бумажной промышленности: сульфатный лигнин, лигносульфонаты, органосолвентный лигнин (рис. 11). Ежегодно в мире производится приблизительно 55 млн т сульфатного лигнина, но только 2% из них используются для получения диспергирующих и связующих агентов, а остальное сжигается в системе регенерации варочных реагентов. Производство лигносульфонатов составляет около 1 млн т в год и постоянно уменьшается. Органосолвентный способ варки в настоящее время еще не является полномасштабным процессом.

Одним из направлений биорефайнинга растительного сырья является кислотный гидролиз древесины с получением биоэтанола. Широкому развитию этой технологии препятствует образование в качестве отхода больших количеств гидролизного лигнина. Из 1 т хвойной древесины при гидролизе получают 160-175 кг (45-49 галлонов) этанола, при этом образуется 350-400 кг лигнина в качестве побочного продукта. В России запасы гидролизного лигнина оцениваются приблизительно в 95 млн т.

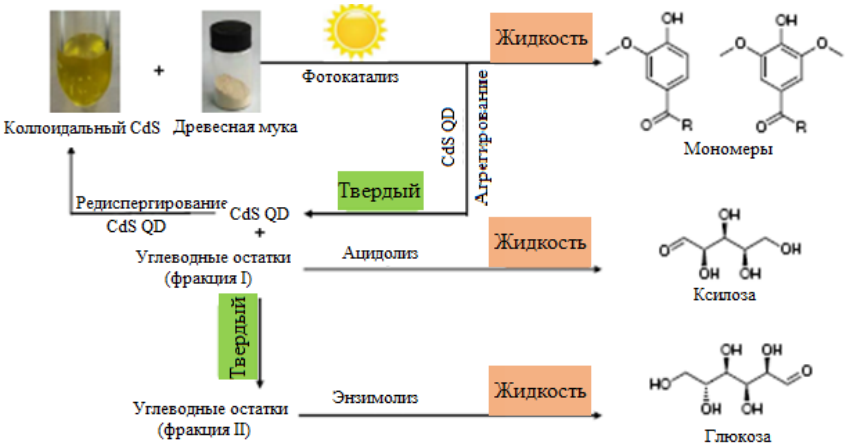


Рис. 10. Схема процесса валоризации лигнина за счет солнечной энергии [Wu et al., 2018]

Fig. 10. Schematic of the whole process for solar energy-driven lignin-first valorization of woodmeal [Wu et al., 2018]

Рис. 11. Источники валоризации лигнина
Fig. 11. Sources of lignin valorization

Еще одним аспектом обсуждаемой проблемы является выбор стратегии валоризации лигнина. Возможны два направления получения из лигнина продуктов с высокой добавленной стоимостью – переработка технического лигнина в целом или выделение и использование продуктов его деструкции, например, мономерных соединений.

Выбор направления валоризации зависит от строения и свойств технических лигнинов (рис. 12). Существует довольно много направлений валоризации. Рассмотрим на наш взгляд наиболее интересные и перспективные.

Рис. 12. Основные направления валоризации лигнина [Mastrolitti et al., 2021]

Fig. 12. Main directions of lignin valorization [Mastrolitti et al., 2021]

Гидрогели лигнина. Гидрогели представляют собой полимерные поперечно сшитые трехмерные структуры, обладающие высокой способностью к набуханию в воде, чувствительные к изменению pH, температуры и других факторов. Гидрогели, в том числе гидрогели лигнина, обладают избирательной сорбционной способностью по отношению к различным классам соединений, поэтому они используются как в медицине, в качестве матрицы для доставки лекарственных препаратов, так и в системах очистки воды. Известно несколько способов получения гидрогелей лигнина, однако все они имеют одни и те же недостатки: многостадийность, продолжительность и использование токсичных реагентов.

Недавно предложен новый способ получения гидрогелей лигнина, отличающийся тем, что гидрогель формируется *in situ* при взаимодействии лигнина с сорбатом (рис. 13). Гидрогели лигнина по отношению к тяжелым металлам, таким как свинец, железо и медь, отличаются высокой сорбционной способностью, составляющей в зависимости от содержания кислых групп в лигнине и молярной массы сорбата ~ 25-50% от массы лигнина, в связи с чем их можно использовать для очистки сточных вод химических предприятий.

Предложена схема межмолекулярных связей в точке образования гидрогеля лигнина (рис. 13), в соответствии с которой смежные молекулы лигнина связываются между собой тремя типами связей: ионной между карбоксильными группами лигнина и катионами металла, координационной между катионами металла и молекулами воды, входящими в координационную сферу, и водородными, связывающими все компоненты системы в единое целое.

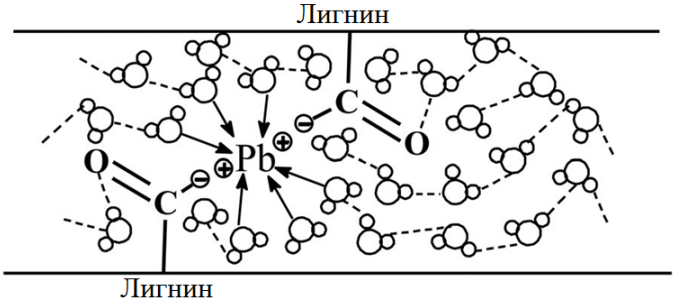


Рис. 13. Предполагаемая схема межмолекулярных связей в гидрогелях лигнина [Evstigneyev et al., 2021]

Fig. 13. The proposed scheme of intermolecular bonds in lignin hydrogels [Evstigneyev et al., 2021]

Медицина. Примером использования лигнина в медицине является Полифепан. Он представляет собой энтеросорбент и применяется для лечения желудочно-кишечных заболеваний различной природы, аллергий, атеросклероза и других заболеваний. Положительное влияние лигнина на лечение некоторых болезней связывают с наличием в нем фенольных гидроксильных групп, элиминирующих свободные радикалы (активные формы кислорода), т. е. лигнин действует как антиоксидант. При этом отмечается, что избыток свободных радикалов обнаружен при лечении многих заболеваний, таких как сахарный диабет, атеросклероз, старение, алкогольный цирроз, гипертония, гиперлипидемия, повреждение почек и рак.

Судя по данным, приведенным в табл. 6, лигнин обладает антиоксидантной, антимутагенной, противоопухолевой, противовирусной (включая ВИЧ), антимикробной и иммуномодулирующей активностью. Однако еще предстоит выяснить, какие именно молекулы оказывают влияние на тот или иной патологический процесс: лигнин, отдельные фракции лигнина, производные лигнина (например, лигнофенолы, лигносульфонаты), лигноуглеводные комплексы, или продукты деструкции лигнина (например, сиреневая и ванилиновая кислоты), или имеет место синергизм различных соединений.

Таблица 6

Основные виды биологической и фармакологической активности лигнина [Martínez et al., 2012]

Types of biological and pharmacological activity of lignin [Martínez et al., 2012]

Происхождение образца	Тип образца	Биологическая / Фармакологическая активность	Модель для исследования
Антиоксидант, защита против окислительного стресса			
Коммерческие лигнины	Багасса, лигносульфонат	Антиоксидантная активность *in vitro*	Эритроциты человека
Коммерческие лигнины	Лигнин	Удаление свободных радикалов	Клетки HeLa S3, крысы линии Wistar
Рисовая шелуха	Лигнин	Удаление свободных радикалов	*In vitro*
Сахарный тростник (*Saccharum officinarum* L.)	Багасса	Антиоксидантная активность *in vitro*	Эритроциты человека
Бамбук (*Bambusa* sp.)	Лигнофенолы	Предотвращение пероксид-индуцированной смерти клеток	Клеточная линия нейробластомы SHSY5Y
Бук (*Fagus crenata* Blume)	Лигнофенолы	Антиапоптотический эффект	Клетки PC12
Бук (*Fagus crenata*)	Лигнофенолы	Подавление окислительного стресса в почках	Индуцированные диабетические крысы
Бук (*Fagus crenata*)	Лигнофенолы	Сосудистый окислительный стресс и ослабление воспаления	Индуцированные диабетические крысы
Лигноцеллюлоза	Сиреневая и ванилиновая кислоты, полученные из лигноцеллюлозы	Гепатопротекторный эффект против ConA- и CCl_4 индуцированного повреждения печени	Мыши линии BALB/c, крысы линии Sprague-Dawley
Лиственная древесина	Лигнин	Уменьшение окислительных повреждений ДНК в яичках	Крысы линии Sprague-Dawley
Антимутагенная и противоопухолевая активность			
Лиственная древесина	Лигнин	Защита от генотоксического действия канцерогенов	Клеточные линии: V79, CaCo-2
Лиственная древесина	Лигнин	Защита от генотоксического действия канцерогенов в гепатоцитах крысы	Крысы линии Sprague-Dawley
Сосновые шишки различных ботанических видов сосны	Лигноуглеводные комплексы	Противоопухолевая активность	Мыши
Сосна (*Pinus parviflora* Sieb.et Zucc) (сосновые шишки)	Лигноуглеводные комплексы	Противоопухолевая активность	Мыши

Окончание табл. 6

Происхождение образца	Тип образца	Биологическая / Фармакологическая активность	Модель для исследования
Противовирусная и антимикробная активность			
Японский лесной гриб (*Lentinula edodes* (Berk.) Pengler), выращенный на сахарном тростнике	Лигнофенолы	Противовирусная активность против ВИЧ	ВИЧ-инфицированные клетки МТ-4, клетки костного мозга
Анис (*Pimpinella anisum* L.)	Лигноуглеводные комплексы	Противовирусная активность: ВПГ-1 -2; ЦМВ; вирус кори	Клетки Vero и MRC
Черноголовка обыкновенная (*Prunella vulgaris* L.)	Лигноуглеводные комплексы	Противогерпетическая активность	Мыши линии Balb / c, морские свинки
Сосна (*Pinus parviflora* Siebold & Zucc.) (сосновые шишки)	Лигноуглеводные комплексы	Противовирусные эффекты против ВИЧ-1, вируса гриппа и ВПГ	Мыши
Какао (*Theobroma cacao* L.)	Лигноуглеводные комплексы	Противовирусная активность	Клетки RAW264.7 и J774.1
Сосна (*Pinus parviflora*) (сосновые шишки)	Лигноуглеводные комплексы	Антимикробная активность	Различные микроорганизмы (*Escherichia coli* GN2411 и др.)
Иммуномодулирующие эффекты			
Анис (*Pimpinella anisum*)	Лигноуглеводные комплексы	Иммуностимулирующий эффект	Клетки RAW264.7
Сосна (*Pinus parviflora*) (сосновые шишки)	Лигноуглеводные комплексы	Иммуностимулирующий эффект	Мыши
Кишечная активность			
Сахарный тростник (*Saccharum officinarum*)	Багасса	Противодиарейный препарат	Свиньи
Хвойные и лиственные породы	Лигносульфонаты	Модуляция кишечной микросреды	Крысы линии Sprague-Dawley

3D-печать. Появление 3D-печати связано с необходимостью изготовления изделий сложной формы с точными размерами и необходимыми эксплуатационными характеристиками, являющихся либо частью какого-то механизма, либо любого другого объекта, включая биологические имплантаты. Среди всех методов получения таких изделий наиболее популярным является формование отложением из расплава (FDM).

Полимерные компоненты древесины (целлюлоза, гемицеллюлозы и лигнин) в определенных условиях, в присутствии пластификаторов, могут переходить из стеклообразного релаксационного состояния, в котором они

находятся в обычных условиях, в высокоэластическое, но не способны плавиться. Поэтому их используют большей частью как вспомогательные материалы в составе композитов на основе полимеров, образующих расплавы. По мнению некоторых исследователей, для разработки полимерных композиций для 3D-печати предпочтительнее использовать лиственный лигнин, поскольку в нем доминируют связи β-O-4 и имеются длинные алифатические боковые цепи, которые обеспечивают гибкость в сегментах лигнина. В качестве примера на рис. 14 приведен пример изделия, полученного методом 3D-печати с использованием лигнина.

Рис. 14. Изделие, полученное методом 3D-печати из композиции, содержащей 40% органосолвентного лиственного лигнина, в форме дубового листа [Nguyen et al., 2018]

Fig. 14. 3D printed product from a composite containing 40% hardwood lignin in the shape of an oak leaf [Nguyen et al., 2018]

Углеродные волокна. Движущей силой развития производства углеродных волокон являются все возрастающие требования по снижению выбросов CO_2, существенный вклад в которые вносят выбросы автомобилей. Так, если в 2012 г. средняя эмиссия диоксида углерода автомобилей концерна Фольксваген составляла 130 г CO_2/км, то в 2020 г. требования для всей Германии составляют 95 г CO_2/км, а в перспективе (2050 г.) они должны снизиться до 20 г CO_2/км. В Евросоюзе, США и Японии в 2020 г. выбросы должны уменьшиться до, соответственно, 95, 114 и 113 г CO_2/км.

Основным ресурсом достижения указанных нормируемых показателей является уменьшение массы отдельных частей автомобиля на ~ 50% при сохранении его эксплуатационных и прочностных характеристик, поэтому все большее использование в автомобилестроении находят углеродные волокна, позволяющие снижать вес изделий вплоть до 60% при той же функциональности. Однако для получения углеродных волокон используется дорогое сырье – полиакрилонитрил (PAN), на долю которого приходится более 50% стоимости продукции, в связи с чем в качестве альтернативного источника сырья рассматривается лигнин. К тому же из лигнина не образуется таких токсичных соединений, сопровождающих высокотемпературную переработку PAN, как синильная кислота.

Наиболее распространенным способом производства полимерных волокон является прядение из расплава, в соответствии с которым расплав пропускают через небольшие отверстия (фильеры) и вытягивают в тонкие волокна.

Основная проблема использования лигнина для получения углеродных волокон состоит в том, что имеется очень узкое «окно» между температурой стеклования и температурой его деструкции. Иными словами, температура деструкции может оказаться ниже температуры, необходимой для прядения волокна из расплава. С целью снижения температуры стеклования используется модификация технических лигнинов, главным образом с помощью этерификации. Процесс получения углеродных волокон включает в себя следующие стадии: прядение волокна, стабилизация волокна, карбонизация волокна.

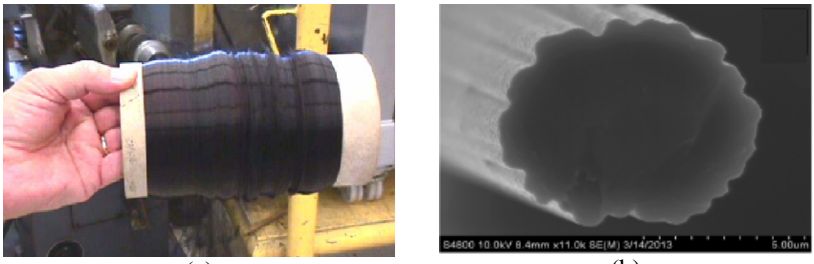
В качестве примера на рис. 15 показаны волокна, полученные из лиственного лигнина. Можно заметить, что лигниновые волокна достаточно гибкие, поскольку их можно наматывать на катушку. После прядения сформированные полимерные волокна подвергаются стабилизации, которую осуществляют, нагревая волокна до 200–300°C на воздухе. На следующем этапе стабилизированные волокна, способные выдерживать высокие температуры, карбонизируются при температуре 800–1400°C в атмосфере инертного газа (азота или аргона). Стабилизированное и карбонизированное волокно из лигнина показано на рис. 16a, b. Углеродные волокна широко используются не только в автомобильной, но также в спортивной и аэрокосмической промышленностях, поэтому данное направление валоризации лигнина имеет неплохие перспективы.

Еще одним направлением является получение из лигнина биотоплива**.** Использование технических лигнинов в качестве топлива и их газификация известны уже давно. В последние годы разработаны новые методы деструкции лигнина с получением жидких продуктов, которые можно рассматривать как биотопливо либо как источник прекурсоров для химического синтеза.

Рис. 15. Лигниновые волокна, сформированные в виде полотна методом прядения из расплава [Mainkaa et al., 2015]

Fig. 15. Lignin fibers formed into a web by melt spinning [Mainkaa et al., 2015]

Пиролиз технических лигнинов (сульфатного, органосолвентного, лигносульфонатов, гидролизного и некоторых других) в присутствии муравьиной кислоты и спирта позволяет получать жидкие продукты (bio-oils) с выходом выше 80%, представляющие собой сложную смесь низкомолекулярных соединений (рис. 17). Предполагается, что муравьиная кислота служит как донором водорода, так и реакционной средой в процессе пиролиза / сольволиза. По мнению авторов [Gellerstedt et al., 2008] , очень низкое содержание кислорода и химический состав позволяют использовать получаемое биомасло в качестве одного из компонентов моторного топлива.



(a) (b)

Рис. 16. (a) лигниновое волокно, полученное из смеси сульфатного хвойного лигнина и полиэфира методом прядения из расплава [Griffith et al., 2003]; (b) углеродное волокно из ацетилированного сульфатного хвойного лигнина [Zhang, Ogale, 2016]

Fig. 16. (a) Lignin fiber obtained from a mixture of sulfate coniferous lignin and polyester by melt spinning [Griffith et al., 2003]; (b) Carbon fiber from acetylated sulfate softwood lignin [Zhang, Ogale, 2016]

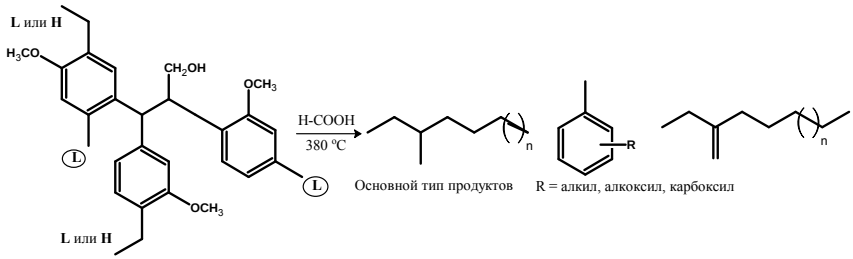


Рис. 17. Продукты, образующиеся при пиролизе лигнина в присутствии муравьиной кислоты [Gellerstedt et al., 2008]

Fig. 17. Products formed during lignin pyrolysis in the presence of formic acid [Gellerstedt et al., 2008]

Основным направлением получения из лигнина продуктов с высокой добавленной стоимостью считается выделение и использование мономерных соединений. Для селективной деструкции лигнина до мономеров используются каталитические методы, позволяющие расщеплять связи α-O-4 и β-O-4. К ним относятся гидрогенолиз, окисление, электрохимическое восстановление и окисление, фотохимическая и энзиматическая деструкция, дериватизация с последующим восстановительным расщеплением (DFRC) и восстановительное расщепление. Здесь приводятся только наиболее значимые с точки зрения выхода мономеров публикации. Для оценки эффективности того или иного метода деструкции необходимо было определить максимально возможный (теоретический) выход в таких реакциях. Проблема в том, что фенилпропановые звенья лигнина связаны между собой двумя типами связей – гидролизуемой (простой эфирной) и негидролизуемой (углерод-углеродной). В результате проведенных исследований было установлено, что максимально возможный выход ароматических мономерных соединений составляет для нативного лигнина древесины хвойных пород 23%, а для лиственных пород – 51%. Экспериментальная проверка полученных значений проводилась при сопоставлении с данными опубликованных работ. Результаты проверки приведены в табл. 7.

Выход мономеров из выделенных препаратов лигнина значительно ниже, чем из нативного лигнина. Это объясняется частичной деструкцией арилэфирных связей в процессе выделения лигнина из древесины. Если в нативном лигнине содержание алкиларильных простых эфирных связей составляет 79/100 ФПЕ, то, например, в сульфатном – только 23/100 ФПЕ (табл. 4). В результате гидрогенолиза сульфатного лигнина образуется 4% мономерных продуктов, что в несколько раз ниже по сравнению с нативным лигнином.

Таблица 7

Выход мономерных продуктов гидрогенолиза нативного лигнина древесины [Evstigneyev, 2018]

Yield of monomeric products from hydrogenolysis of native wood lignin [Evstigneyev, 2018]

№	Образец древесины	Процесс	Выход мономерных продуктов деструкции, масс. % к лигнину
Хвойные породы			
1	Ель (*Picea glauca* Moench (Voss))	Диоксан/вода (1:1) Pd/C, 468 K, 5 ч, 3.4 MPa H_2	24
2	Ель (*Picea excelsa* (Lam.) Link.)	Бензол, $Co_2(CO)_8$, 443 K, 24 ч, 10 MPa H_2/CO (1:1)	24,5
3	Сосна (*Pinus sylvestris* L.)	EtOH/H_2O, Pd/C (5 моль %), 195 C°, 1 ч	23
4	Сосна (*Pinus radiata* D.Don)	Диоксан/вода (1:1) Pd/C, 468 K, 24 ч, 3.45 MPa H_2	21
5	Сосна	Метанол, Pd/C, $ZnCl_2$, 498 K, 12 ч, 3.4 MPa H_2	19
6	Сосна	Вода, H_3PO_4, $LiTaMoO_6$, Ru/C, 503 K, 24 ч, 6 MPa H_2	21,2
Лиственные породы			
7	Береза (*Betula pendula* Roth)	EtOH/H_2O, Pd/C (5 моль %), 195 C°, 1 ч	49
8	Береза (*Betula pendula*)	Метанол, Ru/C, 523 K, 3 ч, 1 MPa H_2	47,2
9	Береза (*Betula platyphylla* Sukaczev)	Диоксан/вода, H_3PO_4, Pt/C, 473 K, 4 ч, 4 MPa H_2	46,4
10	Береза	Метанол, Pd/C, $ZnCl_2$, 498 K, 12 ч, 3.4 MPa H_2	55
11	Береза	Вода, Ni-W_2C/AC, 508 K, 4 ч, 6 MPa H_2	46,5
12	Береза	Метанол, Ni/C, 473 K, 6 ч, аргон	54

При каталитическом окислении лигнина наблюдаются те же закономерности, что и при гидрогенолизе: выход мономеров при окислении модельных соединений и нативного лигнина приближается к теоретическому, тогда как при окислении выделенных препаратов и технических лигнинов он значительно ниже. Наиболее отчетливо эти закономерности проявляются при каталитическом окислении лигнина кислородом и нитробензолом (табл. 8).

Таблица 8

Сравнение выхода ванилина при окислении нативного и технических лигнинов молекулярным кислородом и нитробензолом в щелочной среде [Tarabanko, Tarabanko, 2017]

Comparison of the yield of vanillin during the oxidation of native and technical lignins with molecular oxygen and nitrobenzene in an alkaline medium [Tarabanko, Tarabanko, 2017]

№	Тип лигнина	Окислитель, катализатор	Выход, массовый %
Хвойная древесина (нативный лигнин)			
1	Древесина ели (28% лигнина)	Воздух, без катализатора	11,4
2	Древесина ели	Воздух , $Cu(OH)_2$, 10% от массы древесины	18,9
3	Древесина ели	Воздух, MnO_2, 10% от массы древесины	18,2
4	Древесина ели	Нитробензол	20-27
5	Древесина сосны	Кислород, без катализатора	12,9
6	Древесина сосны	Кислород, $Cu(OH)_2$	23,1
7	Древесина сосны, пораженная бурой гнилью	Кислород, $Cu(OH)_2$	19,8
Лиственная древесина (нативный лигнин)			
8	Древесина осины	Кислород, CuO, Проточный реактор	36*
9	Древесина осины	Нитробензол	43,6*
10	Древесина березы	Кислород, $Cu(OH)_2$	43*
11	Древесина березы	Нитробензол	47*
Хвойная древесина (технические лигнины)			
12	Хвойные лигносульфонаты	Воздух, без катализатора	5-7
13	Хвойные лигносульфонаты	Кислород, $Cu(OH)_2$	12
14	Хвойные лигносульфонаты	Нитробензол	16
15	Хвойные лигносульфонаты	Кислород, $Co(OH)_3$, Mn_3O_4	10-15,5
16	Сульфатный лигнин	Кислород, без катализатора	4,5-10,8
17	Сульфатный лигнин	Нитробензол	13,1
Лиственная древесина (технические лигнины)			
18	Лигносульфонаты из эвкалипта	Кислород, $Cu(OH)_2$	13,4*
19	Гидролизный лигнин из быстрорастущего тополя	Кислород, $Cu(OH)_2$, $Fe(OH)_3$	15*

Примечание: * – объединенный выход ванилина и сиреневого альдегида

Максимальный выход ванилина при окислении нативного хвойного лигнина кислородом составляет 23,1% (опыт №6), т. е. практически столько же, сколько составляет теоретический выход мономеров при гидрогенолизе (23%). Для лиственного нативного лигнина эти значения составляют, соответственно, 43% и 51%. Для всех технических лигнинов выход ванилина заметно ниже в сравнении с нативным лигнином.

Необходимо отметить, что в настоящее время только один мономерный продукт деструкции лигнина, а именно ванилин, получаемый в результате каталитической окислительной деструкции лигносульфонатов, имеет коммерческое значение и выпускается фирмой Borregaard. В 2010 г. мировая потребность в ванилине составляла 16000 т и увеличивалась на 2-4% в год. Сегодня около 85% ванилина синтезируется из продуктов переработки нефти и только 15% – окислением лигносульфонатов.

Углеродные квантовые точки (*CDs*) представляют собой полупроводниковые материалы, размер которых, как правило, не превышает 100 нанометров, ядро состоит из sp^2 и sp^3 гибридизованных атомов углерода, поверхность образована различными органическими функциональными группами: аминными, эпоксидными, карбонильными, альдегидными и гидроксильными (рис. 18). Наличие определенной функциональной группы зависит от метода синтеза и приводит к изменению люминесцентных свойств.

Главная особенность углеродных квантовых точек в том, что они могут поглощать и затем излучать свет, то есть люминесцировать в диапазоне от синего до красного и даже инфракрасного излучения. Углеродные квантовые точки растворимы в воде, биосовместимы и обладают низкой токсичностью.

Наиболее распространенный метод получения углеродных квантовых точек – это гидротермальная обработка различных прекурсоров, в том числе лигнина, при температуре до 300°C. В качестве примера на рис. 18 приведена схема синтеза квантовых точек из щелочного лигнина (L-CD). Длина волны полосы излучения зависит от условий их формирования и типов легирующих примесей. Оптимальная длина волны излучения трех синтезированных L-CD, легированных N, находилась на 395 нм, 515 нм и 602 нм, что соответствовало флуоресценции синего, зеленого и оранжевого цветов соответственно (рис. 19).

L-CD могут найти применение в различных областях, таких как фотокатализ, биомедицина, оптоэлектронные устройства, датчики, шифрование информации и композитные функциональные материалы.

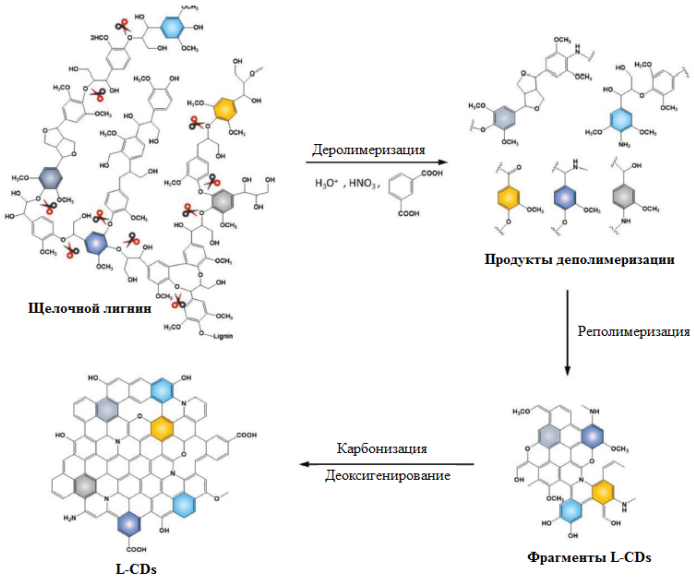


Рис. 18. Схема образования углеродных квантовых точек из лигнина (L-CDs) [Gan et al., 2023]

Fig. 18. Illustration of the formation mechanism of L-CDs through hydrothermal reaction after acid treatment [Gan et al., 2023]

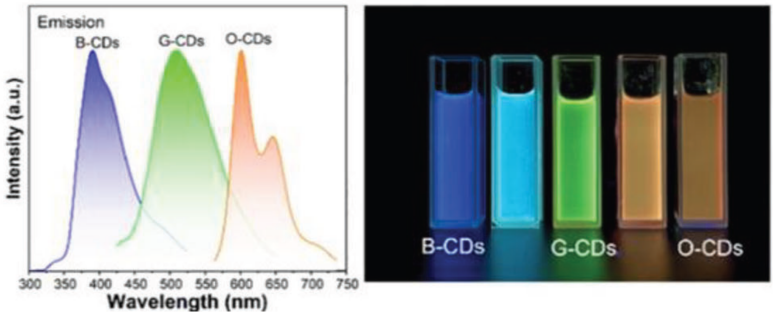


Рис. 19. Люминесценция L-CDs из щелочного лигнина разного строения [Gan et al., 2023]

Fig. 19. Luminescence of L-CDs from alkali lignin of different structures [Gan et al., 2023]

Валоризация окисленного гидролизного лигнина. Неоднородность структуры, нерастворимость в известных растворителях и низкая реакционная способность делают необходимой предварительную химическую обработку гидролизного лигнина (ГЛ). Найдено решение, позволившее увеличить как растворимость, так и реакционную способность ГЛ (рис. 20., табл. 9). При окислении гидролизного лигнина пероксидом водорода в кислой среде получен препарат лигнина, полностью растворимый в воде в присутствии небольшого количества щелочи.

Окисленный гидролизный лигнин (ОГЛ) обладает физико-химическими свойствами, позволяющими использовать его в ряде областей промышленности и в медицине (рис. 21). Еще одним преимуществом ОГЛ является то, что он сам и реактивы, используемые для его производства, являются экологически безопасными, поскольку конечными продуктами разложения пероксида водорода являются вода и кислород.

Способность лигнина к гелеобразованию уже обсуждалась. Здесь отметим только, что по сорбционной способности по отношению к тяжелым металлам ОГЛ не уступает сульфатному лигнину.

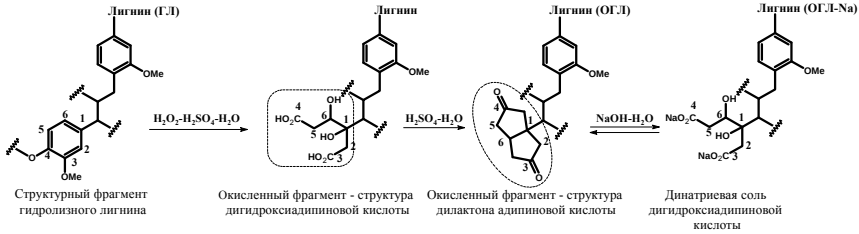


Рис. 20. Схема превращений гидролизного лигнина при окислении и образовании натриевой соли ОГЛ (Na-ОГЛ) [Zakusilo et al., 2023]

Fig. 20. Proposed scheme of oxidation of industrial hydrolysis lignin and the formation of sodium salt of OHL (Na-OHL) [Zakusilo et al., 2023]

По поверхностно-активным свойствам ОГЛ превосходит лигносульфонаты и на фоне постоянного снижения их выпуска может стать им заменой. На основании сравнительных экспериментальных исследований установлено, что ОГЛ является эффективным регулятором реологических и фильтрационных свойств глинистых растворов и может быть использован в качестве реагента-разжижителя буровых растворов при бурении нефтяных и газовых скважин.

Таблица 9

Химический и функциональный состав гидролизного лигнина и окисленного гидролизного лигнина, % [Zakusilo et al., 2023]

Chemical and functional composition of hydrolysis lignin and oxidized hydrolysis lignin, % [Zakusilo et al., 2023]

Лигнин	Лигнин Класона	Углеводы	OMe	COOH	$OH_{фен}$	C=O	Ash
ГЛ	89,52 (0,28)[a]	6,79	11,97	4,49	3,00	4,15	3,37
ОГЛ	87,35 (2,66)[a]	5,07	5,52	10,28	2,07	5,13	0,96

Примечание: [a] – в скобках указано содержание кислоторастворимого лигнина

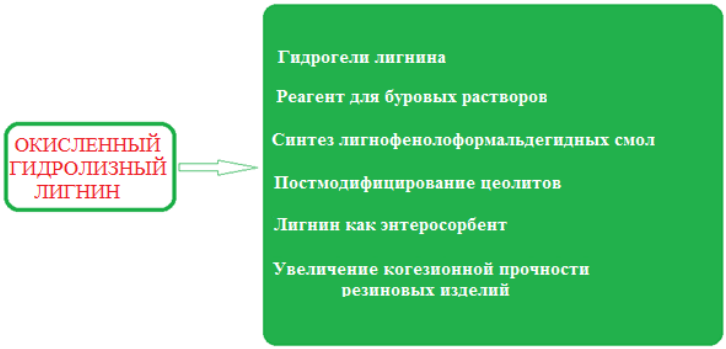


Рис. 21. Возможные направления валоризации окисленного гидролизного лигнина

Fig. 21. Possible directions of valorization of oxidized hydrolysis lignin

ОГЛ испытан в качестве замены токсичного фенола в синтезе фенолоформальдегидных смол. Древесностружечные плиты, полученные с использованием лигнофенолоформальдегидных смол на основе ОГЛ, обладают высокими физико-механическими характеристиками и соответствующей гидрофобностью. Плиты, изготовленные со смолой с 30% фенола, замещённого на лигнин, обладают лучшими показателями по всем параметрам и значительно превосходят по своим характеристикам образцы, изготовленные из базовой смолы на основе лигносульфоновых кислот (ЛСК).

Интересные результаты получены при исследовании влияния ОГЛ на формирование структуры известного класса катализаторов – цеолитов. Установлено, что добавка ОГЛ увеличивает мезопористость катализатора, и за счет этого увеличиваются степень превращения и селективность реакции циклизации сложного эфира *O*-арил-3-арилпропиновой кислоты до кумарина.

Сорбционные свойства ОГЛ определяли по количеству адсорбированного метиленового синего по методике, принятой для оценки сорбционной способности известного энтеросорбента – Полифепана. Сорбционная емкость ОГЛ составила 101,81 мг·г$^{-1}$, а Полифепана, измеренная в этих же условиях – 57,59 мг·г$^{-1}$. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что ОГЛ представляет собой перспективное сырье для получения новых энтеросорбентов. Предварительные исследования показали, что сам ОГЛ является абсолютно нетоксичным и безопасным веществом.

Определенные перспективы имеет еще одно направление валоризации ОГЛ, а именно его использование в составе сырых резиновых смесей на основе синтетического изопренового каучука в количестве 1-2,5% для увеличения когезионной прочности резиновых изделий.

Экономические аспекты валоризации лигнина. В заключение необходимо кратко остановиться на экономических аспектах валоризации. Для полномасштабной оценки экономической целесообразности валоризации лигнина в настоящее время еще недостаточно данных, а именно стоимости исходного сырья биомассы, капитальных и эксплуатационных затрат, а также размера рынка и цены реализации целевых продуктов. Несмотря на то, что за последние 30 лет исследователи вложили значительные усилия в изучение вопросов, связанных с технологиями, такими как извлечение, характеристика и применение технических лигнинов, использование лигнина по-прежнему ограничивается производством энергии и некоторыми узкими приложениями.

Суммарное количество сульфатного лигнина, выпускаемого всеми производителями, составляет 157 кт/г, а рыночная цена – $260-500/т. Для лигносульфонатов опубликованы следующие данные: выпускается всеми производителями 1508 кт/г; рыночная цена в 2024 г. составила в США 725 $/т, в Китае – 270 $/т, в Саудовской Аравии – 730 $/т.

В табл. 10 приведены размер рынка и цены продуктов, получаемых из лигнина и востребованных на рынке. Содержание табл. 10 позволяет определить наиболее перспективные направления валоризации как с точки зрения объема рынка, так и стоимости продукции. Несомненными лидерами являются авиационное топливо и углеродное волокно. Эта таблица требует некоторых комментариев.

Авиационное топливо из лигнина получают расщеплением углерод-углеродных и простых эфирных связей между фенилпропановыми единицами с последующей гидродеоксигенацией (HDO) до циклических углеводородов (рис. 22). Судя по составу, синтетическое авиационное топливо на основе лигнина состоит преимущественно из дициклических парафинов (табл. 11).

Таблица 10

Основные результаты техноэкономической оценки валоризации лигнина [Mastrolitti et al. 2021]

Main results of the techno-economic assessment of lignin valorization [Mastrolitti et al. 2021]

Главный продукт на основе лигнина	Оценочный выход, % (кг/кг$_{лигнина}$)	Размер рынка (кт/г)	Цена продажи продукта (€/т)
Частицы коллоидального лигнина	100	5,000-20,000	800-1,500
Ванилин	8	16	14,000
Пирокатехин	2.6-28	15-20	985-2,000
Пропилгваякол	12	–	–
BTX	10-25	40,200/19,800/42,500	1,200
Авиационное топливо	–	246,000	500
PHA	–	1,700	3,000-5,000
Углеродное волокно	–	100.5	38,000
Полиуретановые пены (в виде полиола)	–	20,000	1,500
Эвгенол	3	37	8,000

Примечание: BTX – бензол, толуол, ксилол; PHA – полигидроксиалканоат

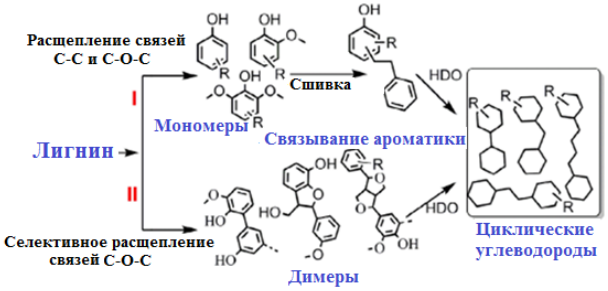


Рис. 22. Предполагаемые направления деполимеризации и гидродеоксигенации (HDO) лигнина до состава углеводородов уровня «авиационное топливо» [Wang et al., 2015]

Fig. 22. Proposed routes of the depolymerization and hydrodeoxygenation of biomass-derived lignin to jet fuel range hydrocarbons [Wang et al., 2015]

Таблица 11

Состав синтетических авиационных топлив [Wang et al., 2015]

Composition of synthetic aviation fuels

Компоненты	Среднее значение по миру	На основе угля	На основе лигнина
Парафины	58,8	0,6	6,2
Моноциклопарафины	10,9	46,4	3,9
Дициклопарафины	9,25	47	60,9
Трициклопарафины	1,08	4,6	1,9
Алкилбензолы	13,4	0,3	0
Инданы и тетралины	4,9	1,1	<0,1
Нафталин	0,13	<0,2	<0,1
Замещенные нафталины	1,55	<0,2	<0,7

BTX. Существует несколько методов получения BTX (бензол, толуол, ксилол): гидротермальное ожижение в воде в сверхкритических условиях (374°C); быстрый пиролиз (около 600°C); каталитический быстрый пиролиз (для дезоксигенации и ароматизации пиролизных масел из лигнина); восстановительно-каталитическое фракционирование, направленное на получение кислородсодержащих фенольных мономеров на начальном этапе предварительной обработки лигноцеллюлозной биомассы (рис. 23).

Полимеры и химикаты на основе BTX в основном используются в качестве исходного сырья для широкого спектра продукции в различных отраслях промышленности.

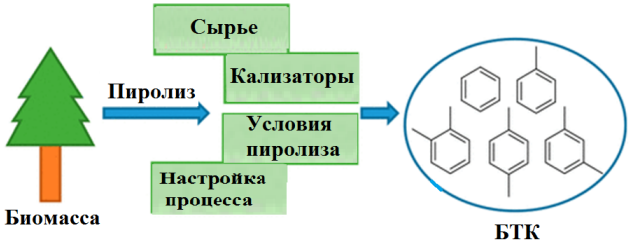
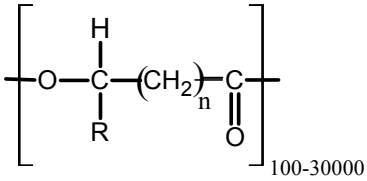


Рис. 23. Схема получения БТК (бензол, толуол, ксилол) методом быстрого пиролиза биомассы [Wu et al., 2023]

Fig. 23. Benzene, Toluene, and Xylene (BTX) production from catalytic fast pyrolysis of biomass [Wu et al., 2023]

Полигидроксиалканоаты (*PHA*) являются примером биовалоризации лигнина, поскольку представляют собой биологически синтезированные полиэфиры следующего строения:



Они могут состоять из разнообразного набора повторяющихся структурных единиц. Эти биологически синтезированные полиэфиры обладают множеством привлекательных свойств и используются в производстве массовых пластиков, рыболовных лесок и в медицинских целях. PHA также привлекают большое внимание как биоразлагаемые полимеры, которые могут быть получены из биовозобновляемых ресурсов, в том числе лигнина (рис. 24).

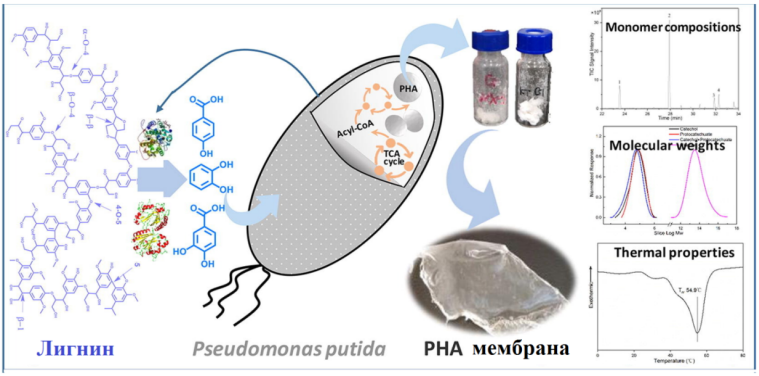


Рис. 24. Схема получения полигидроксиалканоатов из лигнина с использованием *Pseudomonas putida* NX-1 [Xu, Jin, 2021]

Fig. 24. Polyhydroxyalkanoate production from lignin by *Pseudomonas putida* [Xu, Jin, 2021]

Адипиновая кислота является еще одним примером биовалоризации лигнина. Для синтеза адипиновой кислоты из лигнина на первом этапе получили *цис*, *цис*-муконат с помощью модифицированного *P. putida*, выращенного

на выделенном из биомассы, обогащенном лигнином потоке, что демонстрирует комплексную стратегию по превращению лигнина в важный товарный химикат. *Цис*, *цис*-муконовая кислота была выделена с высокой чистотой (>97%) и выходом (74%) путем обработки активированным углем и кристаллизации (5°C, pH 2). Далее *цис*, *цис*-муконовую кислоту гидрировали на высокоактивном катализаторе, Pd/C, и получили адипиновую кислоту (рис. 25) с высокой конверсией (>97%) и селективностью (>97%).

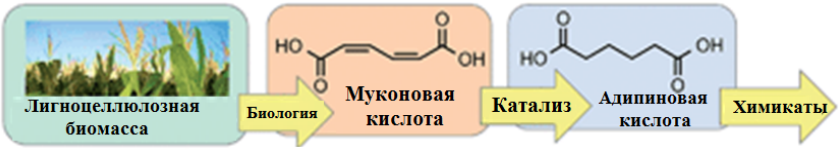


Рис. 25. Схема получения адипиновой кислоты из лигнина [Vardon et al., 2015, 2016]

Fig. 25. Adipic acid production from lignin [Vardon et al., 2015, 2016]

В 2022 г. мировое производство адипиновой кислоты составило 5,1 млн т, а цена 1 т составила $1,692 [Adipic…, 2026]. Основные направления потребления адипиновой кислоты – получение нейлона и полиуретана (рис. 26).

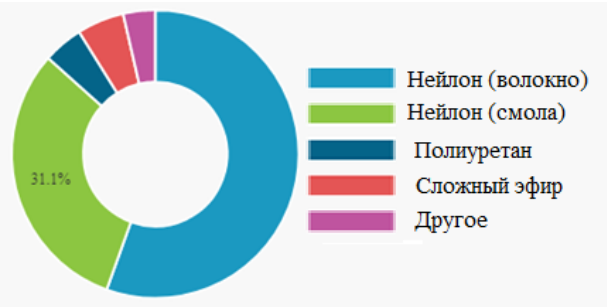


Рис. 26. Мировой рынок адипиновой кислоты в 2024 г. [Adipic…, 2026]

Fig. 26. Global adipic acid market, 2024 [Adipic…, 2026]

В заключение необходимо отметить, что дальнейший прогресс в этой области химии лигнина связан, на мой взгляд, с практической реализацией результатов многочисленных исследований валоризации технических

лигнинов, разработкой конкретных технологий и выпуском инновационной продукции, в том числе получением: углеродных волокон для автомобильной, авиационной и космической промышленности; гидро- и аэрогелей для биоэлектроники (биосенсоров, биоэлектродов); материалов для накопления и преобразования солнечной энергии; композиционных материалов для 3D-печати, используемых для изготовления изделий сложной формы, включая биологические имплантаты; поверхностно-активных соединений, включая реагенты для обработки буровых растворов, а также получением бионефти и сорбентов для очистки сточных вод.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Фенгел Д., *Вегенер Г.* Древесина. Химия, ультраструктура, реакции. М.: Лесн. пром-сть, 1988. 512 с.

Adipic Acid Market Size, Share // Fortune Business Insights: Consulting & Growth Advisory Services. URL: https://www.fortunebusinessinsights.com/adipic-acid-market-110336 (дата обращения: 10.09.2025).

Balakshin M., *Capanema E.A.*, *Zhu X.*, *Sulaeva I.*, *Potthast A.*, *Rosenau T.*, *Rojas O.J.* Spruce milled wood lignin: linear, branched or cross-linked? // Green Chemistry. 2020. Vol. 22. P. 3985–4001. DOI: 10.1039/D0GC00926A.

Catenane // Wikimedia Commons. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Catenane_ChemComm_244_1985.jpg (дата обращения: 26.08.2025).

Crestini C., *Melone F.*, *Sette M.*, *Saladino R.* Milled wood lignin: A linear oligomer // Biomacromolecules. 2011. Vol. 12. P. 3928–3935. DOI: 10.1021/bm200948r.

Evstigneyev E.I. Selective depolymerization of lignin: Assessment of yields of monomeric products // J. Wood Chem. Technol. 2018. Vol. 38. P. 409-415. DOI: 10.1080/02773813.2018.1500607.

Evstigneyev E.I., *Kalugina A.V.*, *Ivanov A.Yu.*, *Vasilyev A.V.* Contents of α-O-4 and β-O-4 bonds in native lignin and isolated lignin preparations // J. Wood Chem. Technol. 2017. Vol. 37. P. 294-306. DOI: 10.1080/02773813.2017.1297832.

Evstigneyev E.I., *Grinenko E.V.*, *Mazur A.S.*, *Vasilyev A.V.* Study of the formation of lignin hydrogels with metal cations // J. Wood Chem. Technol. 2021. Vol. 41, iss. 2, 3. P. 73-82. DOI: 10.1080/02773813.2021.1873389.

Gan J., *Chen L.*, *Chen Z.*, *Zhang J.*, *Yu W.*, *Huang C.*, *Wu Y.*, *Zhang K.* Lignocellulosic Biomass-Based Carbon Dots: Synthesis Processes, Properties, and Applications // Small. 2023. Vol. 19. Art. no. 2304066. DOI: 10.1002/smll.202304066.

Gellerstedt G., *Li J.*, *Eide I.*, *Kleinert M.*, *Barth T.* Chemical structures present in biofuel obtained from lignin // Energy & Fuels. 2008. Vol. 22. P. 4240-4244. DOI: 10.1021/ef800402f.

Griffith W.L., *Compere A.L.*, *Leitten C.F.*, *Shaffer J.T.* Low-cost, lignin-based carbon fiber for transportation applications // 35th ISTC Conference. Dayton, OH, 2003. P. 1-8.

Mainkaa H., *Tägera O.*, *Körnera O.*, *Hilfert L.*, *Busseb S.*, *Edelmannb F.T.*, *Herrmannc A.S.* Lignin – an alternative precursor for sustainable and cost-effective automotive carbon fiber // J. Mater. Res. Technol. 2015. Vol. 4. P. 283-296. DOI: 10.1016/j.jmrt.2015.03.004.

Martínez V., *Mitjans M.*, *Vinardell M.P.* Pharmacological applications of lignins and lignins related compounds: an overview // Current Organic Chem. 2012. Vol. 16. P. 1863-1870. DOI: 10.2174/138527212802651223.

Mastrolitti S., *Borsella E.*, *Giuliano A.*, *Petrone M.T.*, *De Bari I.*, *Gosselink R.J.A.*, *van Erven G.*, *Annevelink E.*, *Triantafyllidis K.S.*, *Stichnothe H.* Sustainable lignin valorization. IEA Bioenergy, 2021. 194 p. DOI: 10.13140/RG.2.2.34874.67520.

Nguyen N.A., *Barnes S.H.*, *Bowland C.C.*, *Meek K.M.*, *Littrell K.C.*, *Keum J.K.*, *Naskar A.K.* A path for lignin valorization via additive manufacturing of high-performance sustainable composites with enhanced 3D printability // Sci. Adv. 2018. Vol. 4. P. 1-15. DOI: 10.1126/sciadv.aat4967.

Nimz H.H. Analytical methods in wood, pulping and bleaching chemistry // Proc. of 8th Int. Symp. Wood and Pulp. Chem. Helsinki, 1995. Vol. 1. P. 1-32.

Ralph J., *Lapierre C.*, *Boerjan W.* Lignin structure and its engineering // Current Opinion in Biotechnology. 2019. Vol. 56. P. 240-249. DOI: 10.1016/j.copbio.2019.02.019.

Rinaldi R., *Jastrzebski R.*, *Clough M.T.*, *Ralph J.*, *Kennema M.*, *Bruijnincx P.C.A.*, *Weckhuysen B.M.* Paving the way for lignin valorisation: recent advances in bioengineering, biorefining and catalysis // Angew. Chem. Int. Ed. 2016. Vol. 55. P. 8164 – 8215. DOI: 10.1002/anie.201510351.

Rotaxane // Wikipedia. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Rotaxane_Crystal_Structure_EurJOrgChem_page2565_year1998.png (дата обращения: 26.08.2025).

Sakakibara A. Chemistry of lignin // Wood and Cellulosic Chemistry. NYC, 1991. P. 111-175.

Tarabanko V.E., *Tarabanko N.* Catalytic oxidation of lignins into the aromatic aldehydes: general process trends and development prospects // Int. J. Mol. Sci. 2017. Vol. 18. P. 2421-2450. DOI: 10.3390/ijms18112421.

Tarasov D., *Leitch M.*, *Fatehi P.* Lignin–carbohydrate complexes: properties, applications, analyses, and methods of extraction: a review // Biotechnol. Biofuels. 2018. Vol. 11. Art. no. 269. DOI: 10.1186/s13068-018-1262-1.

Tolbert A., *Akinosho H.*, *Khunsupat R.*, *Naskar A.K.*, *Ragauskas A.J.* Characterization and analysis of the molecular weight of lignin for biorefining studies // Biofuels, Bioprod. Bioref. 2014. Vol. 8. P. 836-856. DOI: 10.1002/bbb.1500.

Vardon D.R., *Franden M.A.*, *Christopher W.*, *Johnson C.W.*, *Karp E.M.*, *Michael T.*, *Guarnieri M.T.*, *Linger J.G.*, *Salm M.J.*, *Timothy J.*, *Strathmann T.J.*, *Beckham G.T.* Adipic acid production from lignin // Energy Environ. Sci. 2015. Vol. 8. P. 617–628. DOI: 10.1039/C4EE03230F.

Vardon D.R., *Rorrer N.A.*, *Salvachúa D.*, *Settle A.E.*, *Johnson C.W.*, *Menart M.J.*, *Cleveland N.S.*, *Ciesielski P.N.*, *Steirer K.X.*, *Dorgan J.R.*, *Beckham G.T.* cis, cis-Muconic acid: separation and catalysis to bioadipic acid for nylon-6,6 polymerization // Green Chem. 2016. Vol. 18. P. 3397–3413. DOI: 10.1039/C5GC02844B.

Wang H., *Ruan H.*, *Pei H.*, *Wang H.*, *Chen X.*, *Tucker M.P.*, *Cort J.R.*, *Yang B.* Biomass-derived lignin to jet fuel range hydrocarbons via aqueous phase hydrodeoxygenation // Green Chem. 2015. Vol. 7, iss. 12. P. 5131-5135. DOI: 10.1039/C5GC01534K.

Wu X., *Fan X.*, *Xie S.*, *Lin J.*, *Cheng J.*, *Zhang Q.*, *Chen L.*, *Wang Y.* Solar energy-driven lignin-first approach to full utilization of lignocellulosic biomass under mild conditions // Nature Catalysis. 2018. Vol. 1. P. 772–780. DOI: 10.1038/s41929-018-0148-8.

Wu Y., *Yang J.*, *Wu G.*, *Gao W.*, *Silva Lora E.E.*, *Isa Y.M.*, *Subramanian K.A.*, *Kozlov A.*, *Zhang S.*, *Huang Y.* Benzene, Toluene, and Xylene (BTX) Production from Catalytic Fast Pyrolysis of Biomass // ACS Sustainable Chem. Eng. 2023. №32. P. 11700–11718. DOI: 10.1021/acssuschemeng.3c01202.

Xu Z., *Jin M.* Polyhydroxyalkanoate production from lignin by *Pseudomonas putida* NX-1 // Bioresource Technology. 2021. Vol. 319. Art. no. 124210. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.124210.

Zakusilo D.N., *Evstigneyev E.I.*, *Ivanov A.Yu.*, *Mazur A.S.*, *Bessonova E.A.*, *Mammeri O.A.*, *Vasiliev A.V.* Structure of oxidized hydrolysis lignin // J. Wood Chem. Technol. 2023. Vol. 43, iss. 2. P. 103-115. DOI: 10.1080/02773813.2023.2187064.

Zhang M., *Ogale A.A.J.* Effect of temperature and concentration of acetylated-lignin solutions on dry-spinning of carbon fiber precursors // Appl. Polym. Sci. 2016. Vol. 133. Art. no. 43663. DOI: 10.1002/app.43663.

References

Adipic Acid Market Size, Share. *Fortune Business Insights: Consulting & Growth Advisory Services*. URL: https://www.fortunebusinessinsights.com/adipic-acid-market-110336 (accessed September 10, 2025).

Balakshin M., *Capanema E.A.*, *Zhu X.*, *Sulaeva I.*, *Potthast A.*, *Rosenau T.*, *Rojas O.J.* Spruce milled wood lignin: linear, branched or cross-linked? *Green Chemistry*, 2020, vol. 22, pp. 3985–4001. DOI: 10.1039/D0GC00926A.

Catenane. *Wikimedia Commons*. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Catenane_ChemComm_244_1985.jpg (accessed August 26, 2025).

Crestini C., *Melone F.*, *Sette M.*, *Saladino R.* Milled wood lignin: A linear oligomer. *Biomacromolecules*, 2011, vol. 12, pp. 3928–3935. DOI: 10.1021/bm200948r.

Evstigneyev E.I. Selective depolymerization of lignin: Assessment of yields of monomeric products. *J. Wood Chem. Technol*., 2018, vol. 38, pp. 409-415. DOI: 10.1080/02773813.2018.1500607.

Evstigneyev E.I., *Kalugina A.V*., *Ivanov A.Yu*., *Vasilyev A.V*. Contents of α-O-4 and β-O-4 bonds in native lignin and isolated lignin preparations. *J. Wood Chem. Technol*., 2017, vol. 37, pp. 294-306. DOI: 10.1080/02773813.2017.1297832.

Evstigneyev E.I., *Grinenko E.V*., *Mazur A.S*., *Vasilyev A.V*. Study of the formation of lignin hydrogels with metal cations. *J. Wood Chem. Technol*., 2021, vol. 41, iss. 2, 3, pp. 73-82. DOI: 10.1080/02773813.2021.1873389.

Fengel D., *Wegener G*. Wood. Chemistry, Ultrastructure, Reactions. Moscow: Lesn. prom-st', 1988. 512 p. (In Russ.)

Gan J., *Chen L*., *Chen Z*., *Zhang J*., *Yu W*., *Huang C*., *Wu Y*., *Zhang K.* Lignocellulosic Biomass-Based Carbon Dots: Synthesis Processes, Properties, and Applications. *Small*, 2023, vol. 19, art. no. 2304066. DOI: 10.1002/smll.202304066.

Gellerstedt G., *Li J*., *Eide I*., *Kleinert M*., *Barth T.* Chemical structures present in biofuel obtained from lignin. *Energy & Fuels*, 2008, vol. 22, pp. 4240-4244. DOI: 10.1021/ef800402f.

Griffith W.L., *Compere A.L*., *Leitten C.F*., *Shaffer J.T*. Low-cost, lignin-based carbon fiber for transportation applications. *35th ISTC Conference*. Dayton, OH, 2003, pp. 1-8.

Mainkaa H., *Tägera O*., *Körnera O*., *Hilfert L*., *Busseb S*., *Edelmannb F.T*., *Herrmannc A.S.* Lignin – an alternative precursor for sustainable and cost-effective automotive carbon fiber. *J. Mater. Res. Technol*., 2015, vol. 4, pp. 283-296. DOI: 10.1016/j.jmrt.2015.03.004.

Martínez V., *Mitjans M*., *Vinardell M.P.* Pharmacological applications of lignins and lignins related compounds: an overview. *Current Organic Chem*., 2012, vol. 16, pp. 1863-1870. DOI: 10.2174/138527212802651223.

Mastrolitti S., *Borsella E*., *Giuliano A*., *Petrone M.T*., *De Bari I*., *Gosselink R.J.A*., *van Erven G*., *Annevelink E*., *Triantafyllidis K.S*., *Stichnothe H.* Sustainable lignin valorization. IEA Bioenergy, 2021. 194 p. DOI: 10.13140/RG.2.2.34874.67520.

Nguyen N.A., *Barnes S.H*., *Bowland C.C*., *Meek K.M*., *Littrell K.C*., *Keum J.K*., *Naskar A.K.* A path for lignin valorization via additive manufacturing of high-performance sustainable composites with enhanced 3D printability. *Sci. Adv*., 2018, vol. 4, pp. 1-15. DOI: 10.1126/sciadv.aat4967.

Nimz H.H. Analytical methods in wood, pulping and bleaching chemistry. *Proc. of 8th Int. Symp. Wood and Pulp. Chem*. Helsinki, 1995, vol. 1, pp. 1-32.

Ralph J., *Lapierre C*., *Boerjan W*. Lignin structure and its engineering. *Current Opinion in Biotechnology*, 2019, vol. 56, pp. 240-249. DOI: 10.1016/j.copbio.2019.02.019.

Rinaldi R., *Jastrzebski R*., *Clough M.T*., *Ralph J*., *Kennema M*., *Bruijnincx P.C.A*., *Weckhuysen B.M*. Paving the way for lignin valorisation: recent advances in bioengineering, biorefining and catalysis. *Angew. Chem. Int. Ed*., 2016, vol. 55, pp. 8164 –8215. DOI: 10.1002/anie.201510351.

Rotaxane. *Wikipedia*. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Rotaxane_Crystal_Structure_EurJOrgChem_page2565_year1998.png (accessed August 26, 2025).

Sakakibara A. Chemistry of lignin. *Wood and Cellulosic Chemistry*. New York, 1991, pp. 111-175.

Tarabanko V.E., *Tarabanko N.* Catalytic oxidation of lignins into the aromatic aldehydes: general process trends and development prospects. *Int. J. Mol. Sci*., 2017, vol. 18, pp. 2421-2450. DOI: 10.3390/ijms18112421.

Tarasov D., *Leitch M.*, *Fatehi P.* Lignin–carbohydrate complexes: properties, applications, analyses, and methods of extraction: a review. *Biotechnol. Biofuels*, 2018, vol. 11, art. no. 269. DOI: 10.1186/s13068-018-1262-1.

Tolbert A., *Akinosho H.*, *Khunsupat R.*, *Naskar A.K.*, *Ragauskas A.J.* Characterization and analysis of the molecular weight of lignin for biorefining studies. *Biofuels*, *Bioprod. Bioref*., 2014, vol. 8, pp. 836-856. DOI: 10.1002/bbb.1500.

Vardon D.R., *Franden M.A.*, *Christopher W.*, *Johnson C.W.*, *Karp E.M.*, *Michael T.*, *Guarnieri M.T.*, *Linger J.G.*, *Salm M.J.*, *Timothy J.*, *Strathmann T.J.*, *Beckham G.T.* Adipic acid production from lignin. *Energy Environ. Sci*., 2015, vol. 8, pp. 617–628. DOI: 10.1039/C4EE03230F.

Vardon D.R., *Rorrer N.A.*, *Salvachúa D.*, *Settle A.E.*, *Johnson C.W.*, *Menart M.J.*, *Cleveland N.S.*, *Ciesielski P.N.*, *Steirer K.X.*, *Dorgan J.R.*, *Beckham G.T.* cis, cis-Muconic acid: separation and catalysis to bioadipic acid for nylon-6,6 polymerization. *Green Chem*., 2016, vol. 18, pp. 3397–3413. DOI: 10.1039/C5GC02844B.

Wang H., *Ruan H.*, *Pei H.*, *Wang H.*, *Chen X.*, *Tucker M.P.*, *Cort J.R.*, *Yang B.* Biomass-derived lignin to jet fuel range hydrocarbons via aqueous phase hydrodeoxygenation. *Green Chem*., 2015, vol. 7, iss. 12, pp. 5131-5135. DOI: 10.1039/C5GC01534K.

Wu X., *Fan X.*, *Xie S.*, *Lin J.*, *Cheng J.*, *Zhang Q.*, *Chen L.*, *Wang Y.* Solar energy-driven lignin-first approach to full utilization of lignocellulosic biomass under mild conditions. *Nature Catalysis*, 2018, vol. 1, pp. 772–780. DOI: 10.1038/s41929-018-0148-8.

Wu Y., *Yang J.*, *Wu G.*, *Gao W.*, *Silva Lora E.E.*, *Isa Y.M.*, *Subramanian K.A.*, *Kozlov A.*, *Zhang S.*, *Huang Y.* Benzene, Toluene, and Xylene (BTX) Production from Catalytic Fast Pyrolysis of Biomass. *ACS Sustainable Chem. Eng*., 2023, no. 32, pp. 11700–11718. DOI: 10.1021/acssuschemeng.3c01202.

Xu Z., *Jin M.* Polyhydroxyalkanoate production from lignin by *Pseudomonas putida* NX-1. *Bioresource Technology*, 2021, vol. 319, art. no. 124210. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.124210.

Zakusilo D.N., *Evstigneyev E.I.*, *Ivanov A.Yu.*, *Mazur A.S.*, *Bessonova E.A.*, *Mammeri O.A.*, *Vasiliev A.V.* Structure of oxidized hydrolysis lignin. *J. Wood Chem. Technol*., 2023, vol. 43, iss. 2, pp. 103-115. DOI: 10.1080/02773813.2023.2187064.

Zhang M., *Ogale A.A.J*. Effect of temperature and concentration of acetylated-lignin solutions on dry-spinning of carbon fiber precursors. *Appl. Polym. Sci*., 2016, vol. 133, art. no. 43663. DOI: 10.1002/app.43663.

Материал поступил в редакцию 26.10.2025

Евстигнеев Э.И. Достижения и проблемы химии лигнина (обзор) // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2026. Вып. 259. С. 422–459. DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.422-459

В обзоре рассмотрено современное состояние вопросов биохимии, химии, строения и валоризации второго на Земле после целлюлозы биополимера – лигнина. Отмечается эволюция взглядов на формирование макромолекул этого полимера. Как оказалось, биосинтез монолигнолов очень пластичен, что позволяет растениям заменять монолигнолы, когда функционирование одного или нескольких генов нарушено, так что состав и количество лигнина часто одновременно изменяются. Помимо канонических монолигнолов (кониферилового, синапового и кумарового спиртов), в биосинтезе лигнина могут участвовать и другие соединения. В клетке ведется тщательный контроль за подачей монолигнолов и условиями полимеризации, однако этот контроль не следует путать с контролем сборки полимера лигнина. Приводятся наиболее перспективные направления валоризации технических лигнинов: гидрогели лигнина, использование лигнина в медицине и фармакологии, 3D-печать, углеродные волокна, биотопливо и биоуголь, наноматериалы из лигнина, композиционные материалы и производные лигнина, углеродные квантовые точки, реагент для буровых растворов, синтез лигнофенолоформальдегидных смол. В заключение рассмотрены экономические проблемы валоризации лигнина.

Ключевые слова: лигнин, биосинтез, строение, валоризация.

Evstigneyev E.I. Achievements and problems of lignin chemistry. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2026, iss. 259, pp. 422–459 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.422-459

This review examines the current state of the biochemistry, chemistry, structure, and valorization of lignin, the second most abundant biopolymer on Earth after cellulose. The evolution of views on the formation of this polymer's macromolecules is noted. As it turns out, monolignols are highly flexible in their biosynthesis, allowing plants to replace monolignols when the functioning of one or more genes is disrupted, so the composition and quantity of lignin often change simultaneously. In addition to the canonical monolignols (coniferyl, sinapic, and coumaric alcohols), other compounds can participate in lignin biosynthesis. The supply of monolignols and polymerization conditions are carefully controlled within the cell, but this control should not be

confused with the control of lignin polymer assembly. The most promising areas for the valorization of technical lignins are presented: lignin hydrogels, the use of lignin in medicine and pharmacology, 3D printing, carbon fibers, biofuels and biochar, lignin nanomaterials, composite materials and lignin derivatives, carbon quantum dots, a reagent for drilling fluids, and the synthesis of lignophenol-formaldehyde resins. In conclusion, the economic problems of lignin valorization are considered.

K e y w o r d s : lignin, biosynthesis, structure, valorization.

ЕВСТИГНЕЕВ Эдуард Иванович – профессор кафедры технологии химической переработки биомассы дерева Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор химических наук.

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

EVSTIGNEYEV Eduard I. – DSc (Chemical), Professor, Department of Technology of Chemical Processing of Wood Biomass, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: ed-ward_evst@mail.ru

УДК 676.2.052

В.Д. Бутусов, Е.Г. Смирнова

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЕЗВОЖИВАНИЯ НА СЕТОЧНОМ СТОЛЕ БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ ПРИ ВЫРАБОТКЕ БУМАГИ РАЗЛИЧНОЙ МАССОЕМКОСТИ

Введение. Анализ процесса обезвоживания – это эффективный способ оценки работы сеточной части бумагоделательной машины. [Савина и др., 1996] показали изменения в работе сеточной части машины после её модернизации. Также анализ процесса обезвоживания можно применять для оценки способности массы к обезвоживанию под влиянием того или иного технологического фактора. Авторы [Кауров, Кокушин, 2007] описали процесс обезвоживания на гидропланках с учётом прогиба формующей сетки. Анализ процесса обезвоживания позволяет собирать данные, необходимые для моделирования процесса обезвоживания и формования в регистровой части сеточного стола, и получать зависимости от различных величин. Также он позволяет показать эффективность работы обезвоживающих элементов. В заметке [Vibrating…, 2003] показаны изменения в режиме работы сеточного стола после его оснащения дополнительным обезвоживающим элементом.

Цель исследования – изучение процесса обезвоживания в сеточной части бумагоделательной машины при выработке бумаги с различной массой 1 м^2.

Материалы и методика исследования. Измерение массы суспензии на формующей сетке производили при помощи микроволнового прибора FiberscanOne от фирмы Kristini. Измерения производятся при помощи микроволнового датчика, располагающегося на конце штанги прибора. Общие принципы работы прибора описаны в электронном ресурсе производителя оборудования [Cristini…, 2025]. Расчет материального баланса сеточной части осуществлен при помощи специализированного программного обеспечения – программы Dragon, разработанной фирмой Andritz.

Концентрацию бумажной массы в напорном ящике и содержание волокна в регистровых водах определяли согласно ГОСТ Р 50068-92 «Волокнистые полуфабрикаты. Ускоренный метод определения концентрации массы». Степень помола бумажной массы в напорном ящике определена согласно ГОСТ 14363.4-89 «Целлюлоза. Подготовка проб к физико-механическим испытаниям».

Результаты исследования. В ходе исследования работы БДМ-N был изучен процесс обезвоживания на сеточном столе при выработке бумаги с различной массой 1 м^2 – 100, 125 и 160 г. Также собрана информация о настройках работы сеточной части при выработке данной продукции. Схема сеточной части с обозначением точек замеров веса бумажной массы на формующей сетке представлена на рис. 1.

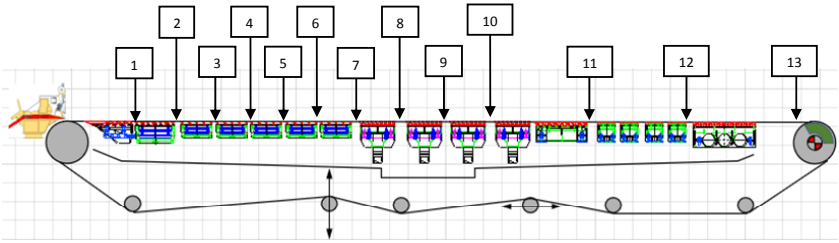


Рис. 1. Схема формующей части БДМ-N с обозначением точек замеров веса бумажной массы на сетке. 1 – пакет грудной доски, 2 – пакет гидропланок конструкции Multifoil, 3-7 – пакеты гидропланок, 8-10 – мокрые отсасывающие ящики, 10-11 – мокрый отсасывающий ящик+ пакет среднего вакуума, 11-12 – сухие отсасывающие ящики, 13 – трёхкамерный пакет высокого вакуума конструкции Hivac

Fig. 1. Scheme of the forming section of the PM-N with the designation of the points for measuring the dryness of the web. 1 – forming board, 2 – Multifoil package, 3-7 – hydrofoil packages, 8-10 – wet suction boxes, 10-11 – wet suction box + medium vacuum box, 11-12 – dry suction boxes, 13 – three-chamber high vacuum box of the Hivac design

Ширина измерительного датчика прибора FiberScanOne составляет 65 мм, что превышает расстояние между некоторыми обезвоживающими элементами. Таким образом, не было возможности проведения замеров сухости полотна после каждого из элементов. Масса суспензии на сетке после гауч-вала не была замерена, поскольку на данной БДМ отсутствует сеткоповоротный вал. Последний обезвоживающий элемент, после которого была замерена сухость, – это трёхкамерный пакет высокого вакуума конструкции Hivac. [Bajpai, 2018] подробно описал работу данного обезвоживающего элемента и его ключевые особенности. Такие вакуумные пакеты устанавливают в конце сеточного стола прямо перед гауч-валом. При прохождении бумажным полотном однокамерных отсасывающих ящиков происходит процесс обратного увлажнения на открытых участках. Данный процесс обусловлен миграцией воды из ячеек формующей сетки обратно в бумажное полотно. [McDonald, 1999] описал данный процесс и его механизм. Основная цель – это достижение максимального значения сухости полотна после прохождения сеточной части. Применение пакетов высокого вакуума конструкции Hivac

позволяет достигать максимальных значений сухости благодаря нейтрализации данного эффекта. [Кугушев и др., 2000] также описали устройство и принцип работы других обезвоживающих элементов сеточного стола.

Как видно из табл. 1, при увеличении массы 1 м^2 выпускаемой продукции из 100%-ной макулатуры производительность БДМ-N менялась незначительно. При выработке бумаги с массой 1 м^2 в 125 г производительность была наибольшей. При этом снижается скорость движения формующей сетки, поскольку в ином случае сеточный стол не справится с задачей по удалению такого количества воды. Точка падения струи – это участок формующей сетки, на который осуществляется массонапуск. При выработке бумаги с массой 1 м^2 в 100 и 125 г она располагалась за передней гранью грудной планки. Из-за этого значение первичного обезвоживания на пакете грудной доски было существенно ниже.

Таблица 1

Основные параметры работы БДМ-N

Main operating parameters of PM-N

Масса 1 м^2, г	100	125	160
Точка падения струи, мм	за передней гранью грудной планки	за передней гранью грудной планки	10
Удержание волокна, %	93,1	92,8	94,8
Концентрация в напорном ящике, %	0,76	0,62	0,57
Концентрация подсеточной воды, %	0,055	0,045	0,030
Скорость массонапуска, м/мин	284,6	245,0	188,6
Скорость формующей сетки, м/мин	290,4	250,4	190,5
Коэффициент напуска	0,98	0,98	0,99
Расположение сухой линии	Вакуумный пакет Enervac	Вакуумный пакет Enervac	2-й сухой отсасывающий ящик
Скорость на накате	309,0	262,5	195,5
Производительность, т/ч	3,89	4,15	3,94
Степень помола, °ШР	53-55	63	58
Влажность, %	6,8	6,9	6,5

При выработке бумаги с массой 1 м^2, равной 160 г, точка падения струи располагалась перед грудной планкой. В обоих случаях такая настройка точки падения струи была вызвана необходимостью в повышении качества формования. При выработке продукции с меньшей массой 1 м^2, соответственно,

100 и 125 г, концентрация массы в напорном ящике была выше, чем при выработке бумаги с массой 1 м^2, равной 160 г. В последнем случае точка падения струи была настроена таким образом, чтобы первичное обезвоживание было высоким. Удержание волокна при выработке бумаги с массой 1 м^2, равной 100 и 125 г, составило 93,1% и 92,8% соответственно. При выработке бумаги с массой 1 м^2, равной 160 г, общее удержание было несколько выше и составило 94,8%, что обусловлено меньшей турбулентностью в зоне формования из-за более низкой скорости движения формующей сетки, а также более высокой массой 1 м^2 и толщиной слоя волокон.

Фотография на рис. 2 была выполнена с лицевой стороны БДМ. На снимке отображено пространство между грудным валом и передней гранью грудной планки.

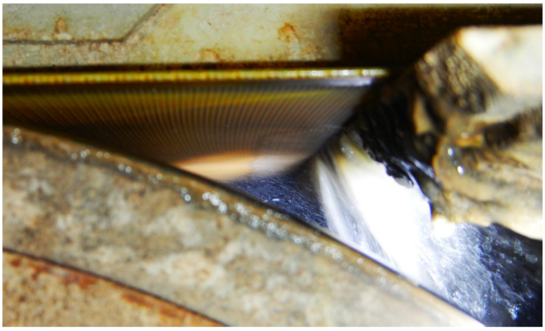


Рис. 2. Точка падения струи при выработке бумаги с массой 160 г/м^2

Fig. 2. The point of impact of the jet when producing paper with a weight of 160 g/m^2

На рис. 3 представлена диаграмма, на которой показано обезвоживание на каждой замеренной позиции сеточного стола. Обезвоживание, выраженное в %, – это доля воды, удаляемой на элементе, от общего количества воды, содержащейся в бумажной массе.

Наибольшее обезвоживание на пакете грудной доски было зафиксировано при выработке бумаги массой 160 г/м^2. При выработке бумаги массой 100 г/м^2 значение первичного обезвоживания составило 7,8%, а при выработке бумаги массой 125 г/м^2 – 6,5%. Наибольший показатель данной величины зафиксирован при выработке бумаги массой 160 г/м^2 – 31,3% (табл. 2).

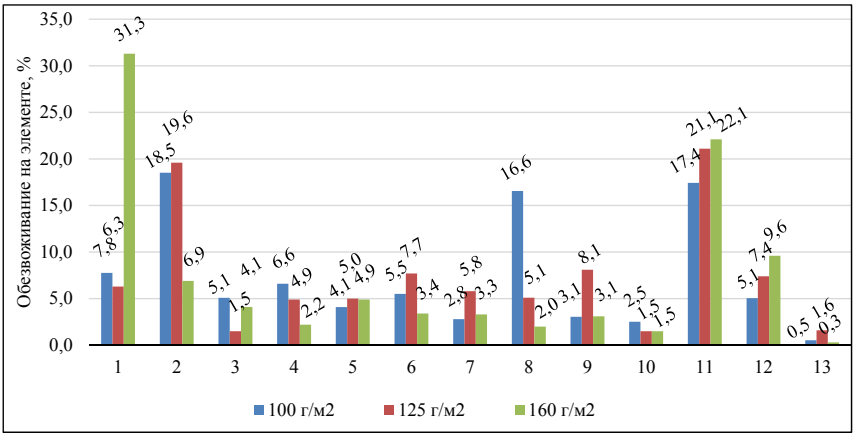


Рис. 3. Обезвоживание на элементе
Fig. 3. Dehydration on the element

Таблица 2

Значение обезвоживания по зонам сеточного стола при выработке бумаги с различной массой 1м^2
Dehydration value by wire table zones during the production of paper with different 1m^2 weight

Номер точки замера	Обезвоживающие элементы	Зона сеточного стола	Масса 1м^2 выпускаемой бумаги, г		
			100	125	160
			Обезвоживание, %		
1	Пакет грудной доски	Регистровая часть	7,8	6,3	31,3
2-7	Пакет Multifoil – 5-й пакет гидропланок	Регистровая часть	42,6	44,5	24,8
8-10	1-й–3-й мокрые отсасывающие ящики	Зона низкого вакуума	22,1	14,7	6,6
11	4-й мокрый отсасывающий ящик+ пакет среднего вакуума	Зона среднего вакуума	17,4	21,1	22,1
12-13	Мокрые отсасывающие ящики + пакет высокого вакуума	Зона высокого вакуума	5,6	9,0	9,9

Как показано в табл. 2, обезвоживание в регистровой части при производстве бумаги массой 100 и 125 г/м^2 было наибольшим. Это обусловлено низким

значением первичного обезвоживания. При производстве бумаги массой 160 г/м^2 значение первичного обезвоживания было существенно выше, поэтому значение обезвоживания в регистровой части было ниже, чем при производстве бумаги массой 100 и 125 г/м^2. С увеличением массы 1 м^2 бумаги снизилось значение обезвоживания в зоне низкого вакуума, что обусловлено увеличением сопротивлению фильтрации из-за роста толщины волокнистого слоя. Обезвоживание в зоне среднего вакуума при производстве всех трёх видов продукции различалось незначительно. Самое низкое обезвоживание в зоне высокого вакуума замерено при производстве бумаги с наибольшей массой.

Как показано на рис. 4, наибольшая сухость бумажного полотна достигалась при выработке бумаги с наиболее низким значением массы 1 м^2, т. е. 100 г/м^2. Так, к концу сеточного стола значение сухости достигало 15,76%. Это обусловлено тем, что более тонкий слой волокон обезвоживается легче. Наиболее низкая сухость зафиксирована при выработке бумаги с наибольшей массой.

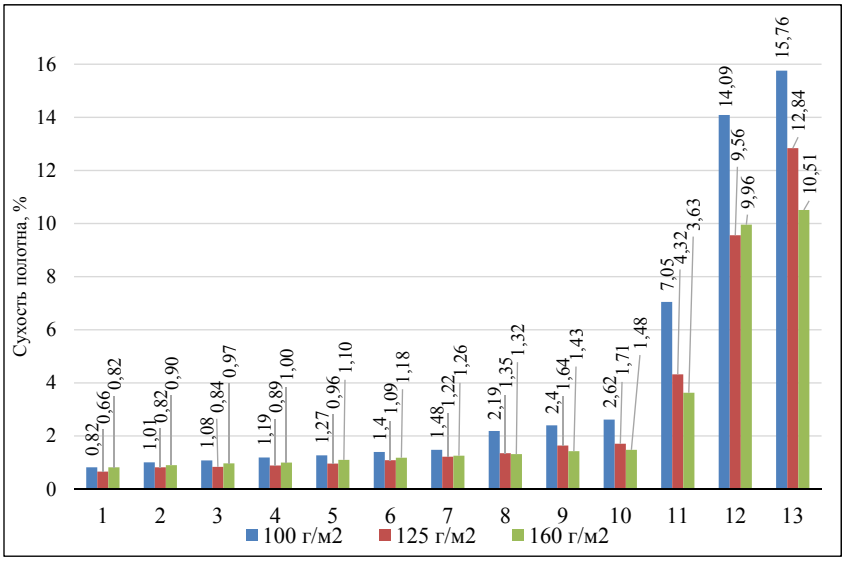


Рис. 4. Сухость бумажного полотна на сеточном столе при выработке бумаги массой 100, 125 и 160 г/м^2

Fig. 4. Dryness of the paper web on the wire table during paper production weighing 100, 125 and 160 g/m2

Таким образом, при выработке бумаги с массой 1 м^2, равной 160 г/м^2, значение сухости перед гауч-валом составило 10,51%. Далее процесс обезвоживания проходит на гауч-вале, однако вес бумажной массы на формующей сетке после данного элемента замерен не был. Также при увеличении массы выпускаемой продукции происходило смещение сухой линии по направлению движения полотна. Так, при выработке продукции массой 100 и 125 г/м^2 сухая линия находилась на вакуумном пакете Enervac. При выработке продукции массой 160 г/м^2 сухая линия находилась на втором сухом отсасывающем ящике. При обезвоживании бумажного полотна на отсасывающих ящиках можно выделить два периода обезвоживания – путём сжатия волокнистого слоя волокон под действием слабого вакуума и под действием воздушного потока, проходящего сквозь бумажное полотно. Механизм данного процесса описали [Åslund, Vomhoff, 2008]. Сообщается [Технология…, 2005], что сухость бумажного полотна после первого периода обезвоживания может составлять 6-8%. Границу перехода первого периода обезвоживания во второй можно проследить посредством так называемой сухой линии.

Рис. 5. Сухая линия при выработке бумаги массой 100 г/м^2
Fig. 5. Dry line for the production of 100 g/m2 paper

На рис. 5 показана сухая линия, зафиксированная при выработке бумаги массой 100 г/м^2. Сухая линия располагалась на пакете среднего вакуума конструкции Enervac. Значение сухости после данного элемента составило 7,05%.

Заключение

1. При перемещении точки падения струи за переднюю грань грудной доски снижается величина первичного обезвоживания. При этом возрастает

величина обезвоживания на пакете гидропланок, следующем за пакетом грудной доски;

2. При понижении концентрации бумажной массы в напорном ящике концентрация твердых веществ в регистровой воде снижается пропорционально;

3. При увеличении массы 1 м^2 выпускаемой продукции производительность БДМ незначительно изменяется, показывая максимальное значение при производстве бумаги со средней массой 1 м^2. В данном случае это 125 г/м^2;

4. При увеличении массы 1 м^2 выпускаемой продукции скорость движения формующей сетки пропорционально снижается. При этом понижается значение сухости полотна после прохождения сеточного стола. Расположение сухой линии меняется. При увеличении массы 1 м^2 выпускаемой продукции сухая линия сдвигается по направлению движения полотна.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Кауров П.В., *Кокушин Н.Н.* Расчет обезвоживания бумажной массы на гидропланках с учетом прогиба сетки // Машины и аппараты целлюлозно-бумажного производства: межвуз. сб. науч. тр. СПб., 2007. С. 6-9.

Кугушев И.Д., *Терентьев А.О*., *Кокушин Н.Н*., *Швецов А.О.* Сеточные части бумаго- и картоноделательных машин. СПб.: СПБГТУРП, 2000. 98 с.

Савина Т.Е., *Агеев А.Я*., *Парти А.И*., *Жвирблите А.К.* Анализ обезвоживающей способности сеточного стола бумагоделательной машины до и после модернизации // ИВУЗ. Лесной журнал. 1996. №4-5. С. 149-152.

Технология целлюлозно-бумажного производства. В 3 т. Т. II. Производство бумаги и картона. Ч. 1. Технология производства и обработки бумаги и картона. СПб.: Политехника, 2005. 423 с.

Åslund P., *Vomhoff H.* Dewatering mechanisms and their influence on suction box dewatering processes – a literature review // Nordic Pulp and Paper Research Journal. 2008. Vol. 23, no. 4. P. 389-397. DOI: 10.3183/npprj-2008-23-04-p389-397.

Bajpai P. Biermann's Handbook of Pulp and Paper: Raw Material and Pulp Making. 3rd ed. Elsevier, 2018. 668 p.

Cristini FiberScan One – Microwave Consistency Meter // Cristini Group Paper Machine Clothing, Department of physics of the microwave, University of Florence. URL: https://www.tappi.org/content/events/11papercon/documents/Cristini%20pptA.pdf (дата обращения: 18.06.2025).

McDonald D. Web rewetting by forming fabrics // TAPPI Process and Product Quality Conference & Trade Fair. Anaheim, USA, 1999. P. 597-599.

Vibrating foil improves paper properties, Solutions!, Online Exclusives // TAPPI. 2003. URL: https://imisrise.tappi.org/TAPPI/Products/03/OCT/03OCTOE01.aspx (дата обращения: 19.05.2026).

References

Åslund P., *Vomhoff H.* Dewatering mechanisms and their influence on suction box dewatering processes – a literature review. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 2008, vol. 23, no. 4, pp. 389-397. DOI: 10.3183/npprj-2008-23-04-p389-397.

Bajpai P. Biermann's Handbook of Pulp and Paper: Raw Material and Pulp Making. 3rd ed. Elsevier, 2018. 668 p.

Cristini FiberScan One – Microwave Consistency Meter. *Cristini Group Paper Machine Clothing*, *Department of physics of the microwave*, *University of Florence*. URL: https://www.tappi.org/content/events/11papercon/documents/Cristini%20pptA.pdf (accessed June 18, 2025).

Kaurov P.V., *Kokushin N.N.* Calculation of dewatering of paper pulp on hydroplanes, taking into account the deflection of the forming wire. *Machines and apparatuses of pulp and paper production*: interuniversity collection of sci. works. St. Petersburg, 2007, pp. 6-9. (In Russ.)

Kugushev I.D., *Terentyev A.O*., *Kokushin N.N*., *Shvetsov A.O*. Forming parts of paper and paperboard machines. St. Petersburg: SPBGTURP, 2000. 98 p. (In Russ.)

McDonald D. Web rewetting by forming fabrics. *TAPPI Process and Product Quality Conference & Trade Fair*. Anaheim, USA, 1999, pp. 597-599.

Savina T.E., *Ageev A.Ya*., *Partie A.I*., *Zhvirblite A.K*. Analysis of the dehydrating ability of the grid table of a paper machine before and after modernization. *IVUZ. Lesnoy zhurnal*, 1996, no. 4-5, pp. 149-152. (In Russ.)

The technology of pulp and paper production. In 3 vols. Vol. II. Production of paper and paperboard. Part 1. Technology of production and processing of paper and paperboard. St. Petersburg: Polytechnic, 2005. 423 p. (In Russ.)

Vibrating foil improves paper properties, Solutions!, Online Exclusives. *TAPPI*. 2003. URL: https://imisrise.tappi.org/TAPPI/Products/03/OCT/03OCTOE01.aspx (accessed May 19, 2026).

Материал поступил в редакцию 31.10.2025

Бутусов В.Д., Смирнова Е.Г. Исследование процесса обезвоживания на сеточном столе бумагоделательной машины при выработке бумаги различной массоемкости // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2026. Вып. 259. С. 460–470. DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.460-470

В сеточной части бумагоделательной машины удаляется порядка 95-99% воды, содержащейся в бумажной массе. Помимо удаления воды, в сеточной части осуществляется процесс формования бумажного полотна, в ходе которого предопределяется структура бумажного полотна и его свойства. Исследование работы сеточной части произведено на бумагоделательной машине, производящей бумагу для производства гофрокартона. В ходе данного исследования изучен процесс обезвоживания на сеточном столе при выработке

бумаги с массой 1 м^2, равной 100, 125 и 160 г. Информация об обезвоживании на сеточном столе получена при помощи прибора FiberScanOne от итальянской фирмы Cristini. Данный прибор позволяет измерять вес бумажной массы на сетке при помощи микроволнового датчика. Данные об обезвоживании были обработаны и рассчитаны в специализированном программном обеспечении – программе Dragon, разработанной фирмой Andritz. В ходе исследования показаны различия в динамике процесса обезвоживания при выработке бумаги с различной массой 1 м^2 на одной машине. Установлено, что при повышении массы 1 м^2 происходит снижение сухости бумажного полотна после прохождения сеточной части, а также смещение сухой линии по направлению движения бумажного полотна. Показано, что при снижении величины первичного обезвоживания на пакете грудной доски происходит увеличение значения обезвоживания на пакете гидропланок, следующем за ним. Также показано, что при увеличении массы 1 м^2 производимой бумаги производительность бумагоделательной машины изменяется незначительно. Производительность машины наименьшая при производстве бумаги с наибольшим и наименьшим значением массы 1 м^2. При производстве бумаги со средним значением массы 1 м^2 производительность была наибольшей.

Ключевые слова: сеточная часть, формующая часть, обезвоживание в сеточной части, формование, плоскосеточная бумагоделательная машина.

Butusov V.D., Smirnova E.G. Study of the dehydration process on the forming part of the paper machine during the production of paper of different mass capacities. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2026, iss. 259, pp. 460–470 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2026.259.460-470

In the forming part of the paper machine, about 95-99% of the water contained in the paper pulp is removed. In addition to removing water, the paper web is formed in the mesh part, during which the structure of the paper web and its properties are predetermined. The study of the work of the forming part was carried out on a paper machine that produces paper for the production of corrugated cardboard. In the course of this study, the process of dehydration on a forming part during the production of paper with a mass of 1 m^2 equal to 100, 125 and 160 g was studied. Information about dehydration on the forming part was obtained using the FiberScanOne device from the Italian company Cristini. This device allows to measure the weight of paper pulp on a forming wire using a microwave sensor. The dehydration data was processed and calculated in specialized software – the Dragon program developed by Andritz. The study shows differences in the dynamics of the dewatering process during the production of paper with different weights of 1 m^2 on one machine. It was found that with an increase in the mass of 1 m^2, the dryness of the paper web decreases after passing through the forming part, as well as the displacement of the dry line in the direction of movement of the paper web. It is shown that with a decrease in the value of primary

dehydration on the chest board box, there is an increase in the value of dehydration on the hydroplane box following it. It is also shown that with an increase in the mass of 1 m^2 of paper produced, the productivity of paper machine changes slightly. Thus, the productivity of the paper machine is the lowest in the production of paper with the highest and lowest mass of 1 m^2. In the production of paper with an average weight of 1m2, the productivity of paper machine was the highest.

K e y w o r d s : wire part, forming part, dehydration in forming part, forming, flat-wire papermaking machine.

БУТУСОВ Владимир Денисович – аспирант кафедры технологии бумаги и картона Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна.

198095, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: smirnovalta@gmail.com

BUTUSOV Vladimir D. – PhD student, Department of Paper and Paperboard Technology, St. Petersburg State University of Industrial Technology and Design.

198095. Ivana Chernykh str. 4. St. Petersburg. Russia. E-mail: smirnovalta@gmail.com

СМИРНОВА Екатерина Григорьевна – заведующий кафедрой технологии бумаги и картона Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, доктор технических наук, профессор. ORCID: 0000-0002-8482-0684.

198095, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: smirnovalta@gmail.com

SMIRNOVA Ekaterina G. – DSc (Technical), Head of the Department of Paper and Paperboard Technology, St. Petersburg State University of Industrial Technology and Design, Professor. ORCID: 0000-0002-8482-0684.

198095. Ivana Chernykh str. 4. St. Petersburg. Russia. E-mail: smirnovalta@gmail.com

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 5

1. ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

Захаров В.П.*, *Коротков С.А. Потенциал естественного возобновления леса и рекомендации по его использованию в условиях Восточного Подмосковья 6

Пукинская Л.Ю.*, *Пукинская М.Ю. Анализ структуры гнездовых территорий, элементы экологии и рекомендации по сохранению малого подорлика *Clanga pomarina* в Псковской области в условиях природопользования 30

Громов Н.П. Историко-архивное исследование усадьбы Штиглицев в Краморском урочище 51

Ефременко А.А.*, *Демидко Д.А.*, *Кириченко Н.И.*, *Пономарев В.И.*, *Баранчиков Ю.Н. Инвазия полиграфа уссурийского *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) на Урале 73

Ярмишко В.Т.*, *Игнатьева О.В. Виталитетная структура вторичных сосняков в центральной части Кольского полуострова 97

Хлюстов В.К.*, *Кокорин С.Г.*, *Ганихин А.М. Комплексное ресурсно-экологическое районирование лесов на основе многомерного статистического анализа 111

Брынцев В.А.*, *Коженкова А.А.*, *Некляев С.Э.*, *Рысин С.Л. Состояние уникального насаждения тсуги канадской и его микобиоты в дендрарии ГБС РАН 125

Зайцев Д.А.*, *Данилов Д.А.*, *Навалихин С.В.*, *Тюрин Д.С. Определение зависимостей между структурными элементами надземной фитомассы сосны и ели при интенсивном выращивании 144

Алексеев А.С.*, *Шариф Д. Анализ и оценка результатов прогноза динамики лесного фонда Ленинградской области по модели EFISCEN 159

Цуварёва Н.А.*, *Иришина Е.И.*, *Фоминых М.Б.*, *Кашафеев И.Р.*, *Бикетова С.В. Влияние ценотического окружения на состояние дерева в парковых сообществах 175

Добровольский А.А.*, *Валиев И.Н. Частное лесовладение на землях сельскохозяйственного назначения в российской федерации: правовые основы и перспективы развития 195

2. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ЛЕСОЗАГОТОВОК

Королько А.С.*, *Королько Н.С.*, *Свойкин Ф.В.*, *Игнатова Е.И.*, *Россихин К.В.*, *Денисова Е.В.*, *Божбов В.Е. Исторические аспекты и современное состояние канатных установок для разных отраслей промышленности 215

Галактионов О.Н.*, *Шадрин Р.А.*, *Алешин И.С. О влиянии насыщенности лесосеки объектами биоразнообразия на производительность лесозаготовительной техники 237

Рогулин Р.С. Линейная модель двухэшелонной транспортировки в лесопромышленном комплексе на транспортном графе с транзитными вершинами 260

Гилязова Т.А.*, *Рукомойников К.П. Учет кинематических ограничений и недоступности деревьев в агентной модели валочно-пакетирующей машины для несплошных рубок 276

Гнусов М.А.*, *Зимарин С.В.*, *Дручинин Д.Ю.*, *Черенков Д.С. Определение параметров комбинированного лесного плуга для нераскорчеванных вырубок 290

Посыпанов С.В.*, *Калитин Н.С.*, *Зарипов Ш.Г. Обоснование параметров гребных винтов буксировочного устройства для транспортировки малогабаритных лесотранспортных единиц 306

Охапкин Т.А.*, *Андронов А.В.*, *Кацадзе В.А.*, *Кондратюк В.А. Сравнение и анализ различных механизмов захватного устройства харвестерных головок 322

3. ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ, ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЕРЕВОПЕРЕРАБОТКИ

Макаров В.Е. Анализ эффективности работы экспериментально-лабораторной установки по разделению древесных частиц по степени смолистости 345

Федяев А.А.*, *Теплякова А.В.*, *Откидычева Е.В.*, *Соловьева А.Д.*, *Юркова О.В.*, *Чубинский А.Н. Влияние сучков на прохождение ультразвука в древесине 359

Вохмянин Н.А.*, *Угрюмов С.А.*, *Тарабан М.В. Обоснование выбора приоритетных направлений использования низкотоварной древесины лесопромышленного комплекса «SHELON» 375

4. ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ. БИОТЕХНОЛОГИЯ

Вураско А.В.*, *Агеев М.А.*, *Шерстобитов А.Л.*, *Губанов И.А. Изучение влияния добавления натронной целлюлозы из костры конопли в композицию тароупаковочных видов бумаги 390

Содиков И.С.*, *Щербак Н.В. Получение и изучение свойств волокнистого полуфабриката из стеблей хлопчатника натронным способом варки 404

Евстигнеев Э.И. Достижения и проблемы химии лигнина (обзор) 422

Бутусов В.Д.*, *Смирнова Е.Г. Исследование процесса обезвоживания на сеточном столе бумагоделательной машины при выработке бумаги различной массоемкости 460

CONTENTS

Preface 5

1. FORESTRY

Zakharov V.P.*, *Korotkov S.A. The potential of natural forest renewal and recommendations for its use in the conditions of the Eastern Moscow region 6

Pukinskaya L.Y.*, *Pukinskaya M.Y. Analysis of the structure of nesting areas, elements of ecology and recommendations for the conservation of the lesser spotted eagle *Clanga pomarina* in the Pskov region in the context of nature management 30

Gromov N.P. Historical and Archival Research of the Stieglitz Estate in the Kramorsky Tract 51

Efremenko A.A.*, *Demidko D.A.*, *Kirichenko N.I.*, *Ponomarev V.I.*, *Baranchikov Yu.N. Invasion of the four-eyed fir bark beetle (*Polygraphus proximus* Blandford) (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) in the Urals 73

Yarmishko V.T.*, *Ignatieva O.V. Vital structure of secondary pine forests in the central part of the Kola Peninsula 97

Khlyustov V.K.*, *Kokorin S.G.*, *Ganikhin A.M. Complex Resource and Ecological Zoning of Forests Based on Multivariate Statistical Analysis 111

Bryntsev V.A.*, *Kozhenkova A.A.*, *Nekliaev S.E.*, *Rysin S.L. The state of the unique stand of Canadian hemlock and its mycobiota in the arboretum of the MBG RAS 125

Zaitsev D.A.*, *Danilov D.A.*, *Navalikhin S.V.*, *Tyurin D.S. Determination of dependencies between structural elements of aboveground phytomass of pine and spruce under intensive cultivation 144

Alekseev A.S.*, *Shareef D. Analysis and evaluation of the results of forecasting the dynamics of the Leningrad region forest fund using the EFISCEN model 159

Tsuvareva N.A.*, *Irishina E.I.*, *Fominykh M.B.*, *Kashafeev I.R.*, *Biketova S.V. Influence of the cenotic environment on the condition of a tree in park communities 175

Dobrovolsky A.A.*, *Valiev I.N. Private Forest Ownership on Agricultural Lands in the Russian Federation: Legal Framework and Development Prospects 195

2. TECHNOLOGY AND EQUIPMENT OF LOGGING INDUSTRIES

Korolko A.S.*, *Korolko N.S.*, *Svoikin F.V.*, *Ignatova E.I.*, *Rossikhin K.V.*, *Denisova E.V.*, *Bozhbov V.E. Historical aspects and current state of rope systems for various industries 215

Galaktionov O.N.*, *Shadrin R.A.*, *Alyoshin I.S. On the effect of saturation of a cutting area with biodiversity objects on the productivity of logging equipment 237

Rogulin R.S. Linear Model of Two-Echelon Transportation in the Forest Industry on a Transport Graph with Transit Nodes 259

Gilyazova T.A.*, *Rukomojnikov K.P. Incorporating Kinematic Constraints and Tree Inaccessibility into an Agent-Based Model of a Feller-Buncher Operating under Partial Harvesting Regimes 276

Gnusov M.A.*, *Zimarin S.V.*, *Druchinin D.Yu.*, *Cherenkov D.S. Determination of parameters of a combined forest plow for unstumped clearings 290

Posypanov S.V.*, *Kalitin N.S.*, *Zaripov Sh.G. Justification of the parameters of the propellers of a towing device for the transportation of small-sized timber-transport units 306

Okhapkin T.A.*, *Andronov A.V.*, *Katsadze V.A.*, *Kondratyuk V.A. Comparison and analysis of various mechanisms of the gripping device of harvester heads 322

3. WOOD SCIENCE. MECHANICAL WOODWORKING INDUSTRY

Makarov V.E. Analysis of the efficiency of the experimental laboratory setup for separating wood particles by resin content 345

Fedyaev A.A.*, *Teplyakova A.V.*, *Otkidycheva E.V.*, *Solovyeva A.D.*, *Yurkova O.V. Chubinsky A.N. The effect of knots on the passage of ultrasound in wood 359

Вохмянин Н.А.*, *Угрюмов С.А.*, *Тарабан М.В. Обоснование выбора приоритетных направлений использования низкотоварной древесины лесопромышленного комплекса «SHELON» 375

5. CHEMICAL TECHNOLOGY OF WOOD. BIO TECHNOLOGY

Vurasko A.V.*, *Ageev M.A.*, *Sherstobitov A.L.*, *Gubanov I.A. Study of the effect of adding sodium cellulose from cannabis straw to the composition of packaging types of paper 390

Sodikov I.S.*, *Shcherbak N.V. Obtaining and studying the properties of a fibrous semi-finished product from cotton stems using the soda cooking method 404

Evstigneyev E.I. Achievements and problems of lignin chemistry 422

Butusov V.D.*, *Smirnova E.G. Study of the dehydration process on the forming part of the paper machine during the production of paper of different mass capacities 460

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Научное издание

ИЗВЕСТИЯ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКОЙ АКАДЕМИИ

Выпуск 259

Издаются с 1886 года

Редактор В.Н. Добронравина

Компьютерная верстка Е.А. Корнуковой

Подписано в печать с оригинал-макета 20.07.2026. Выход в свет 24.08.2026. Формат 150*210.
Печать цифровая. Уч.-изд. л. 29,75. Печ. л. 29,75. Тираж 500 экз. Заказ № 125 С 237 Свободная цена

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет
имени С.М. Кирова
Издательско-полиграфический отдел СПбГЛТУ
194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., 5, литер У