

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 255

Издаются с 1886 года

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2025

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

А.А. Добровольский, канд. с.-х. наук, доц., СПбГЛТУ

Ответственный секретарь

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

Члены совета

А.В. Жигунов, д-р с.-х. наук, проф., СПбГЛТУ,

А.В. Васильев, д-р хим. наук, проф., СПбГЛТУ, СПбГУ,

А.В. Селиховкин, д-р биол. наук, проф., СПбГЛТУ, СПбГУ,

А.Н. Чубинский, д-р техн. наук, проф., СПбГЛТУ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

В.А. Александров, д-р техн. наук, проф., СПбГЛТУ, УГТУ,

А.С. Алексеев, д-р геогр. наук, проф., СПбГЛТУ,

М.Н. Белгасем, д-р хим. наук, проф., Гренобльский технологический институт,

Н.В. Беляева, д-р с.-х. наук, проф., СПбГЛТУ,

А.В. Васильев, д-р хим. наук, проф., СПбГЛТУ, СПбГУ,

Н.В.К. Вебер, д-р с.-х. наук, проф., Дрезденский технический университет (Германия),

А.Ю. Виноградов, д-р техн. наук, проф., СПбГЛТУ,

Е.В. Голосова, д-р с.-х. наук, проф., ФГБУН «Ордена труда 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. Евтигиев, д-р хим. наук, профессор, Университет Авеиры (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. Пронинич, д-р биол. наук, Академия Або,

В.Г. Санаев, д-р техн. наук, проф., БГТУ им. Н.Э. Баумана,

А.В. Селиховкин, д-р биол. наук, проф., СПбГЛТУ, СПбГУ,

А.П. Соколов, д-р техн. наук, проф., ПетрГУ,

С.А. Угрюмов, д-р техн. наук, проф., СПбГЛТУ,

Л.В. Уткин, д-р техн. наук, проф., СПбПУ, СПбГЛТУ,

Д.М. Черниховский, д-р с.-х. наук, доц., СПбГЛТУ,

А.Н. Чубинский, д-р техн. наук, проф., СПбГЛТУ,

А.П. Смирнов, д-р с.-х. наук, проф., СПбГЛТУ,

Е.Г. Хитров, д-р техн. наук, СПбГЛТУ, СПбПУ,

А.В. Шеломов, д-р техн. наук, СПбГЛТУ,

Р.В. Щекалев, д-р с.-х. наук, СПбГЛТУ,

В.Т. Ярнишко, д-р биол. наук, проф., СПбГЛТУ, БИН РАН

Адрес редакции, издателя,

типорграфия: 194021, г. Санкт-Петербург, Институтский пер., д. 5, литер У. Сайт организации: www.spbfu.ru

Факс: (812) 670-93-90.

Сайт издания: izvestiya.spbftu.ru

Тел.: (812) 670-92-59.

E-mail: izvestiya.spbftu@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. 255. Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2025. – 536 с. – ISBN 978-5-9239-1547-1, ISSN-р: 2079-4304, ISSN-е: 2658-5871.

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

Темплан 2025 г. Изд. № 223

ISBN 978-5-9239-1547-1

ISSN-р: 2079-4304, ISSN-е: 2658-5871

© Санкт-Петербургский государственный

лесотехнический университет имени С.М. Кирова

(СПбГЛТУ), 2025

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

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

IZVESTIA
SANKT-PETERBURGSKOJ
LESOTEHNICESKOJ
AKADEMII

Issue 255

Published since 1886

SAINT PETERSBURG
2025

EDITORIAL COUNCIL

Editor-in-Chief

I. Melnichuk, PhD (Agriculture), St. Petersburg State Forest Technical University

Deputy Editor-in-Chief

A.A. Dobrovolsky, PhD (Agriculture), St. Petersburg State Forest Technical University

Executive Secretary

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

Council members

A.V. Zhigunov, DSc (Agriculture), St. Petersburg State Forest Technical University,

A.V. Vasiliev, DSc (Chemical) St. Petersburg State Forest Technical University,

A.V. Selikhovkin, DSc (Biology), St. Petersburg State Forest Technical University,

A.N. Chubinsky, DSc (Technical), St. Petersburg State Forest Technical University

EDITORIAL BOARD

V.A. Aleksandrov, DSc (Technical), St. Petersburg State Forest Technical University,

A.S. Alekseev, DSc (Geography) 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. Evtugin, 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. Ignatova, 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. Uglyumov, DSc (Technical), St. Petersburg State Forest Technical University,

L.V. Utkin, DSc (Technical), Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

D.M. Chernikovskii, DSc (Agriculture), St. Petersburg State Forest Technical University,

A.N. Chubinsky, DSc (Technical), St. Petersburg State Forest Technical University,

A.P. Smirnov, DSc (Agriculture), St. Petersburg State Forest Technical University,

E.G. Khitrov, DSc (Technical), St. Petersburg State Forest Technical University, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

A.V. Sheloumov, DSc (Technical), St. Petersburg State Forest Technical University,

R.V. Shchekalev, DSc (Agriculture), St. Petersburg State Forest Technical University,

V.T. Yarmishko, DSc (Biology), Komarov Botanical Institute of RAS

Address of the Editorial Office,

Publisher, Printing House 194021, Russia, St. Petersburg, Institutskiy per., 5, lit. U. Organization's website: www.spbftu.ru

Fax: +7(812)670-93-90.

Serial's website: izvestiya.spbftu.ru

Tel.: +7(812)670-92-59.

E-mail: izvestiya.spbftu@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 Lesotekhnicheskoy Akademii: Iss. 255. Saint-Petersburg.: SPbFTU, 2025. – 536 p. – ISBN 978-5-9239-1547-1, ISSN-p: 2079-4304, ISSN-e: 2658-5871.

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

Templan 2025 r. Izd. N 223

ISBN 978-5-9239-1547-1

ISSN-p: 2079-4304, ISSN-e: 2658-5871

© Saint Petersburg State Forest Technical

University (SPbFTU), 2025

ПРЕДИСЛОВИЕ

24 июля исполнилось 90 лет Онегину Владимиру Ивановичу, прошедшему славный путь от студента до ректора нашего университета.

Многоуважаемый Владимир Иванович!

Примите самые искренние поздравления с 90-летием! Ваша жизнь – это пример для всех нас. Ваши переживания, ваши радости, научные достижения и жизненные уроки стали основой для многих поколений. Ваш юбилей – очередное доказательство того, что 90 лет – это вовсе не преклонный возраст. Низкий поклон Вам за ту сложную жизненную дорогу, по которой Вы идете достойно, будучи ассистентом, доцентом, заместителем декана, деканом, проректором, более двадцати лет ректором, на заслуженном отдыхе, трудясь во благо будущего поколения.



Ваша жизнь – это книга, в которой каждая страница полна значимых событий, мудрых решений и добрых дел. За эти 90 лет вы показали, как важно быть человеком с большим сердцем и сильным духом.

90 лет – это не просто число, это целый мир, наполненный воспоминаниями, достижениями и переживаниями. Пусть в Вашем сердце всегда будет место для радости и вдохновения, а впереди – только светлое будущее, наполненное уважением и теплом близких.

Желаем вам здоровья, чтобы еще долгие годы радовать нас своим советами, делиться бесценным опытом и мудростью. Пусть впереди будет много ярких, счастливых дней!

Желаем Вам крепкого здоровья, понимания близких, больше радости и удовольствий, которые Вы так заслужили.

С юбилеем Вас!

Ректорат, дирекция института ландшафтной архитектуры, коллектив кафедры технологии материалов, конструкций и сооружений из древесины

1. ХРОНИКА НАУЧНОЙ ЖИЗНИ

УДК 929

Н.Г. Костиюкевич

К 100-ЛЕТИЮ КАФЕДРЫ ХИМИИ ДРЕВЕСИНЫ

Кафедра химии древесины и целлюлозы была основана в 1925 г. на лесохимическом отделении лесотехнического факультета, впоследствии преобразованном в отдельный лесохимический и далее в химико-технологический факультет. Создание кафедры было поручено выпускнику Лесного института 1913 г. Николаю Игнатьевичу Никитину, будущему члену-корреспонденту АН СССР, заслуженному деятелю науки и техники РСФСР, профессору, доктору технических наук, руководившему кафедрой до 1960 г. [Никитин, 2020].

Первоначально из кафедры общей химии была выделена кафедра химической технологии древесины. Осознание необходимости создания фундаментальной теоретической базы для развития технологий химической переработки древесины и целлюлозно-бумажного производства привело к организации специальных выпускающих кафедр и преобразованию новой кафедры в кафедру химии древесины и целлюлозы, для оснащения лаборатории которой Высший Совет народного хозяйства предоставил иностранной аппаратуры на 7000 золотых рублей.

С 1937 г. кафедра территориально располагается во втором учебном здании и включает студенческие и научно-исследовательские лаборатории.

После перерыва в нормальной работе, вызванного Великой Отечественной войной, кафедра химии древесины и целлюлозы возобновила свою деятельность в стенах Лесотехнической академии. В 1982 г. в связи с укрупнением ряда кафедр её объединили с кафедрой физической и коллоидной химии. Затем на период 1990–1994 гг. была восстановлена самостоятельность. Однако в конце 1994 г. произошло повторное объединение, которое продлилось до 1999 г. В периоды объединения название кафедры звучало как «кафедра химии древесины, физической и коллоидной химии». Штат профессорско-преподавательского состава кафедры увеличивался в

связи с проведением занятий по соответствующим дисциплинам. В 2012 г. в связи с очередной реорганизацией к кафедре химии древесины была присоединена кафедра лесохимических продуктов, а затем в 2017 г. – кафедра биотехнологии. С этого времени название кафедры вновь изменилось, на «кафедра лесохимических продуктов, химии древесины и биотехнологии». Однако в названиях до последнего времени всегда присутствовало наименование «химия древесины», так как это основная обязательная фундаментальная дисциплина для студентов всех направлений обучения химико-технологического факультета, теперь института химической переработки биомассы дерева и техносферной безопасности [Архив...].

До 2012 г. кафедра не являлась выпускающей, но отдельные студенты выполняли и защищали научно-исследовательские выпускные квалификационные работы. На кафедре проводилась активная работа по подготовке научно-педагогических кадров в области химии древесины, в том числе через аспирантуру. Из выдающихся выпускников кафедры следует назвать будущих профессоров, заведующих кафедрами, докторов химических и технических наук, доцентов академии и других институтов учеников Н.И. Никитина, таких как В.И. Шарков, В.И. Юрьев, Н.Я. Солечник, Ф.П. Комаров, С.Д. Антоновский, А.В. Оболенская, Э.Л. Аким, также учеников В.М. Никитина – Г.Л. Акима, Э.И. Чупку и др.

За долгую историю кафедры круг читаемых дисциплин значительно расширился, их содержание постоянно обновлялось, программы лекционных курсов и лабораторных практикумов совершенствовались.

На созданной в 1925 г. кафедре читался курс «Химия древесины и целлюлозы», сначала проф. Н.И. Никитиным, затем проф. В.М. Никитиным, причем оба лектора уже тогда включали в этот курс раздел «Химия и физика высокомолекулярных соединений», необходимый для понимания особенностей химического строения и физических свойств основных компонентов древесины, которые являются полимерами. Этот раздел в дальнейшем как выделялся в отдельный курс, так и включался в основной курс, получив название «Химия древесины и синтетических полимеров». Именно поэтому учебник, написанный А.В. Оболенской в составе межвузовского коллектива авторов в 1999 г., имеет такое название. В настоящее время «Физика и химия полимеров» и «Физика и химия целлюлозы и лигнина» читаются отдельно для более полного изучения и понимания особенностей свойств и современных методов исследования полимеров и высокомолекулярных компонентов древесины [Санкт-Петербургская..., 2003].

С 1988/89 учебного года для студентов ХТФ в соответствии с новым учебным планом читался по обновленной программе для всех специализаций курс «Химия древесины и синтетических полимеров». Содержание курса было согласовано с содержанием курса органической химии. Также были включены материалы, касающиеся реакционной способности компонентов древесины и механизмов их химических реакций как органических полимеров.

В период усиления химизации народного хозяйства СССР на кафедре для студентов некоторых нехимических факультетов были введены курсы по химии и физическим свойствам полимеров, которые кроме лекций включали и лабораторный практикум.

В 70-х гг. для иностранных студентов, обучающихся на ХТФ, по распоряжению Министерства высшего образования был организован доц. А.В. Оболенской специальный лекционный курс «Особенности химического анализа древесины тропических пород», который сопровождался выполнением лабораторного практикума в соответствии с учебным планом по химии древесины, но по специальной программе анализа растительного сырья, привезенного из стран Азии и Африки.

В 1996 г. в связи с организацией на ХТФ подготовки магистров доц. А.В. Оболенской были составлены учебные программы и начато чтение новых курсов для студентов, обучающихся в магистратуре, с целью развития биохимического подхода к физиологическим процессам, а также рассмотрения взаимосвязи физиологии, макро-, микро-, ультраструктуры древесины и химического строения компонентов древесины в процессах химической переработки древесного сырья.

Все курсы читались в разные годы на дневном, вечернем (до его закрытия) и заочном отделениях при участии ведущих лекторов кафедры: профессоров В.М. Никитина, А.А. Леоновича, В.И. Рошина, И.П. Дейнеко, Э.И. Евстигнеева, доцентов С.Д. Антоновского, А.В. Оболенской, В.П. Щеголова, Н.И. Васильева, Н.Г. Костюкович, Д.В. Евтугина и др.

С основания кафедры в 1925 г. до 1960 г. ей заведовал Николай Игнатьевич Никитин, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент АН СССР, заслуженный деятель науки и техники РСФСР. Н.И. Никитин окончил Лесной институт в 1913 г. В первые годы своей практической деятельности он работал над вопросами органической химии под руководством В.Н. Крестинского и в области физической и коллоидной химии в лаборатории проф. Е.В. Бирона. С 1914 г. началась педагогическая деятельность Н.И. Никитина. Одновременно в заграничных командировках он

изучал производство целлюлозы на заводах Финляндии и Англии, а в 1923 г. – лесохимическую промышленность в Германии. На кафедре химии Лесного института он участвовал в преподавании курса лесной технологии, в который входило изучение химического состава древесины и способов простейшей химической переработки дерева, что послужило началом научной деятельности в совершенно новой тогда области – химии древесины и целлюлозы. Исследование высокомолекулярных компонентов древесины, привлекших в те годы внимание большого числа ученых Европы, было возможным только при основательном знании физической и колloidной химии наряду с органической химией. Именно поэтому Н.И. Никитину было поручено организовать в Лесном институте первую в Советском Союзе кафедру химии древесины и целлюлозы, бессменным руководителем которой Н.И. Никитин был на протяжении 35 лет. Начиная с 1945 г. он параллельно с работой в Лесотехнической академии руководил лабораторией химии древесины и целлюлозы сначала в Институте леса, а затем в ЛО ИВС АН СССР.

После окончательного перехода Н.И. Никитина в Академию наук с 1960 до 1982 г. кафедру химии древесины и целлюлозы возглавлял Виктор Михайлович Никитин, доктор химических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, член международной академии лесных наук. В.М. Никитин закончил Ивановский химико-технологический институт, получив специализацию в области органической химии. После нескольких лет работы в промышленности и Дальневосточном университете В.М. Никитин в течение 10 лет (1942–1952 гг.) руководил кафедрой органической химии, химии древесины и целлюлозы в Архангельском Лесотехническом Институте (АЛТИ), где читал курсы органической химии и химии древесины и целлюлозы, а также вплотную занялся научными исследованиями сначала в области химии терпенов (с защитой докторской диссертации в 1947 г.), а затем химии лигнина, подготовив аспирантов. Одна из них, А.В. Оболенская, продолжила научно-исследовательскую и педагогическую работу на кафедре химии древесины и целлюлозы ЛТА.

После смерти В.М. Никитина в январе 1982 г. в 1982–1994 гг. кафедрой заведовал Адольф Ануфриевич Леонович, доктор технических наук, профессор, действительный член международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности. А.А. Леонович после окончания в 1961 г. химико-технологического факультета ЛТА работал на кафедре технологии древесных плит и пластиков под руководством проф. Н.Я. Солечника, где и защитил кандидатскую и докторскую диссертации.

В 1994 г. в связи с переходом проф. А.А. Леоновича на должность заведующего кафедрой технологии древесных плит и пластиков на должность заведующего вновь объединенной кафедры химии древесины, физической и коллоидной химии был приглашен специалист в области физической химии, выпускник химико-технологического факультета ЛТА, окончивший аспирантуру ЛГУ Владимир Георгиевич Крунчак, доктор химических наук, действительный член международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности. В.Г. Крунчак руководил кафедрой до мая 1998 г. и рано ушел из жизни вследствие тяжелой непродолжительной болезни.

В июне 1998 г. на должность заведующего кафедрой химии древесины, физической и коллоидной химии был избран Виктор Иванович Рощин, доктор химических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии естественных наук (РАЕН). В.И. Рощин – также выпускник ЛТА, работавший после окончания академии на кафедре органической химии, где и защитил кандидатскую диссертацию, а затем в лаборатории живых элементов дерева и на кафедре лесохимических производств и биологически активных веществ. После защиты докторской диссертации на ученую степень доктора химических наук он был избран на должность профессора.

Затем к кафедре химии древесины присоединили кафедру технологии лесохимических продуктов (2012 г.) и кафедру биотехнологии (2017 г.), а кафедра физической и коллоидной химии вошла в состав кафедры органической химии. Объединенную кафедру технологии лесохимических продуктов, химии древесины и биотехнологии до настоящего времени возглавлял В.И. Рощин. При последнем объединении (2017 г.) на кафедру пришли выпускник ХТФ ЛТА, ученик В.И. Шаркова, профессор, заслуженный работник высшей школы РФ, академик РАЕН В.А. Елкин, который 30 лет (с 1987 г.) был деканом сначала ХТФ, затем ФХТБ и наконец ИХПБД и ТБ, ст. преподаватель Г.Д. Денисенко и преподаватель А.В. Бахтиярова.

С первых дней существования кафедры химии древесины и целлюлозы вся научно-исследовательская работа была связана с новыми направлениями теории, потребность в которых определялась задачами, ставящимися отечественной промышленностью химической переработки целлюлозы, главным образом производства искусственного волокна. Все это привело к формированию и разработке на кафедре под руководством проф. Н.И. Никитина научных направлений по изучению свойств и реакционной способности древесных целлюлоз для химической переработки с получением из

них простых и сложных эфиров целлюлозы. Также проводились работы по исследованию и сравнению химического состава древесины отечественных пород как сырья для ЦБП. Проводилось выделение и исследование лигнинов древесины различных пород.

В 1920–1930 гг. на кафедре проводилась работа, направленная на совершенствование вискозного процесса и получения нескольких видов эфиров целлюлозы. Работа осуществлялась совместно с учеными ЛТИ ЦБП и трестом «Пластмассы». В научно-исследовательской работе в эти годы принимали участие сотрудники В.И. Шарков, И.П. Иванов, Л.П. Сахаров, Т.И. Руднева, М.А. Авидон, И.М. Орлова, Ф.П. Комаров, Н.И. Кленкова и др., а также аспиранты.

Работы кафедры была прервана войной и блокадой Ленинграда. В годы войны часть сотрудников кафедры вместе с сотрудниками кафедр ЦБП, гидролиза и лесохимических производств, оставшихся в академии, работали в созданном в это время химическом цехе по оборонной тематике. Так, с.н.с. Т.И. Руднева работала сначала на гидролизной установке для получения из гидролизатов кормовых дрожжей, а затем участвовала в работе по получению хвойных экстрактов, применявшимся в качестве источника витаминов и в составе лечебных мазей.

В 1945 г. кафедра возобновила свою деятельность по довоенным направлениям. Также проводились работы по изучению арабиногалактана лиственницы даурской доц. С.Д. Антоновским с группой сотрудников. Н.И. Никитин в 50-е гг. сосредотачивает свою научную деятельность в новой лаборатории Института леса АН СССР, которая затем перешла в Институт высокомолекулярных соединений.

В 1952 г. в состав кафедры химии древесины и целлюлозы вошел проф. В.М. Никитин (в связи с его переводом на должность ректора ЛТА из Архангельского лесотехнического института). С небольшой группой сотрудников и аспирантов (А.В. Оболенская, П.К. Боярская, А.Е. Соснин, Г.Л. Аким, В.П. Щеголев) он активно включился в научно-исследовательскую работу с дальнейшим расширением своей тематики и увеличением коллектива.

В первые годы работы В.М. Никитин на основании результатов проведенных исследований высказал революционную идею о возможности делигнификации (отбелки) технических целлюлоз кислородом в щелочной среде с одновременным облагораживанием в условиях повышенной температуры и давления кислорода. Под его руководством асп. Г.Л. Акимом эта идея была доведена до практического осуществления. Способ кисло-

родно-щелочной обработки (КЩО) технических целлюлоз был проверен в полу заводских условиях для древесных целлюлоз с выработкой бумаги. Приоритет советских ученых был признан во всем мире и подтвержден, хотя и с опозданием, авторскими свидетельствами. Первые публикации В.М. Никитина и Г.Л.Акима, посвященные КЩО, появились в 1956–1958 гг. Затем эти работы были продолжены Г.Л. Акимом с сотрудниками кафедры во ВНИИБ. В итоге состоялась защита Г.Л. Акимом докторской диссертации (1977) и внедрение способа КЩО в промышленность.

Кроме исследований процессов делигнификации древесины и технических целлюлоз с целью усовершенствования технологии варки и улучшения показателей качества технических целлюлоз, проводились теоретические исследования, касающиеся свойств различных технических лигнинов как высокомолекулярных соединений и разработки способов их практического применения.

В 1965–1970 гг. под руководством В.М. Никитина проводились систематические исследования щелочных способов делигнификации древесины с изучением конкурирующих процессов деструкции и конденсации лигнина (доц. А.В. Оболенская, н.с. Э.И. Чупка) с применением для исследования лигнина квантово-химического метода. Эти работы были продолжены с большой группой молодых научных сотрудников и аспирантов главным образом в направлении изучения свободно-радикальных процессов конденсации лигнина при щелочных варках и роли кислорода в генерировании свободных радикалов. В 1974 г. Э.И. Чупка защитил докторскую диссертацию.

В эти годы совершенствовались и вводились в практику новые методы определения остаточного лигнина, фракционирования целлюлозы, определения вязкости растворов целлюлозы. Были исследованы реакции взаимодействия лигнина с различными ароматическими соединениями с получением азопроизводных.

В 70-х гг. кафедра (доц. А.В. Оболенская и В.П. Щеголев) принимала участие в работах ВНИИБ по стандартизации терминологии в области ЦБП: утверждены и изданы 4 терминологических ГОСТа по волокнистым полуфабрикатам ЦБП, по технологии их получения и показателям качества.

В 80-х гг. был заключен договор о содружестве с Институтом археологии АН СССР и Государственным Эрмитажем по изучению образцов древесины из различных археологических памятников (характеристика структурных изменений, определение по химическому составу предполагаемой

породы древесины) доц. А.В.Оболенской и асс. Е.А. Кузнецовой при участии большой группы студентов. Эти исследования были продолжены под руководством проф. А.А. Леоновича, перешедшего на заведование кафедрой химии древесины после ее объединения с кафедрой физической и коллоидной химии. Кроме того, А.А. Леонович принимал участие в совместных с Русским музеем исследованиях по огнезащите и реставрации древесных и целлюлозных материалов предметов искусства.

В то же время под руководством А.А. Леоновича группа сотрудников (Т.Ф. Андреева, Ф.Я. Рубинова, Л.П. Бичевая, С.С. Захаров, А.В. Шелогумов, Я.К. Каменцева, асп. В.М. Гедьо) получила успешные результаты с применением разработанных огнезащитных средств группы амидофосфата. Также была проведена работа по использованию древесной коры для изготовления термозащитного слоя космических ракет по закрытой тематике. Было проведено исследование применения лесохимической добавки при сульфитной варке древесины лиственных пород (береза) с целью устранения смоляных затруднений. Работы почетного профессора А.А. Леоновича, заслуженного работника высшей школы, действительного члена Международной академии экологии и безопасности жизнедеятельности, заслуженного деятеля науки и техники РФ, лауреата премии правительства Санкт-Петербурга по огнезащите древесных и целлюлозных материалов получили международное признание, что отразилось в ряде зарубежных публикаций и участии в международных научных конференциях.

На кафедре на протяжении всей ее истории большое внимание уделялось учебно-методической работе. Кафедра постоянно обеспечивала лекционные курсы, а также лабораторные практикумы по химии древесины для студентов необходимыми учебниками, учебными и методическими пособиями. Кроме того, ведущими учеными кафедры были изданы монографии и переводы специальной иностранной литературы.

В 1974–1982 гг. аспирант, затем научный сотрудник Э.И. Евстигнеев пополнил исследования свойств и строения лигнина введением в практику электрохимических методов, а в 1996 г. вернулся в ЛТА на кафедру химии древесины, физической и коллоидной химии на должность доцента, где продолжил исследования в той же области, а также по химии современных методов варки и отбелки. В 2002 г. Э.И. Евстигнеев защитил докторскую диссертацию. В настоящее время почетный профессор Э.И. Евстигнеев является основным преподавателем по дисциплине «Химия древесины» и одним из ведущих специалистов России в области химии лигнина. Список его научных достижений составляет 178 работ.

Группа сотрудников-выпускников факультета, в начале 1990-х гг. перешедших на преподавательскую работу с кафедры органической химии (к.х.н. И.П. Дейнеко, Д.В. Евтугин, Н.Г. Костюкевич), продолжили свои исследования в области кислородно-органосольвентной делигнификации древесины (совместно с зав. кафедрой органической химии проф. М.Я. Зарубиным). И.П. Дейнеко защитил докторскую диссертацию по этой тематике.

Период руководства объединенной кафедрой проф. В.Г. Крунчаком (с сентября 1994 по май 1998 г.), которого не стало после непродолжительной тяжелой болезни, был слишком коротким, чтобы осуществить все планы по развертыванию на кафедре новых научных направлений.

Проф. В.И. Рошин с группой сотрудников (н.с. И.С. Павлуцкая, Н.П. Маркова, И.Н. Свищева, Г.С. Худашова, к.х.н. Д.Н. Ведерников, асп. Н.А. Артеменкова) перешел на кафедру с научным направлением по химии экстрактивных веществ древесных растений, по которому проводятся исследования экстрактивных веществ кроны и коры дерева с изучением их биологической активности и созданием препаратов для медицины, косметики, сельского хозяйства, бытовой химии. В работе принимают участие магистранты кафедры. Работы проф. В.И. Рошина по исследованию и разработке способа практического использования биологически активных экстрактивных веществ древесной зелени оценены во всем мире. Список его научных достижений составляет примерно 600 работ. Он избран почетным профессором Нанкинского лесного университета (Китай). С 1999 г. В.И. Рошин с группой научных сотрудников, аспирантов и магистрантов проводит совместные исследования с рядом институтов и фирм Австралии. В.И. Рошин является почетным профессором нашего университета и продолжает активную преподавательскую и научную деятельность, привлекая молодежь к участию в своих разработках.

Професор Д.Н. Ведерников занимается исследованием состава экстрактивных веществ ветвей, коры, почек, листьев, ложного ядра берёзы с изучением их биологической активности и перспективы применения в медицине. В 2013 г. Д.Н. Ведерников защитил докторскую диссертацию по этой тематике и в настоящее время является профессором кафедры, привлекая к своим научным изысканиям как будущих бакалавров, так и магистров. Кроме того, проф. Д.Н. Ведерников разрабатывает условия применения слабой вибрации (тензо-импульсного воздействия) в гетерогенных процессах для интенсификации химической переработки древесных и недревесных растений.

Выпускные квалификационные работы магистров (100%) и бакалавров (более 60%) связаны с разработкой технологий новых продуктов из древесного сырья и исследованиями состава биологически активных веществ из возобновляемого растительного сырья, в том числе и лекарственных растений.

Кафедра оснащена современным научным оборудованием, что способствует выполнению задач и достижению целей по созданию новых продуктов и проведению исследований на высоком современном уровне. Выпускники кафедры, пройдя хорошую школу и получив качественные знания и умения работы на современной приборной научной базе, пользуются спросом для работы в научных, аналитических лабораториях, в отдельах ОТК и заводских лабораториях различных отраслей промышленности. Многие студенты-бакалавры, все магистры, выпускаемые кафедрой, имеют научные публикации в журналах и сборниках трудов конференций.

Основные направления научной работы кафедры: изучение строения лигнина древесных растений, остаточного лигнина в целлюозах сульфатно-целлюлозного производства, использование лигнина гидролизных и сульфатно-целлюлозных производств (проф. Э.И. Евстигнеев); изучение биологически активных веществ биомассы березы, сульфатных щелоков и сульфатного мыла от варки лиственных пород древесины, других растительных источников биологически активных веществ, интенсификация процессов экстракции методом тензо-импульсного воздействия (проф. Д.Н. Веденников); изучение интенсивных способов термической переработки отходов древесного сырья с получением активных углей, топливных брикетов и биотоплив (доц. А.А. Спицын); гидролитическая переработка древесного сырья с получением фурфурола, ксилита и микрокристаллической целлюлозы (ст. преподаватели Г.Д. Денисенко, А.В. Бахтиярова); изучение экстрактивных веществ лиственницы сибирской, получение биологически активных веществ для сельского хозяйства – кормовых добавок для животноводства, птицеводства, а также биоудобрений, средств защиты растений от болезней и насекомых-вредителей (проф. В.И. Рошин, ассистент Д.С. Миксон).

На кафедре проводилась активная работа по подготовке научно-педагогических кадров в области химии древесины, в том числе через аспирантуру. Из выдающихся выпускников кафедры следует назвать ученых, ставших профессорами, заведующими кафедрами, докторами химических и технических наук, доцентами академии и других институтов, учеников Н.И. Никитина, таких как В.И. Шарков, В.И. Юрьев, Н.Я. Солечник, Ф.П.

Комаров, С.Д. Антоновский, Э.Л. Аким, Г.А. Петропавловский, А.В. Оболенская, а также учеников В.М. Никитина – Г.Л. Акима, Э.И. Чупку и др.

В настоящее время в результате очередной реорганизации произошло объединение кафедры «Технологии лесохимических продуктов, химии древесины и биотехнологии» с кафедрой «Технологии древесных и целлюлозных композиционных материалов», образовалась кафедра «Технологии химической переработки биомассы дерева». Но дисциплина «Химия древесины» по-прежнему является одним из основных фундаментальных предметов для студентов Института химической переработки биомассы дерева и техносферной безопасности.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Архив Санкт-Петербургского государственного Лесотехнического Университета.

Никитин Н.И. На пути научного работника-химика (Очерки из прошлого): науч.-поп. изд-е. СПб., 2020. 248 с.

Санкт-Петербургская Государственная Лесотехническая Академия. Страницы истории. СПб.: Хромис, 2003. 814 с.

References

Archive of the St. Petersburg State Forestry University. (In Russ.)

Nikitin N.I. On the Path of a Chemical Researcher (Essays from the Past): A Popular Science Edition. St. Petersburg, 2020. 248 p. (In Russ.)

St. Petersburg State Forestry Academy. Pages of History. St. Petersburg: Khromis, 2003. 814 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 16.09.2025

Костюкевич Н.Г. К 100-летию кафедры химии древесины // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 6–17. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.6-17

В статье представлена история создания, развития и преобразования кафедры химии древесины как в области научных достижений, так и совершенствования учебного процесса. Освещаются основные направления научных разработок, связанных с химической переработкой древесины. Приводятся имена известных ученых и преподавателей, которые обеспечивали и обеспечивают успешное функционирование направления химии древесины и преподавание дисциплины «Химия древесины» в составе объединенных кафедр.

Ключевые слова: химия древесины, химия лигнина, направления химической переработки древесины, ведущие ученые кафедры.

Kostyukevich N.G. On the 100th Anniversary of the Department of Wood Chemistry. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 6–17 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.6-17

The article presents the history of the creation, development, and transformation of the Department of Wood Chemistry, both in terms of scientific achievements and the improvement of the educational process. It highlights the main areas of scientific research related to the chemical processing of wood. The article also includes the names of renowned scientists and professors who have contributed to the successful functioning of the Department of Wood Chemistry and the teaching of the discipline "Wood Chemistry" within the combined departments.

Keywords: wood chemistry, lignin chemistry, areas of wood chemical processing, leading scientists of the department.

КОСТЮКЕВИЧ Наталья Гарриевна – доцент кафедры биотехносферной безопасности Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат химических наук. SPIN-код: 7044-0571. ORCID: 0000-0002-6816-4912.

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

KOSTYUKEVICH Natalia G. – PhD (Chemistry), Associate Professor of the Department of Biotechnosphere Safety of the St.Petersburg State Forestry University. SPIN-code: 7044-0571. ORCID: 0000-0002-6816-4912.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: natasha_kostyukevich@bk.ru

Н.Г. Костюкевич

**ПАМЯТИ ОБОЛЕНСКОЙ АРТЕМИДЫ ВАЛЕНТИНОВНЫ
(К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)**



Оболенская Артемида Валентиновна родилась 2 сентября 1925 г. в селе Порецком Чувашской АССР в семье служащего (преподавателя ВУЗа) Валентина Васильевича Оболенского. В 1929 г. семья переехала в г. Йошкар-Олу в связи с переводом отца в Поволжский лесотехнический институт, а в 1935 г. – в г. Архангельск, где отец стал работать в Архангельском лесотехническом институте (АЛТИ). Мать, Оболенская К.П., была домашней хозяйствкой.

Артемида Валентиновна в 1943 г. окончила среднюю школу и поступила в АЛТИ на химико-технологический факультет, который окончила в 1948 г.

с дипломом с отличием, получив специальность «инженер-технолог химической переработки древесины». 1 января 1949 г. она поступила в аспирантуру при кафедре органической химии и химии древесины АЛТИ [Архив СПбГЛТУ].

С февраля 1953 г. она работала в Ленинградской лесотехнической академии (ЛТА) на должности младшего научного сотрудника научно-исследовательского сектора, в 1956 г. была переведена на должность ассистента кафедры химии древесины и целлюлозы химико-технологического факультета ЛТА. Далее работа Артемиды Валентиновны была прочно связана с этой кафедрой. После защиты 18 января 1957 г. кандидатской диссертации по теме «Исследование некоторых реакций щелочного лигнина» она была избрана на должность доцента по кафедре химии древесины и целлюлозы, а в марте 1961 г. получила ученое звание доцента [Архив СПбГЛТУ].

Артемида Валентиновна считала своим учителем и наставником в педагогической деятельности известного советского ученого, член-корреспондента АН СССР, основателя кафедры химии древесины и целлюлозы на лесохимическом отделении лесотехнического факультета ЛТА Николая Игнатьевича Никитина.

Артемида Валентиновна принимала активное участие в научной работе кафедры химии древесины и целлюлозы. Она руководила студентами и аспирантами, консультировала их и научных работников кафедры, сотрудничала со специалистами других институтов и вузов, была непререкаемым авторитетом среди производственников, которые обращались к ней для получения профессионального совета по различным технологическим и научным вопросам.

Артемида Валентиновна проводила занятия для иностранных студентов и аспирантов, обучавшихся на химико-технологическом факультете академии. Был организован специальный лекционный курс «Особенности химического анализа древесины тропических пород», который включал выполнение лабораторного практикума по специальной программе, с разработкой соответствующих методических указаний.

В 1970 г. к 100-летию В.И. Ленина Артемида Валентиновна была удостоена юбилейной медали «За доблестный труд», а в июле 1971 г. – медали «За трудовое отличие» [Архив СПбГЛТУ].

В 1970-х гг. А.В. Оболенская принимала участие в разработке стандартов терминологии в области ЦБП по волокнистым полуфабрикатам, технологии их получения и показателям качества. В начале 1980-х гг. она руководила совместной исследовательской работой с учеными Государственного Эрмитажа по изучению и анализу древесины из различных археологических памятников с использованием метода радиоуглеродного датирования.

Артемида Валентиновна всегда охотно делилась своим педагогическим опытом с молодыми преподавателями, подготовив целое поколение молодых ученых и педагогов. Её ученики успешно трудятся в России и за рубежом, как в Европе, так и в США.

Разработанная Артемидой Валентиновной рабочая программа по дисциплине «Химия древесины и синтетических полимеров» была в 1990-х гг. признана в министерстве образования и науки одной из лучших, являющейся образцом для других учебных программ по этой дисциплине. Артемидой Валентиновной были разработаны рабочие программы по новым дисциплинам «Физика и химия целлюлозы и лигнина» для подготовки ба-

калавров и «Химические превращения компонентов древесины в технологических процессах» для подготовки магистров.

Артемида Валентиновна в соавторстве с ведущими специалистами в области химии древесины и целлюлозы участвовала в написании около 70 печатных работ. Оболенская сотрудничала с такими известными учеными в этой области, как Н.И. Никитин, В.М. Никитин, Э.И. Чупка, Г.Л. Аким, Э.Л. Аким, А.А. Леонович, В.И. Азаров, И.П. Дейнеко, Г.А. Пазухина, Г.С. Чиркин, В.П. Щеголев, З.П. Ельницкая, А.В. Буров и др. Кроме научных статей и тезисов докладов конференций по тематике химии древесины, лигнина и целлюлозы, Оболенской А.В. с соавторами подготовлен и опубликован целый ряд учебных и методических пособий, как для вузов, так и для техникумов, а также переводов монографий с английского языка.

Особенно значимые издания с участием А.В. Оболенской:

I. Учебники:

1. Никитин Н.И. Химия древесины и целлюлозы. М., Л.: Изд. АН СССР, 1962. (при участии проф. В.И. Юрьева, препод. С.Д. Антоновского и А.В. Оболенской, асп. Г.А.Петропавловского и Э.Л. Акима и др.).

2. Оболенская А.В., Щеголев В.П., Аким Г.Л., Аким Э.Л. и др. Практические работы по химии древесины и целлюлозы / под ред. В.М. Никитина. М.: Лесн. пром-сть, 1965.

3. Никитин В.М., Оболенская А.В., Щеголев В.П. Химия древесины и целлюлозы: учебник. М.: Лесн. пром-сть, 1978.

4. Оболенская А.В., Щеголев В.П. Химия древесины и полимеров / под ред. В.М. Никитина. М.: Лесн. пром-сть, 1980.

5. Леонович А.А., Оболенская А.В. Химия древесины и полимеров. М.: Лесн. пром-сть, 1988.

7. Оболенская А.В., Ельницкая З.П. (ЛТИ ЦБП), Леонович А.А. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы: учеб. пособие для вузов. М.: Экология, 1991.

8. Азаров В.И. (МГУЛ), Буров А.В. (СПбГТУРП), Оболенская А.В. (СПбЛТА). Химия древесины и синтетических полимеров: учебник для вузов. СПб.: СПбЛТА, 1999.

Был признан лучшим учебником 2002 г. Выдержал два переиздания в 2010 и 2020 гг. Номинировался на государственную премию в 2012 г.

II. Переводы монографий:

1. Экстрактивные вещества древесины и значение их в целлюлозно-бумажном производстве / под ред. В.Э. Хиллиса; пер. с англ. А.В. Оболенской, В.П. Щеголева. М.: Лесн. пром-сть, 1967.

2. Химия древесины / под ред. Б.Л. Браунинга; пер. с англ. А.В. Оболенской, В.П. Щеголева. М.: Лесн. пром-сть, 1967
3. Лигнины / под ред. К.В. Сарканена и К.Х. Людвига; пер. с англ. А.В. Оболенской и Г.С. Чиркина (каф. орг. химии ЛТА). М.: Лесн. пром-сть, 1975.
4. *Кларк Дж.* Технология целлюлозы (наука о целлюлозной массе и бумаге) : пер. с англ. А.В. Оболенской, Г.А. Пазухиной (каф. ЦБП ЛТА). М.: Лесн. пром-сть, 1983.
5. *Фенгел Д., Вегенер Г.* Древесина. Химия. Ультраструктура. Реакции / пер. с англ. А.В. Оболенской, З.П. Ельницкой (ЛТИ ЦБП). М.: Лесн. пром-сть, 1988.

Практически ни одно научное исследование в области химии древесины и целлюлозы не обходится без ссылки на издания с её участием.

Работы Оболенской А.В. до сих пор являются настольными книгами для студентов, аспирантов и научно-технических работников химико-технологических и лесотехнических специальностей.



Pric. Доцент Оболенская А.В. (слева) и профессор Альбицкая В.М.
Fig. Associate Professor Obolenskaya A.V. (left) and Professor Albitskaya V.M.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Архив Санкт-Петербургского государственного Лесотехнического Университета.

References

Archiv of Saint-Petersburg State Technical Forest University.

Материал поступил в редакцию 16.09.2025

Костюкевич Н.Г. Памяти Оболенской Артемиды Валентиновны (к 100-летию со дня рождения) // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 18–22. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.18-22

Статья посвящена памяти одного из ведущих преподавателей химико-технологического факультета, ныне Института химической переработки биомассы дерева и техносферной безопасности, Оболенской Артемиды Валентиновны, соавтора многочисленных учебников, учебных и методических пособий и переводных монографий.

Ключевые слова: педагогическая деятельность, научная и издательская деятельность, химия древесины, химия лигнина.

Kostyukevich N.G. In memory of Artemida Valentinovna Obolenskaya (on the 100th anniversary of her birth). *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 18–22 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.18-22

The article is dedicated to the memory of one of the leading teachers of the Faculty of Chemistry and Technology, now the Institute of Chemical Processing of Wood Biomass and Technosphere Safety, Obolenskaya Artemida Valentinovna. She was a co-author of numerous textbooks, educational and methodological manuals, and translated monographs.

Keywords: pedagogical activity, scientific and publishing activity, wood chemistry, lignin chemistry.

КОСТЮКЕВИЧ Наталья Гарриевна – доцент кафедры биотехносферной безопасности Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат химических наук. SPIN-код: 7044-0571. ORCID: 0000-0002-6816-4912.

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

KOSTYUKEVICH Natalia G. – PhD (Chemistry), Associate Professor of the Department of Biotechnosphere Safety, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 7044-0571. ORCID: 0000-0002-6816-4912.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: natasha_kostyukevich@bk.ru

2. ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

УДК 630.181; 58.08

А.В. Кабонен, П.А. Рязанцев, Ю.В. Суханов, Д.А. Кувшинов

ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ КОРНЕВОЙ СИСТЕМЫ ДЕРЕВА МЕТОДОМ 3D-СКАНИРОВАНИЯ

Введение. Корневые системы деревьев играют важную роль в поглощении питательных веществ и воды из почвы, их транспортировке в надземные органы [Pratt et al., 2008], а также отвечают за процесс физического закрепления деревьев в почве. Исследования корневых систем деревьев являются актуальной задачей лесной науки и находят все большее применение в практике лесного хозяйства. Однако корневые системы деревьев представляют собой большие по объёму и массе органы, поэтому их выкапывание из почвы и измерение их морфологических признаков является трудоемким. По этой причине, несмотря на множество работ по изучению морфологии и структуры корневых систем [Fourcaud et al., 2008; Vennetier et al., 2015], основные выводы в них получены, как правило, на примере одного модельного дерева. Это связано с тем, что основная часть исследований опирается на изучение корней с использованием одного из методов раскопки, предложенных еще в XX веке [Колесников, 1972; Böhm, 1979].

В настоящее время для изучения структуры корневых систем привлекаются новые лабораторные и полевые дистанционные методы [Рязанцев и др., 2020]. В некоторых работах по изучению морфологии и структуры корневых систем использовалось 3D-моделирование, т.к. морфологические особенности архитектоники корней можно успешно измерить с помощью реконструированных 3D-моделей [Atkinson et al., 2019; Montagnoli et al., 2020]. В исследованиях [Gärtner et al., 2009; Todo et al., 2021] предпринимались попытки реконструировать структуру корневой системы дерева путем создания трехмерного облака точек с помощью лазерного сканирования LiDAR (англ. Light Detection and Ranging – «обнаружение и определение дальности с помощью света»). Лазерный сканер способен реконструировать 3D-

структурой объекта с высокой точностью, однако этот подход трудно применить к полевым исследованиям, т.к. он использует дорогостоящие устройства и специализированное программное обеспечение.

Другим возможным подходом к реконструкции корневой структуры является создание 3D-моделей на основе цифровых снимков методами фотограмметрической обработки данных. Фотограмметрия – это метод анализа изображений, используемый для 3D-моделирования с высоким разрешением, где 3D-информация получается из последовательно перекрывающихся 2D-изображений, снятых под разными углами и нужным перекрытием фотографий [Lejot et al., 2007]. Иными словами, метод фотограмметрии реконструирует трехмерную структуру объекта из нескольких изображений, используя обычную цифровую камеру, благодаря чему является весьма бюджетным.

В исследовании [Koeser et al., 2016] применили фотограмметрию для оценки объема корней деревьев. Это исследование продемонстрировало потенциал используемого метода для исследований корней деревьев. Исследования также показали, что точность измерения варьируется в зависимости от типа объекта, такого как стебли или ветви, поскольку количество пикселей на изображении ограничено размером объекта [Miller et al., 2015]. Однако ни в одном исследовании не было применено оптическое 3D-сканирование для реконструкции трехмерной структуры корневых систем деревьев и измерения их морфологических характеристик. Более того, никто не исследовал, может ли этот метод получать и оценивать морфологические характеристики, такие как диаметр и длина корневой системы дерева.

Технические отличия этого метода от создания 3D-модели фотограмметрией, где для получения плотного облака точек (point cloud) и построения по нему полигональной модели используются только изображения с фотоаппарата, заключаются в том, что при оптическом 3D-сканировании объект дополнительно подсвечиваются специальными узкими полосами света, которые искажаются на криволинейных элементах сканируемого объекта, что и регистрируется камерами 3D-сканера. Также некоторые современные ручные 3D-сканеры оснащаются акселерометром и гироскопом для упрощения позиционирования отдельных изображений, что ускоряет автоматическую сборку моделей.

Цель исследования – изучить структуру корневой системы *Picea abies* (L.) H. Karst. в условиях произрастания в среднетаежном районе с использованием 3D-сканирования.

Материалы и методика исследования. Исследование было проведено в июле 2020 г. на заповедной территории Ботанического сада Петрозаводского государственного университета (подзона среднетаежных лесов). Географические координаты участка – 61°84' с.ш., 34°41' в.д. Территория ботанического сада представляет собой ось антиклинальной складки, выраженной в современном рельефе в виде мощного крутосклонного кряжа субширотного простирания [Демидов, Лукашов, 2001]. В четвертичных отложениях преобладает супесчаная и песчаная морена. Характерной особенностью исследуемого участка является близкое залегание скальных пород (50–100 см), что, безусловно, оказывает влияние через ветровую нагрузку на ветроустойчивость деревьев с любым типом корневой системы. Кроме того, из литературных данных известно, что пространственное расположение корневой системы одного вида может демонстрировать изменчивость, обусловленную факторами окружающей среды и условиями произрастания.

Для исследования было выбрано отдельно стоящее дерево *Picea abies* (L.) H. Karst. возрастом 34 года (рис. 1a). Биометрические параметры надземной части дерева приведены в табл. 1. Выбор этого вида для изучения был обусловлен необходимостью определения характера развития корневой системы *Picea abies* в условиях произрастания в подзоне среднетаежных лесов, а также при близком залегании коренных пород. Известен эффект специфического протекания процессов корнеобразования в зависимости от почвенно-гидрологических условий, почвенного покрова малой мощности и наличия корненепроницаемого горизонта [Калинин, 1991]. В результате происходит прекращение развития стержневого корня с интенсификацией роста корней горизонтальной ориентации, а структура корневой системы принимает выраженный поверхностный характер. Непосредственно для *Picea abies* при произрастании в неблагоприятных условиях установлена потеря порядка ветвления, переход к крупнокорневой структуре и нарушение общей симметрии [Puhe, 2003].

Для раскопки корневой системы был задан квадрат 4×4 м со штамбом в центре (рис. 1b). Корневая система дерева полностью была выкопана ручными совками, после чего эксгумирована. Раскопки выполнялись исходя из имеющихся данных о строении корневой системы *Picea abies*. Для этого вида характерна поверхностная корневая система в виде горизонтальной проекции четырех перпендикулярных и четырех диагональных скелетных корней на глубине от 20 до 40 см.

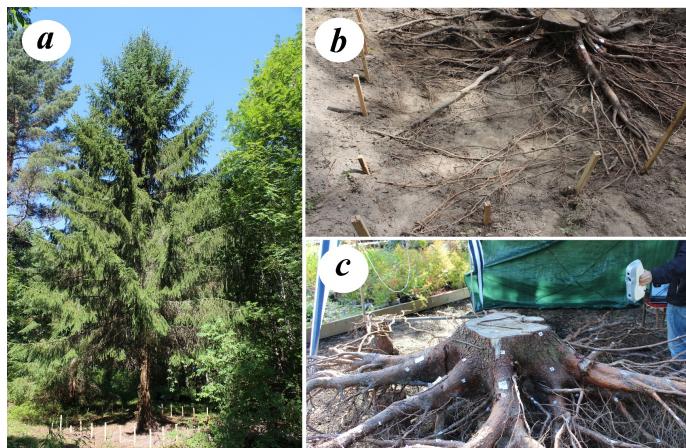


Рис. 1. Объект и этапы исследования корневой системы *Picea abies*:
а – исследуемое дерево; б – фрагмент раскопки корневой системы;
с – 3D-сканирование корневой системы

Fig. 1. Object and stages of research of the root system of *Picea abies*:
a – tree under study; b – fragment of root system excavation;
c – 3D scanning of root system

Таблица 1

Биометрические параметры исследуемого дерева *Picea abies*

Biometric parameters of the studied tree *Picea abies*

Параметр	Значение
Высота дерева, м	17
Диаметр кроны дерева, м	5,7
Диаметр ствола у корневой шейки, см	47
Диаметр ствола на высоте 1,3 м, см	38

Для оптического 3D-сканирования корневой системы после ее эксгумации было проведено 3D-сканирование с помощью ручного сканера Artec Evo (рис. 1с). Скорость сканирования этим сканером составляет 2 млн точек/с с точностью 0,1 мм. Использование этого сканера нашло применение при сканировании небольших биологических объектов: например, в работе [Rist et al., 2018] были оцифрованы грозди винограда для изучения их развития.

Для фенотипирования всей архитектоники корневой системы было произведено сканирование на 360° с трех сторон корней со скоростью 5 кадров в секунду. На корневую систему перед сканированием были приклеены марки для лучшего совмещения сканов. Во время сканирования происходила запись данных о геометрии и цвете корневой системы, а по окончании сканирования результат был преобразован в 3D-облако точек для обработки. Для проведения сканирования и обработки полученных данных использовалось программное обеспечение Artec Studio.

Результаты исследования. При раскопке корневой системы дерева было обнаружено, что основная часть корней расположена в почвенном горизонте на глубине 5–25 см, что указывает на преимущественно приповерхностное распределение. Морфометрическая структура корневой системы включала четыре основных крупных корня с диаметрами 14–22 см, исходящих от ствола дерева и направленных перпендикулярно друг другу, к которым примыкали корни условного 2-го и 3-го порядков (рис. 2). Абсолютное большинство крупных корней располагается в верхнем 30-сантиметровом слое почвы. Крупные корни первого порядка ветвления распространялись в параллельной поверхности земли плоскости непосредственно под подстилкой либо на относительно небольшой глубине (10–25 см). В диагональном направлении выделялись участки повышенного роста корней разных порядков.



*Рис. 2. Результат раскопки корневой системы
Picea abies*

*Fig. 2. The result of excavation of the root system
of *Picea abies**

Исследуемая корневая система была лишена выраженного единственного стержневого корня. Основу корневой системы составили мощные корни горизонтальной направленности, залегающие на небольшой глубине (до 20–30 см) и имеющие значительную протяженность. Эти корни дали начало придающим корневой системе свойство пластичности якорным корням – корням 2-го порядка ветвления, обладающим ярко выраженным положительным геотропизмом. По мере удаления от ствола дерева, глубина проникновения якорных корней в почву и их количество уменьшаются. Наиболее крупные из них формируются вблизи ствола дерева. По величине и массе они значительно уступают горизонтально направленным, располагающимся недалеко от поверхности корням первого порядка.

При 3D-сканировании корневой системы были получены 45 сканов объекта, объединенных в единый 3D-проект. В результате обработки данных удалось реконструировать 3D-модель корневой системы (рис. 3) с 251 отдельным корнем с диаметром от 0,5 см и более. Результаты замеров по 3D-модели показали, что общая протяженность корневой системы составила 18408 см, а средняя длина одного корня – 74,5 см. Диаметры корней варьировались от 0,5 до 18 см, преобладали значения в 1–3 см. Углы наклона отдельных корней в вертикальной плоскости изменялись от 0 до 89°, однако большая часть из них (80%) имела наклон менее 30°. Основные полученные биометрические параметры корневой системы представлены в табл. 2.



Рис. 3. Результат 3D-сканирования корневой системы *Picea abies*

Fig. 3. 3D scan result of *Picea abies* root system

Таблица 2

Биометрические параметры корневой системы *Picea abies*Biometric parameters of the root system of *Picea abies*

Параметр	Значение
Количество корней более 0,5 см, шт.	251
Средний объем корня, см ³	501,46
Объем всей корневой системы, см ³	123860
Средняя длина корня, см	74,5
Протяженность корневой системы, см	18408

Распределение корней по длине представлено на рис. 4а, по диаметру – на рис. 4б. По длине наибольшая встречаемость отмечена у корней длиной от 10 до 50 см. По диаметру наибольшая встречаемость зафиксирована у корней с толщиной от 1 до 2 см. При этом у корней длиной от 200 см и выше диаметр корня невелик и в среднем составляет 4 см. И наоборот, у корней с диаметром от 10 см и выше средняя длина составляет только 65 см, но они вносят самый большой вклад в объем корней корневой системы.



Рис. 4. Распределение отдельных корней по длине и диаметру

Fig. 4. Distribution of individual roots by length and diameter

Распределение корней по углу наклона относительно горизонтальной поверхности представлено на рис. 5. Наибольшая встречаемость была отмечена у корней, имеющих угол наклона от 5° до 20°. Кроме того, углы наклона более 60° встречаются у корней с диаметром, не превышающим 4 см. При этом у корней с диаметром более 10 см средний угол наклона составляет около 15°.

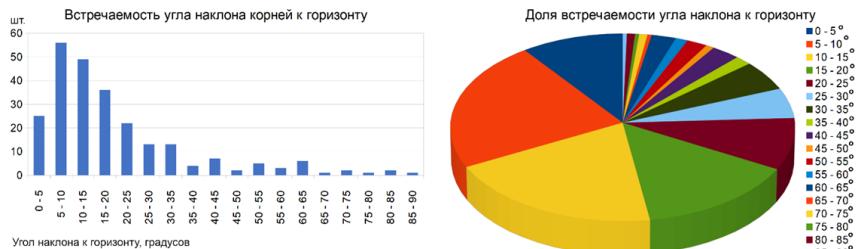


Рис. 5. Распределение корней по углу наклона относительно горизонта

Fig. 5. Distribution of roots by angle of inclination relative to the horizon

Собранные данные подтверждают, что корневая система у обследованного дерева поверхностная, типичная для деревьев вида *Picea abies*. На дренированных суглинистых и супесчаных почвах у деревьев этого вида могут отрастать достаточно мощные вертикальные якорные корни, но из-за близкого залегания скальных пород на исследуемом участке у корневой системы обследованного дерева они не были обнаружены.

Обсуждение. Полученные результаты исследования соответствуют общим представлениям о строении корневой системы деревьев *Picea abies* этого возраста. Результаты исследования развития корневой системы в условиях произрастания в среднетаежном районе не демонстрируют специфическую пространственную изменчивость морфометрической структуры корневой системы деревьев этого вида, произрастающих в других регионах.

Проведенное исследование показало высокую эффективность оптического 3D-сканирования для получения подробной информации о корневой системе с миллиметровой точностью на уровне отдельных корней с диаметром более 0,5 см. Обработка данных позволила сделать вывод не только о типе корневой системы, но и о зависимостях полученных параметров друг от друга.

Кроме того, исследование показало, что метод 3D-сканирования имеет следующие преимущества среди известных дистанционных и ручных методов изучения корневых систем:

1) уменьшение продолжительности полевого этапа исследований за счет более быстрого получения данных о морфометрической структуре корневой системы и биометрических параметрах отдельных корней, что, с учетом достаточно сложных условий труда и частого размещения исследуемых объектов достаточно далеко за пределами населенных пунктов, позволяет снизить нагрузку на исследователя;

2) увеличение точности измерений отдельных корней благодаря использованию оборудования с миллиметровой точностью, причем, с учётом

быстрого развития оборудования и технологий 3D-сканирования, точность измерений будет только расти;

3) возможность автоматизированного расчета биомассы корневой системы и углов наклона отдельных корней относительно горизонта; рост вычислительных мощностей современных компьютеров позволит в ближайшей перспективе выполнять эти расчеты крайне оперативно;

4) большая доступность метода по сравнению с лазерным сканированием LiDAR из-за относительно низкой стоимости оборудования;

5) большая точность 3D-реконструкции объекта в сравнении с фотограмметрией за счет подсвечивания корней специальными узкими полосками света, которые искажаются на криволинейных элементах сканируемого объекта, что и регистрируется камерами 3D-сканера, а также за счет использования акселерометра и гироскопа для упрощения позиционирования отдельных изображений. Следует отметить, что реализация фотограмметрической технологии более доступна, так как можно обойтись только обычным фотоаппаратом или смартфоном, но точность и детализация 3D-модели, полученной таким образом, будут проигрывать 3D-моделям, полученным современным 3D-сканером;

6) возможность объединения полученных 3D-данных с данными, полученными в ходе георадиолокационного сканирования или лазерного сканирования LiDAR корневой системы;

7) возможность демонстрации структуры корневой системы в 3D-пространстве, что может найти применение, в том числе, при обучении студентов лесохозяйственных, аграрных и биологических направлений обучения;

8) 3D-модель корневой системы в электронном виде сохраняется после окончания исследования, к ней можно вернуться в любое время для уточнения результатов, определения новых интересующих параметров или воздействования в новом исследовании.

Сегодня исследование корневых систем деревьев с использованием метода 3D-сканирования требует достаточно дорогостоящего специализированного оборудования и программного обеспечения, а также серьезных вычислительных мощностей, но, учитывая быстрый прогресс вычислительной техники и современных технологий, подобные методы исследования будут с каждым годом становиться все более доступными. Более широкое применение метода 3D-сканирования позволит полнее изучить пространственную структуру корневых систем, в том числе с учетом почвенно-гидрологических условий.

Заключение. Оптическое 3D-сканирование в изучении корневых систем взрослых деревьев позволяет с высокой точностью оценить длину и объем

отдельных корней, их пространственное расположение и проанализировать морфометрическую структуру всей корневой системы. Эти результаты свидетельствуют о возможности получения принципиально новой информации о строении и функционировании корневых систем деревьев. В перспективе подобные исследования имеют практическую значимость по оценке корневой биомассы для решения агротехнических и лесоустроительных задач. Важность применения современных методов при исследованиях корневой системы деревьев объясняется возможностью выработать рекомендации по снижению вероятности ветровалов, которые ведут к снижению полезащитных свойств лесных насаждений и потере лесопарковых защитных поясов вокруг крупных населенных пунктов. Кроме того, учет пространственной структуры корневых систем позволит производить рациональный выбор технологических машин, которые будут более бережно воздействовать на почву и не повреждать поверхностные корневые системы деревьев, что приводит к поражению корней вредителями и заболеваниями и в итоге к гибели деревьев.

Сведения о финансировании исследования. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 075-03-2023-128).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Демидов И.Н., Лукашов А.Д. Рельеф и четвертичные отложения Ботанического сада Петрозаводского государственного университета как основа его современных ландшафтов // Hortus Botanicus. 2001. №1. С. 25–33.

Калинин М.И. Корневедение. М.: Экология, 1991. 173 с.

Колесников В.А. Методы изучения корневой системы древесных растений. М.: Лесн. пром-сть, 1972. 152 с.

Рязанцев П.А., Кабонен А.В., Родионов А.И. Определение архитектоники корневой системы деревьев методом георадиолокации // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2020. №51. С. 179–204.

Atkinson J.A., Pound M.P., Bennett M.J., Wells D.M. Uncovering the hidden half of plants using new advances in root phenotyping // Current Opinion in Biotechnology. 2019. Vol. 55. P. 1–8.

Böhm W. Methods of studying root systems. Berlin: Springer, 1979. 190 p.

Fourcaud T., Ji J., Zhang Z., Stokes A. Understanding the impact of root morphology on uprooting mechanisms: a modelling approach // Annals of Botany. 2008. Vol. 101. P. 1267–1280.

Gärtner H., Wagner B., Heinrich I., Denier C. 3D laser scanning: a new method for analyzing coarse tree root systems // Forest Snow and Landscape. 2009. Vol. 82. P. 95–106.

Koeser A.K., Roberts J., Miesbauer J.W., Lopes A.B., Kling G.J., Lo M., Morgenroth J. Testing the accuracy of imaging software for measuring tree root volumes // *Urban Forest Urban Green.* 2016. №18. P. 95–99.

Lejot J., Delacourt C., Piégay H., Fournier T., Trémélo M.-L., Allemand P. Very high spatial resolution imagery for channel bathymetry and topography from an unmanned mapping controlled platform // *Earth Surf. Process. Landforms.* 2007. Vol. 32. P. 1705–1725.

Miller J., Morgenroth J., Gomez C. 3D modelling of individual trees using a handheld camera: accuracy of height, diameter and volume estimates // *Urban Forest Urban Green.* 2015. Vol. 14. P. 932–940.

Montagnoli A., Lasserre B., Sferra G., Chiatante D., Scippa G.S., Terzaghi M., Dumroese R. Formation of annual ring eccentricity in coarse roots within the root cage of *Pinus ponderosa* growing on slopes // *Plants.* 2020. Vol. 9, iss. 2. Art. no. 181.

Pratt R.B., Jacobsen A.L., North G.B., Sack L., Schenk H.J. Plant hydraulics: new discoveries in the pipeline // *New Phytol.* 2008. Vol. 179, iss. 3. P. 590–593.

Puhe J. Growth and development of the root system of Norway spruce (*Picea abies*) in forest stands – a review // *Forest Ecology and Management.* 2003. Vol. 175, iss. 1–3. P. 253–273.

Rist F., Herzog K., Mack J., Richter R., Steinhage V., Töpfer R. High-Precision Phenotyping of Grape Bunch Architecture Using Fast 3D Sensor and Automation // *Sensors.* 2018. Vol. 18. Art. no. 763.

Todo C., Ikeno H., Yamase K., Tanikawa T., Ohashi M., Dannoura M., Kiumura T., Hirano Y. Reconstruction of conifer root systems mapped using 3D laser scanning point cloud data compared to manual measurement // *Forests.* 2021. Vol. 12, iss. 8. Art. no. 1117.

Vennetier M., Zanetti C., Meriaux P., Mary B. Tree root architecture: new insights from a comprehensive study on dikes // *Plant and Soil.* 2015. Vol. 387. P. 81–101.

References

Atkinson J.A., Pound M.P., Bennett M.J., Wells D.M. Uncovering the hidden half of plants using new advances in root phenotyping. *Current Opinion in Biotechnology,* 2019, vol. 55, pp. 1–8.

Böhm W. Methods of studying root systems. Berlin: Springer, 1979. 190 p.

Demidov I.N., Lukashov A.D. Relief and Quaternary deposits of the Botanical Garden of Petrozavodsk State University as the basis of its modern landscapes. *Hortus Botanicus,* 2001, vol. 1, pp. 25–33. (In Russ.)

Fourcaud T., Ji J., Zhang Z., Stokes A. Understanding the impact of root morphology on uprooting mechanisms: a modelling approach. *Annals of Botany,* 2008, vol. 101, pp. 1267–1280.

Gärtner H., Wagner B., Heinrich I., Denier C. 3D laser scanning: a new method for analyzing coarse tree root systems. *Forest Snow and Landscape,* 2009, vol. 82, pp. 95–106.

Kalinin M.I. Root science. Moscow: Ecology, 1991. 173 p. (In Russ.)

Koeser A.K., Roberts J., Miesbauer J.W., Lopes A.B., Kling G.J., Lo M., Morgenroth J. Testing the accuracy of imaging software for measuring tree root volumes. *Urban Forest Urban Green*, 2016, no. 18, pp. 95–99.

Kolesnikov V.A. Methods of studying the root system of woody plants. Moscow: Lesn. prom-st', 1972. 152 p. (In Russ.)

Lejot J., Delacourt C., Piégay H., Fournier T., Trémélo M.-L., Allemand P. Very high spatial resolution imagery for channel bathymetry and topography from an unmanned mapping controlled platform. *Earth Surf. Process. Landforms*, 2007, vol. 32, pp. 1705–1725.

Miller J., Morgenroth J., Gomez C. 3D modelling of individual trees using a handheld camera: accuracy of height, diameter and volume estimates. *Urban Forest Urban Green*, 2015, vol. 14, pp. 932–940.

Montagnoli A., Lasserre B., Sferra G., Chiatante D., Scippa G.S., Terzaghi M., Dumroese R.K. Formation of annual ring eccentricity in coarse roots within the root cage of *Pinus ponderosa* growing on slopes. *Plants*, 2020, vol. 9, art. no. 181.

Pratt R.B., Jacobsen A.L., North G.B., Sack L., Schenk H.J. Plant hydraulics: new discoveries in the pipeline. *New Phytol.*, 2008, vol. 179, iss. 3, pp. 590–593.

Puhe J. Growth and development of the root system of Norway spruce (*Picea abies*) in forest stands – a review. *Forest Ecology and Management*, 2003, vol. 175, iss. 1–3, pp. 253–273.

Rist F., Herzog K., Mack J., Richter R., Steinhage V., Töpfer R. High-Precision Phenotyping of Grape Bunch Architecture Using Fast 3D Sensor and Automation. *Sensors*, 2018, vol. 18, art. no. 763.

Ryazantsev P.A., Kabonen A.V., Rodionov A.I. Determination of the architectonics of the tree root system using ground penetrating radar. *Bulletin of Tomsk State University. Biology*, 2020, vol. 51, pp. 179–204. (In Russ.)

Todo C., Ikeno H., Yamase K., Tanikawa T., Ohashi M., Dannoura M., Kiumura T., Hirano Y. Reconstruction of conifer root systems mapped using 3D laser scanning point cloud data compared to manual measurement. *Forests*, 2021, vol. 12, iss. 8, art. no. 1117.

Vennetier M., Zanetti C., Meriaux P., Mary B. Tree root architecture: new insights from a comprehensive study on dikes. *Plant and Soil*, 2015, vol. 387, pp. 81–101.

Материал поступил в редакцию 09.10.2024

Кабонен А.В., Рязанцев П.А., Суханов Ю.В., Кувшинов Д.А. Изучение структуры корневой системы дерева методом 3D-сканирования // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 23–36. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.23-36

В статье представлены результаты изучения корневой системы *Picea abies* в условиях произрастания в среднетаежном районе с помощью 3D-сканирования. Для исследования было выбрано отдельно стоящее дерево возрастом 34 года и высотой 17 м. Была проведена эксгумация корневой системы квадратом 4×4 м со

штамбом в центре. Для 3D-сканирования было проведена оцифровка на 360° с трех сторон корневой системы с помощью ручного 3D-сканера Artec Evo. В результате сканирования была реконструирована 3D-модель корневой системы с 251 отдельным корнем с диаметром от 0,5 см и более. Анализ 3D-модели показал, что общая протяженность корневой системы составила 18408 см, а средняя длина одного корня – 74,5 см. Диаметры корней варьировались от 0,5 до 18 см, преобладали значения в 1–3 см. Морфометрическая структура корневой системы включала четыре основных крупных корня с диаметрами 14–22 см, исходящих от ствола дерева и направленных перпендикулярно друг другу, к которым примыкали корни условного 2-го и 3-го порядков. В диагональном направлении выделялись участки повышенного роста корней разных порядков. В целом полученные результаты соответствуют представлениям о корневой архитектонике этого вида дерева.

Ключевые слова: ель европейская, корневая система, 3D-сканирование.

Kabonen A.V., Ryazantsev P.A., Sukhanov Yu.V., Kuvshinov D.A. Study of the structure of the tree root system using 3D scanning. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 23–36 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.23-36

The article presents the results of a study of the *Picea abies* root system in the middle taiga region using 3D scanning. A single 34-year-old tree 17 m high was selected for the study. The root system was exhumed as a 4×4 m square with a rootstock in the center. For 3D scanning, 360° digitalization was performed on three sides of the root system using an Artec Evo handheld 3D scanner. As a result of scanning, a 3D model of the root system was reconstructed with 251 individual roots with a diameter of 0.5 cm or more. Analysis of the 3D model showed that the total length of the root system was 18,408 cm, and the average length of one root was 74.5 cm. The root diameters varied from 0.5 to 18 cm, but 1–3 cm predominated. The morphometric structure of the root system included four main large roots with diameters of 14–22 cm, originating from the tree trunk and directed perpendicular to each other, to which the roots of the conditional 2nd and 3rd orders were adjacent. In the diagonal direction, areas of increased growth of roots of different orders were distinguished. In general, the obtained results correspond to the ideas about the root architectonics of this tree species.

Ключевые слова: European spruce, root system, 3D scanning.

КАБОНЕН Алексей Валерьевич – директор Центра цифрового мониторинга северных и арктических экосистем Петрозаводского государственного университета, кандидат сельско-хозяйственных наук. SPIN-код: 8844-2714. ORCID: 0000-0002-1717-3085.

185910, пр. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Россия. E-mail: alexkabonen@mail.ru

KABONEN Aleksey V. – PhD (Agricultural), Director of the Center for Digital Monitoring of Northern and Arctic Ecosystems, Petrozavodsk State University. SPIN-code: 8844-2714. ORCID: 0000-0002-1717-3085.

185910. Lenin av. 33. Petrozavodsk. Russia. E-mail: alexkabonen@mail.ru

РЯЗАНЦЕВ Павел Александрович – старший научный сотрудник Отдела комплексных научных исследований Карельского научного центра РАН, кандидат геолого-минералогических наук. SPIN-код: 1556-8370. ORCID: 0000-0002-1944-9479.

185000, ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Россия. E-mail: chthonian@yandex.ru

RYAZANTSEV Pavel A. – PhD (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Department of Complex Scientific Research, Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences. SPIN-code: 1556-8370. ORCID: 0000-0002-1944-9479.

185000. Pushkinskaya str. 11. Petrozavodsk. Russia. E-mail: chthonian@yandex.ru

СУХАНОВ Юрий Владимирович – доцент кафедры технологии лесного комплекса и ландшафтной архитектуры Петрозаводского государственного университета, кандидат технических наук. SPIN-код: 3621-2660, AuthorID: 640407. ORCID: 0000-0002-1517-5538.

185910, пр. Ленина, д. 29, г. Петрозаводск, Россия. E-mail: yv_sukhanov@petrsu.ru

SUKHANOV Yuri V. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Forest Technology and Landscape Architecture, Petrozavodsk State University. SPIN-code: 3621-2660. AuthorID: 640407. ORCID: 0000-0002-1517-5538.

185910. Lenin av. 29. Petrozavodsk. Russia. E-mail: yv_sukhanov@petrsu.ru

КУВШИНОВ Дмитрий Александрович – доцент кафедры технологии и организации строительства Петрозаводского государственного университета, кандидат технических наук.

185910, пр. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Россия. E-mail: KuvshinovDA@yandex.ru

KUVSHINOV Dmitriy A. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Technology and Organization of Construction, Petrozavodsk State University.

185910. Lenin av. 33. Petrozavodsk. Russia. E-mail: KuvshinovDA@yandex.ru

Д.С. Трошин, Д.М. Мирин

**ВЛИЯНИЕ СОХРАНЕНИЯ *POPULUS TREMULA*
НА ВЫРУБКАХ ЕЛЬНИКОВ КИСЛИЧНЫХ
НА ДИНАМИКУ ДРЕВЕСНЫХ КОМПОНЕНТОВ В ТЕЧЕНИЕ 15 ЛЕТ**

Введение. В современной практике лесопользования Российской Федерации доминирующее положение занимают сплошные рубки, составляющие приблизительно 84% от совокупного объема лесозаготовок¹. Данная парадигма лесоэксплуатации влечет за собой каскад экологических последствий, включая радикальную трансформацию лесных ландшафтов, фрагментацию биотопов и упрощение структурно-функциональной организации лесных фитоценозов [Крышень, Гнатюк, 2004; Федорчук и др., 2005; Крышень, 2011; Говорушко, 2014].

Постэксплуатационный период характеризуется существенными модификациями лесной экосистемы, затрагивающими ключевые абиотические факторы. Наблюдается интенсификация инсоляции, что провоцирует дестабилизацию гидротермического режима и нарушение процессов формирования лесной подстилки – важнейшего компонента эдафотопа [Федорчук и др., 2005; Мартынов и др., 2008; Крышень, 2011]. Эти изменения инициируют сукцессионные процессы, кардинально меняющие траекторию развития лесного биогеоценоза.

В свете вышеизложенных проблем актуализируется необходимость исследования и внедрения альтернативных подходов к лесопользованию, направленных на минимизацию антропогенной нагрузки на лесные экосистемы и сохранение их биологического разнообразия. Одной из перспективных стратегий является концепция «variable retention» (удерживающего, или ретенционного, лесоводства), в частности, практика сохранения определенного количества деревьев, например, *Populus tremula* L., на вырубках [Багаев и др., 2016; Martínez Pastur et al., 2020]. Этот подход потенциально способен обеспечить экологическую континуальность и ускорить процессы восстановления лесной среды.

¹ Распоряжение Правительства РФ от 20.09.2018 №1989-р (ред. от 28.02.2019) «Об утверждении Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года»

Цель исследования – выявить особенности влияния сохранения *Populus tremula* на динамику древесных компонентов в ходе 15-летней сукцессии на вырубках ельников кисличных в Вологодской области.

Предметом настоящего исследования выступает динамика древесных компонентов на 15-летних вырубках ельников кисличных, а объектом – влияние сохранения осины на эту динамику в условиях boreальных лесов Вологодской области.

Теоретическая значимость работы заключается в расширении научных представлений о процессах автогенной сукцессии и механизмах естественного лесовосстановления. Практическая значимость исследования состоит в возможности использования полученных результатов для разработки более эффективных и экологически обоснованных методов лесопользования и лесовосстановления. Это может способствовать оптимизации лесохозяйственных мероприятий, направленных на сохранение биоразнообразия и повышение устойчивости лесных экосистем к антропогенным воздействиям.

Материалы и методика исследования. Исследование проведено в Бабаевском районе Вологодской области (рис. 1), в ельниках кисличных (*Piceetum oxalidosum*) и на вырубках на их месте.

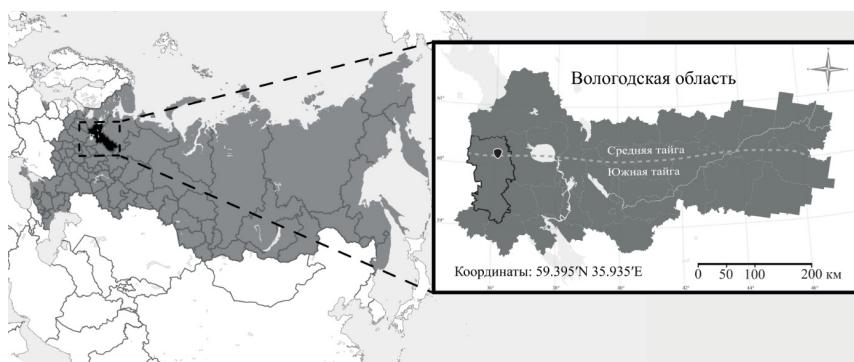


Рис. 1. Карта-схема расположения Вологодской области и Бабаевского района.

(Слева – территория России и соседних стран; справа – Вологодская область с выделенной территорией Бабаевского района на западе области. Пунктирной линией обозначена условная граница между средней и южной подзонами тайги.

Черной точкой обозначено место исследования)

Fig. 1. The map of Vologda region and Babaevsky District. (On the left is the territory of Russia and the neighboring countries; on the right – Vologda region with the highlighted territory of Babaevsky District in the west of the region. The dotted line indicates the conventional boundary between the central and southern taiga subzones. The black dot indicates the study area)

Район исследования находится на границу средней и южной подзон тайги и занимает территорию, относящуюся к Вепсовско-Мегорской возвышенности и Молого-Судской низине. Участки исследования приурочены к кварталам (кв.) и выделам (в.) лесничеств: вырубка 2023 г. – КСХП «Колос» кв. 12, в. 16; вырубка 2021 г. – КСХП «Колос», кв. 5, в. 12; вырубка 2018 г. – КСХП «Колос», кв. 12, в. 15; вырубка 2013 г. – КСХП «Колос», кв. 29, в. 13–14; вырубка 2008 г. – Тимошенское лесничество, кв. 66, в. 47. Полевые исследования проводили в период с июля по август 2023 г., что обеспечило оптимальные условия для идентификации видов и оценки их обилия.

Хронологический диапазон в рамках данного исследования охватывал пять сроков сукцессии: свежие вырубки (2023 г.), вырубки двух-, пяти-, десяти- и пятнадцатилетней давности. Для установления референсных значений и оценки степени антропогенной трансформации фитоценозов были заложены пробные площади в прилегающих лесах в пределах тех же выделов, что и вырубки в лесоустроительных данных до рубки [Ниценко, 1961].

Методологический подход базировался на принципе пространственно-временных аналогий (space-for-time substitution), позволяющем реконструировать временную динамику растительности путем изучения пространственно распределенных участков различной давности нарушения [Александрова, 1964; Pickett, 1989]. Данная методика обеспечила возможность проведения сравнительного анализа сукцессионных изменений растительного покрова от интактных лесных экосистем до 15-летних послерубочных сообществ.

Пробные площади (ПП) были заложены на участках, где рубки осуществлялись с применением тяжелой лесозаготовительной техники, преимущественно валочно-пакетирующих машин, с последующей очисткой территории и сбором порубочных остатков. Всего было заложено 60 временных пробных площадей, из которых 45 – на вырубках и 15 – в прилегающем лесу (контроль), что обеспечило статистическую достоверность полученных данных. На каждой пробной площади размером 100 м² проводили геоботаническое описание. Описания выполняли на расстоянии не менее 30 м от экотонных зон (стен прилегающего леса или соседних вырубок) для минимизации краевого эффекта и обеспечения репрезентативности данных.

Экспериментальный дизайн включал следующие варианты: 1) рубки без оставления осин («Открытые») – имитация традиционной практики

сплошных рубок; 2) рубки с оставлением одиночных деревьев осины («Одиночные деревья») – до 7 особей на ПП, расстояние между деревьями не менее 7 м, сквозистость более 65%; 3) вырубки с оставлением куртин деревьев («Куртина») – до 10 деревьев на ПП, расстояние между стволами не более 3 м, сквозистость не более 65%; 4) прилегающий лес (контроль) – эталонные сообщества, представленные в первом ярусе елью *Picea abies* (L.) H.Karst. со средним диаметром 42 см и высотой 25 м (от 700 до 1100 экз./га), осиной со средним диаметром 54 см и высотой 22 м (не более 200, в среднем 53 экз./га). В составе древостоя также присутствуют *Betula pendula* Roth, 53 экз./га и *Alnus incana* (L.) Moench, 20 экз./га. Возраст древостоя составляет 80–100 лет, средняя сомкнутость крон 0,7.

Были изучены следующие параметры древостоя: ярусность; таксационные показатели (число деревьев, средний и максимальный диаметры стволов на высоте 1,3 м, средняя и максимальная высоты деревьев); жизненное состояние по шкале от 0 до 5 [Методы..., 2002]. Дендрометрические измерения проводили с использованием оптико-механического высотомера Suunto при базовом расстоянии 15 метров с точностью определения высоты деревьев до 0,5 м.

Оценка возобновления включала анализ подроста по следующим параметрам: количественный учет особей по категориям крупности (мелкий – до 0,5 м, средний – 0,5–1,5 м, крупный – 1,5–3 м, перспективный – более 3 м); качественное состояние по трёхбалльной шкале (хорошее, удовлетворительное, неудовлетворительное) на основе комплекса морфологических признаков. Для подлеска регистрировались проективное покрытие и высота (преобладающая и максимальная).

Результаты исследования.

1. *Динамика жизненного состояния и структуры древостоя на вырубках ельников кисличных при различных вариантах сохранения Populus tremula.*

Анализ сохраненного древесного яруса на вырубках ельников кисличных выявил существенные различия в жизненном состоянии древесных пород в зависимости от формы их сохранения и временного интервала после проведения лесозаготовительных мероприятий. На вырубках помимо специально оставленных деревьев *Populus tremula* в меньшей степени были представлены *Picea abies*, *Betula pendula*, *Pinus sylvestris* L. и *Alnus incana*. Всего было обследовано 347 деревьев на вырубках и в прилегающих лесных массивах.

В ненарушенных лесных сообществах (контроль) преобладают преимущественно здоровые деревья (рис. 2а). Средние параметры *Picea abies* (80–100 лет) в ельниках кисличных составили: высота – 25 м, диаметр ствола – 42 см (максимум – 80 см).

На свежих вырубках (2023 г.) сохранились *Populus tremula*, а также единичные особи *Picea abies* и других древесных пород, оставленные для обеспечения естественного возобновления. Оставленные деревья демонстрировали здоровое состояние, аналогичное контролю (прилегающие к вырубкам ельники). Однако уже на 2–5-летних вырубках (2021 и 2018 гг. соответственно) отмечалось ухудшение состояния деревьев. У сохраненных хвойных пород наблюдалось выгорание хвои под воздействием прямого солнечного света, что являлось основной причиной их ослабления. К 10 годам после рубки (вырубки 2013 г.) среди деревьев преобладал свежий сухостой, а к 15 годам после лесозаготовительных мероприятий (2008 г.) практически все особи перешли в категорию старого сухостоя.

Анализ жизненного состояния отдельных древесных пород (рис. 2а) выявил различную динамику их устойчивости к изменившимся условиям среды. На свежих вырубках состояние семенных деревьев *Picea abies* несколько ухудшалось, но незначительно – до 2 баллов по шкале категорий жизненного состояния деревьев, примерно такой же уровень состояния сохранялся 5 лет. На вырубках давностью 10 лет в небольшом количестве (одиночные особи) присутствовал старый сухостой семенных елей, большинство особей этой породы перешло в категорию свежего сухостоя.

В отличие от ели, оставленные деревья *Populus tremula* демонстрировали большую устойчивость к изменившимся условиям. Заметное ухудшение состояния наблюдалось лишь к 10 годам, когда большинство особей перешло в категорию сухостоя. К 15 годам после рубки происходило полное выпадение осины в результате бурелома.

В рамках исследования анализировали влияние двух основных вариантов сохранения *Populus tremula* на вырубках – рубки с оставлением одиночных деревьев осин и рубки с оставлением куртины деревьев (рис. 2б). В куртинах совместно с осиной сохранялись отдельные экземпляры *Picea abies*, выполняющие роль семенников. Распределение между вариантами сохранения деревьев было неравномерным. При объединении данных за 15-летний период исследования и анализа в разрезе двух вариантов рубок было выявлено, что среднее жизненное состояние оставленных пород в группе одиночных деревьев составляло 3 балла, тогда как для куртин этот показатель составил 2,1 балла. Жизненное состояние *Populus tremula* при

варианте сохранения одиночных особей на вырубках было ниже, чем в варианте сохранения особей в куртинах.

Наиболее отчетливые различия в вариантах вырубок наблюдались у *Picea abies*. Густота ели при оставлении на открытых участках совместно с одиночными осинами составляла порядка 7 экземпляров на гектар, в то время как в куртинах осины густота ели составляла в среднем 87 экз./га. В куртинах жизненное состояние ели было лучше (2,2 балла) по сравнению с вариантом «одиночные деревья» (5 баллов).

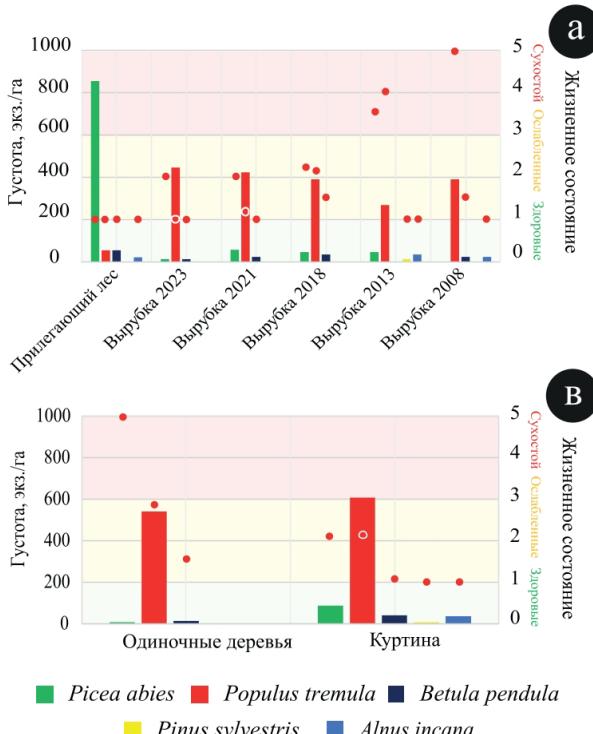


Рис. 2. Жизненное состояние (точки, правая ось ординат) и густота по элементам леса (столбцы, левая ось ординат) на вырубках разной давности (а) и с разным вариантом сохранения осины на вырубках (в) в ельниках кисличных

Fig. 2. The health state (points on the right ordinate axis) and the density of tree species (columns on the left ordinate axis) in clearcuts of varying ages (a) and with differing aspen conservation strategies (b) in wood sorrel-spruce forests

Остальные древесные породы, такие как *Pinus sylvestris*, *Alnus incana* и *Betula pendula*, несмотря на низкую густоту (единичные особи) на вырубках, демонстрировали относительно хорошее жизненное состояние, варьирующее от здоровых до ослабленных (1–2,4 балла). Вероятно, это связано с тем, что данные породы являются светолюбивыми и способны благоприятно переносить изменения освещения, связанные с вырубками. Однако следует учитывать, что низкая численность этих пород на исследуемых территориях затрудняет выявление четких закономерностей.

2. Влияние сохранения *Populus tremula* на динамику и структуру древесного подроста в условиях антропогенной трансформации вырубок.

Анализ полученных данных показал существенные различия в количественных и качественных характеристиках лесовозобновления в зависимости от способа сохранения древостоя и давности рубки в условиях ельников кисличных. На исследуемых пробных площадях было идентифицировано шесть видов древесных пород в категории подроста: *Alnus incana*, *Betula pendula*, *Betula pubescens* Ehrh., *Picea abies*, *Pinus sylvestris* и *Populus tremula*.

Динамика лесовозобновления демонстрировала характерные сукцессионные изменения (рис. 3а). На свежих вырубках доминировал подрост *Populus tremula* (66% от общей численности), при этом *Picea abies* занимала субдоминантное положение (24%). К двухлетней давности вырубки отмечено сохранение доли *Picea abies* – 22%. Значимые изменения в соотношении численности подроста *Populus tremula* и *Picea abies* в пользу ели зафиксированы на пятый год после рубки. На участках с 5-летней давностью рубки появляется, а на 10–15-летних вырубках становится обильной *A. incana* в составе подроста.

Анализ высотной структуры подроста выявил преобладание мелкого подроста (до 0,5 м) – 65% от общего количества. Доля среднего подроста составила 32%, высокого (более 3 м) – 3%. Наибольшая вариабельность по категориям состояния наблюдалась среди крупных особей, что может быть связано с кумулятивным эффектом длительного воздействия экологических факторов.

Количественный анализ густоты подроста выявил существенные различия между вариантами вырубок (рис. 3б). На участках с сохранением одиночных деревьев *Populus tremula* зафиксировано наибольшее количество подроста – 4420 экз./га. В лесах, прилегающих к вырубкам, отмечена несколько меньшая густота подроста – 4093 экз./га, тогда как на участках с куртинным сохранением древостоя наблюдалась минимальная густота – 3540 экз./га.

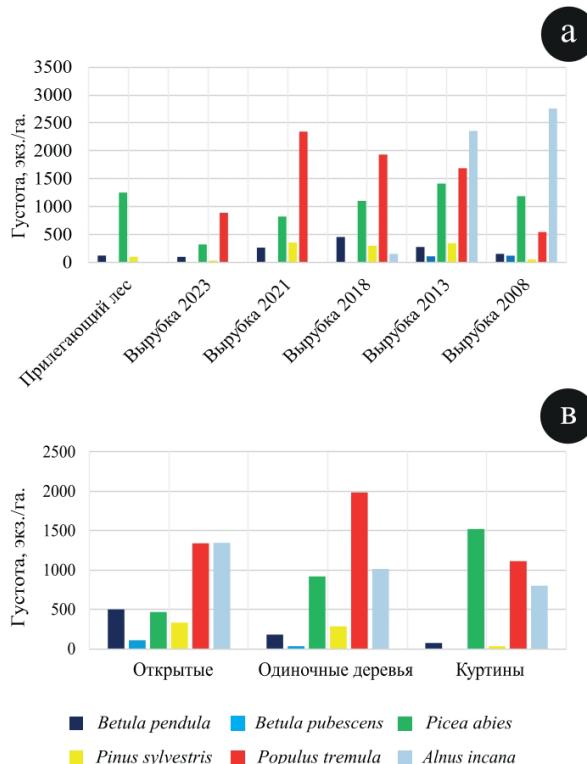


Рис. 3. Густота подроста на вырубках разной давности (а) и разных вариантах рубок (в) в ельниках кисличных

Fig. 3. The undergrowth quantity in the clearcuts of varying ages (a) and harvesting options (b) in wood sorrel-spruce forests

Примечательной особенностью является минимальная густота подроста *Populus tremula* на участках с куртinnым сохранением древостоя, что, вероятно, связано с особенностями работы харвестера, минимизирующего механическое воздействие на корневые системы. В противоположность этому, на участках с сохранением одиночных деревьев наблюдалась наибольшая густота подроста, что может быть обусловлено механическим воздействием лесозаготовительной техники на корневую систему осины, стимулирующим процессы порослевообразования. Снижение густоты подроста осины на участках вырубок, где не были сохранены деревья, вероятно, обусловлено отсутствием взрослых особей осины на этих территориях до

момента проведения рубки, что исключает возможность последующего порослеобразования.

3. Влияние сохранения *Populus tremula* на видовой состав и обилие подлеска в условиях антропогенной трансформации вырубок

В ходе исследования динамики подлеска на 15-летних вырубках ельников кисличных выявлено 14 видов древесных растений: *Daphne mezereum* L., *Frangula alnus* Mill., *Juniperus communis* L., *Lonicera xylosteum* L., *Padus avium* Mill., *Ribes spicatum* E. Robson, *Rosa cinnamomea* L., *Rubus idaeus* L., *Salix aurita* L., *S. caprea* L., *S. pentandra* L., *S. triandra* L., *Sorbus aucuparia* L., *Viburnum opulus* L. Все идентифицированные особи характеризовались высоким жизненным состоянием, без признаков патологий и повреждений.

Анализ динамики и структуры подлеска в зависимости от варианта сохранения *Populus tremula* показал существенные различия (рис. 4а, б). На открытых вырубках (без сохранения осины) общая сомкнутость подлеска составила 22%. В первые годы после рубки наблюдалось значительное обеднение видового состава, присутствовали только три вида (*Juniperus communis*, *Rubus idaeus* и *Sorbus aucuparia*). К пятому году после рубки зафиксировано максимальное видовое разнообразие, появились *Ribes spicatum*, *Padus avium*, *Salix pentandra* и *S. triandra*.

Особый интерес представляет динамика доминирующих видов подлеска – *Rubus idaeus* и *Sorbus aucuparia*. Малина обыкновенная демонстрировала выраженную стадийность развития: на свежих вырубках проективное покрытие составляло до 2% с преобладанием ювенильных и имматурных особей высотой до 30 см. К двухлетнему возрасту вырубки популяция перешла преимущественно в виргинильное состояние, проективное покрытие возросло до 5% при 100% встречаемости. На пятилетних вырубках сформировалась нормальная неполночленная ценопопуляция с проективным покрытием до 10%. К 10–15-му году наблюдалось снижение обилия вплоть до полного исчезновения вида. Это соответствует данным с южной границы южной тайги [Давлетшина, Уланова, 1996].

Sorbus aucuparia показала иную динамику. В прилегающих ельниках кисличных проективное покрытие рябины составляло 2%. На ранней стадии колонизации (0–2 года) встречаемость достигала 90–100%. В период активного роста (2–5 лет) проективное покрытие увеличилось до 10%. Стадия стабилизации (5–10 лет) характеризовалась максимальными значениями численности. На стадии конкуренции (10–15 лет) средняя высота экземпляров достигала 4,5 м при максимальной высоте 8 м.

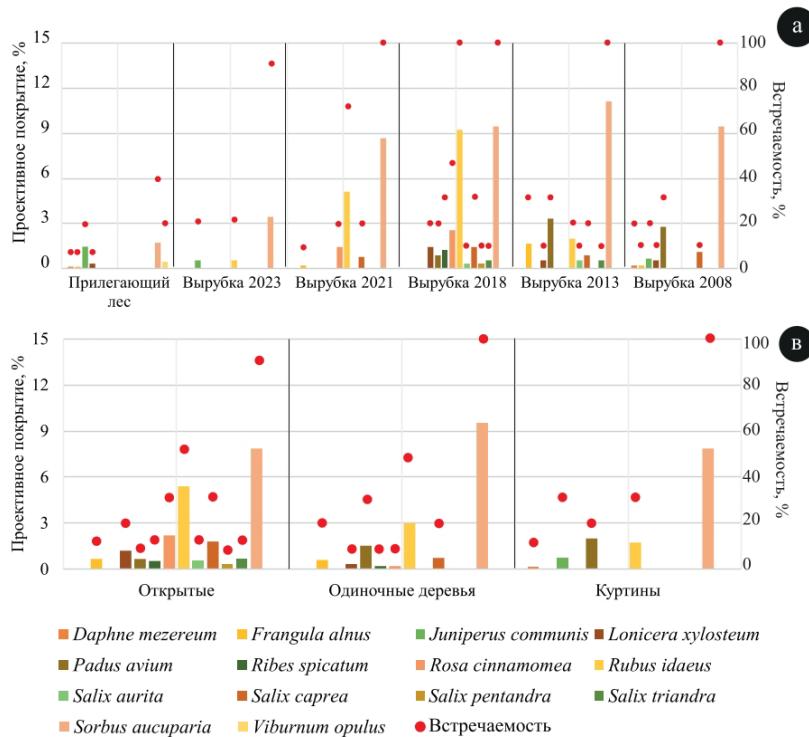


Рис. 4. Проективное покрытие и встречаемость видов подлеска на вырубках разной давности (а) и варианта рубки (в) ельников кисличных

Fig. 4. The coverage and constancy of undergrowth species in clearcuts of different age (a) and harvesting type (b) of wood sorrel-spruce forests

Наибольшие различия в структуре подлеска проявились между открытыми вырубками и участками с сохранением куртин осины. В куртинах формировались условия, близкие к типично лесной среде, что способствовало сохранению сциофитных видов. На открытых участках доминировали светолюбивые виды, особенно представители рода *Salix*, формирующие пионерные группировки.

Обсуждение. Проведенное исследование позволило выявить воздействие различных способов сохранения *Populus tremula* на динамику древесных компонентов (до 15 лет) в бывших ельниках кисличных. Результаты подтверждают ряд существующих закономерностей лесовосстановительных

сукцессий и демонстрируют новые аспекты структурно-функциональной организации формирующихся фитоценозов.

Подтверждаются закономерности сукцессий после сплошных рубок в ельниках кисличных, которые были описаны в работах Федорчука с соавторами [Федорчук, Кузнецова, 1995; Федорчук и др., 2005] и основаны на данных постоянных пробных площадей в таежных лесах средней и южной подзоны Ленинградской области. Установлено, что наиболее существенные изменения в структуре древостоя происходят через 3–6 лет после рубки, что в нашем случае проявляется в значительном изменении соотношения подроста *Populus tremula* и *Picea abies* на пятый год.

Исследование подтвердило уязвимость одиночных семенников *Picea abies* на вырубках [Кузьмин, 1961]. Выявленный ускоренный отпад в ельниках кисличных, где полный переход в категорию сухостоя происходит за 2–5 лет, свидетельствует о более интенсивной динамике деградации по сравнению с лесорастительными условиями ельников черничных. Данное различие может быть обусловлено эдафическими особенностями типов леса и спецификой изменений гидрологического режима. Принципиально важным результатом является эффект куртин *Populus tremula*, формирующих благоприятный микроклимат для выживаемости подроста *Picea abies*. Это соответствует концепции «растения-няни» [Гиляров, 1990; Миркин, Наумова, 2011], где осина выступает эдификатором, поддерживающим теплолюбивые виды.

Анализ динамики возобновления выявил сложную картину временной и пространственной гетерогенности сукцессионных процессов. Доминирование мягколиственных пород в начальный период (70% от общего количества подроста) соответствует концепции начального флористического состава и подтверждает выводы [Морозов, 1912; Бурова и др., 2011]. Взаимосвязь между долевым участием *Populus tremula* и *Picea abies* в составе формирующихся насаждений определяется значимой отрицательной корреляцией ($r=-0,637$; $p<0,05$). Дисперсионный анализ ($F=8,90$; $p<0,001$) показал существенные различия в количестве подроста ели на разных стадиях восстановления. Апостериорный анализ по критерию Тьюки выявил значимое увеличение количества подроста ели после 10 лет по сравнению со свежими вырубками ($p<0,001$). При этом наиболее существенные различия наблюдались между свежими вырубками и контрольными участками ($p<0,001$), что может говорить о постепенном восстановлении елового подроста. Период 2–5 лет характеризуется как переходный, без значимых различий с другими стадиями восстановления, за исключением контроля

($p < 0,05$). Такая динамика указывает на то, что преобладание подроста осины на ранних стадиях закономерно сменяется преобладанием подроста ели, особенно на участках, где были оставлены куртины деревьев.

Следует предположить, что полная расчистка вырубки стимулирует порослеобразование осины за счет механического повреждения корней при лесозаготовке. В то же время сохраненные деревья (одиночные или куртинные) характеризуются пониженной порослевой активностью, что связано с минимизацией воздействия лесозаготовительной техники на почву и оставляемый древостой вблизи этих деревьев. Важно отметить, что присутствие сохранных деревьев создает благоприятные условия для успешного поселения и выживания подроста *Picea abies*. С увеличением количества сохранных деревьев осины в составе возобновления начинает преобладать подрост ели.

Особого внимания заслуживает густота *Alnus incana* в составе подроста на 5–15-летних вырубках. Этот вид часто заселяет рыхлые и влажные, но хорошо аэрируемые почвы, что может свидетельствовать о процессах изменения гидрологического режима участка. Данный феномен требует дальнейшего изучения в контексте экосистемного инжиниринга после нарушений. В отличие от застраивающих серой ольхой лугов, где *Alnus incana* часто негативно влияет на возобновление ели [Тиходеева, Лебедева, 2012], на вырубках серая ольха не образует таких плотных зарослей, и к 15 годам после рубки ельника кисличного густота ее подроста снижается.

Наблюдаемые различия в видовом составе подлеска в зависимости от способа сохранения *Populus tremula* отражают влияние условий среды на выживание и развитие различных видов. Максимальное видовое разнообразие (14 видов) на открытых участках можно объяснить теорией умеренных нарушений, согласно которой частичное нарушение экосистемы создает благоприятные условия для существования большего числа видов. В то же время, снижение числа видов до 5–8 в вариантах с сохранением осины указывает на более строгий отбор видов, способных существовать в условиях конкуренции с сохраненным древостоем за свет и почвенные ресурсы. Наибольшая доступность для вселения анемохорных видов (ивы) и наименьшее подавление подлеска древостоем в сочетании с подростом наблюдается на открытых вырубках. Виды подлеска демонстрируют разнообразие жизненных стратегий – от типичной г-стратегии с быстрым разрастанием на вырубке и резким сокращением обилия к стадии с достаточно густым и высоким подростом деревьев на 10–15-летних вырубках как у малины до стратегий, сочетающих относительно высокую конкурентоспо-

собность в пределах яруса и устойчивость к сильному затенению (KS-стратегия у рябины).

Через 15 лет после рубки на открытых участках и при сохранении одиночных осин доля подроста *Populus tremula* составляет около 66% от численности елового подроста. На площадках с куртинным сохранением деревьев численность подроста осины в 4 раза ниже, чем подроста ели. Таким образом, сохранение осины с отдельными экземплярами ели при сплошной рубке (>50% древостоя) способствует формированию елового древостоя с минимальной примесью мелколиственных пород.

Сплошная рубка без сохранения осины, при отсутствии систематического ухода или предварительной обработки арборицидами, приводит к формированию смешанного древостоя с существенной долей мелколиственных пород к моменту достижения спелого возраста. При этом важно учитывать, что сохраненные старые осины к моменту рубки нового древостоя исключаются из его состава вследствие достижения предельного возраста и снижения устойчивости к ветровым нагрузкам.

Полученные результаты позволяют рекомендовать при проведении рубок в ельниках кисличных куртинный способ сохранения *Populus tremula*, который является наиболее эффективным для поддержания популяционной устойчивости *Picea abies* и сохранения типично лесных видов подлеска.

Дальнейшие исследования целесообразно сфокусировать на следующих аспектах:

1. Изучение механизмов взаимодействий в системе «сохраненный древостой – подрост – подлесок» на вырубках;
2. Качественная оценка пространственной гетерогенности микроклиматических и эдафических условий в различных вариантах сохранения *Populus tremula*;
3. Долгосрочный мониторинг гидрологического режима и процессов гидроморфизациии почв на вырубках;
4. Сравнительный анализ эффективности различных схем пространственного размещения сохраняемых деревьев.

Комплексная реализация данных направлений исследований позволит углубить понимание механизмов восстановления бореальных лесных экосистем и оптимизировать практики устойчивого лесопользования.

Заключение. Проведенное исследование влияния сохранения *Populus tremula* на динамику древесных компонентов в ельниках кисличных позволило выявить ряд существенных закономерностей, имеющих как теоретическое, так и практическое значение для лесной экологии и лесного хозяйства.

Установлено дифференцированное влияние способов сохранения древостоя на выживаемость *Picea abies*. Сохранение одиночных еловых семенников на открытых участках вырубок демонстрирует крайне низкую эффективность, приводя к их полному отпаду в течение первых 2–5 лет. Напротив, куртинное сохранение осины обеспечивает выживание еловых семенников до 10 лет, что достаточно для реализации их репродуктивной функции в процессе лесовосстановления.

В структуре подроста в первое пятилетие доминируют мягколиственные породы (около 70% состава) с последующей сменой доминантов к 10-летнему рубежу, где отмечено увеличение участия *Alnus incana* при одновременном снижении обилия *Betula* spp. и *Populus tremula*. Подтверждена гипотеза о повышенной успешности возобновления и выживаемости подроста *Picea abies* в условиях умеренного затенения куртинами осины.

Документирована структурная реорганизация подлеска, характеризующаяся максимальным видовым разнообразием на открытых участках вырубок (14 видов) и его закономерным снижением в вариантах с сохранением элементов древостоя. При этом сохранение осин в небольших куртинах способствует поддержанию популяций типично лесных видов подлеска.

Прослежены видоспецифические траектории развития ключевых компонентов подлеска: г-стратегия *Rubus idaeus* с пиком обилия в первые годы и последующим снижением к 15-летнему рубежу, и KS-стратегия *Sorbus aucuparia* с постепенным увеличением численности и формированием устойчивых популяций на богатых почвах.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности куртинного способа сохранения *Populus tremula* как инструмента поддержания структурной и функциональной связности лесных экосистем в процессе их естественного лесовосстановления. Данный подход обеспечивает оптимальный баланс между хозяйственным использованием лесных ресурсов и сохранением экологической целостности бореальных лесных сообществ.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Александрова В.Д. Изучение смен растительного покрова // Полевая геоботаника. М.-Л., 1964. Т. 3. С. 300–447.

Багаев С.С., Багаев Е.С., Дудин В.А. Об оставлении на корню перестойной осины при проведении сплошных рубок в смешанных древостоях // Лесохозяйственная информация. 2016. № 3. С. 107–114.

Бурова Н.В., Рай Е.А., Шаврина Е.В. Особенности естественного возобновления в ельниках черничных среднетаежной подзоны после сплошных рубок // Arctic Environmental Research. 2011. № 1. С. 27–31.

Гиляров А.М. Популяционная экология: учеб. пос. М.: МГУ, 1990. 191 с.

Говорушки С.М. Экологические последствия лесозаготовок // ИВУЗ. Лесной журнал. 2014. № 1 (337). С. 45–53.

Давлетшина Г.Т., Уланова Н.Г. Малина обыкновенная // Биологическая флора Московской области. М., 1996. № 12. С. 89–112.

Крышень А.М. Механизмы развития и устойчивости лесных растительных сообществ // Отечественная геоботаника: основные вехи и перспективы. СПб., 2011. С. 116–119.

Крышень А.М., Гнатюк Е.П. Разнообразие растительных сообществ вырубок Карелии // Антропогенная трансформация таежных экосистем Европы: экологические, ресурсные и хозяйствственные аспекты. Петрозаводск, 2004. С. 178–182.

Кузьмин И.А. К вопросу об эффективности обсеменителей на вырубках ельников-черничников // Труды Карельского филиала АН СССР. 1961. № 25. С. 59–66.

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

Миркин Б.М., Наумова Л.Г. Краткий курс общей экологии. Часть I: Экология видов и популяций: учеб. Уфа: БГПУ, 2011. 206 с.

Морозов Г.Ф. Учение о лесе. Вып. 1. Введение в биологию леса. СПб., 1912. 183 с.

Ниценко А.А. Изменение естественной растительности Ленинградской области под влиянием человека. Л.: Изд-во ЛГУ, 1961. 51 с.

Мартынов А.Н., Мельников Е.С., Ковязин В.Ф., Аникин А.С., Минаев В.Н., Беляева Н.В. Основы лесного хозяйства и таксация леса: учеб. пос. СПб.: Лань, 2008. 372 с.

Тихоедеева М.Ю., Лебедева В.Х. Восстановление лесной растительности на месте суходольных лугов // Изв. Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14, №1(5). С. 1383–1386.

Федорчук В.Н., Кузнецова М.Л. Изменение показателей лесных биогеоценозов на начальных этапах восстановительной сукцессии после сплошных рубок (по материалам постоянных наблюдений) // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отд. Биология. 1995. Т. 100, № 2. С. 85–99.

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

Martínez Pastur G.J., Vanha-Majamaa I., Franklin J.F.. Ecological perspectives on variable retention forestry // Ecological processes. 2020. Vol. 9. Art. no. 12.

Pickett S.T.A. Space-for-Time Substitution as an Alternative to Long-Term Studies // Long-Term Studies in Ecology / ed. by G. E. Likens. NYC, 1989. P. 110–135.

References

- Aleksandrova V.D. Izuchenie smen rastitel'nogo pokrova. *Polevaya geobotanika*. Moscow-Leningrad, 1964, vol. 3, pp. 300–447. (In Russ.)
- Bagaev S.S., Bagaev E.S., Dudin V.A. Ob ostavlenii na kornyu perestojnoj osiny pri provedenii sploshnykh rubok v smeshannykh drevostoyakh. *Lesokhozyajstvennaya informatsiya*, 2016, vol. 3, pp. 107–114. (In Russ.)
- Burova N.V., Raj E.A., Shavrina E.V. Osobennosti estestvennogo vozobnovleniya v el'nikakh chernichnykh srednetaezhnoj podzony posle sploshnykh rubok. *Arctic Environmental Research*, 2011, vol. 1, pp. 27–31. (In Russ.)
- Davletshina G.T., Ulanova N.G. Malina obyknovennaya. *Biologicheskaya flora Moskovskoy oblasti*. Moscow, 1996, iss. 12, pp. 89–112. (In Russ.)
- Fedorchuk V.N., Kuznetsova M.L. Izmenenie pokazatelej lesnykh biogeotsenozov na nachal'nykh etapakh vosstanovitel'noj suktsessii posle sploshnykh rubok (po materialam postoyannykh nablyudenij). *Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytatelej prirody. Otd. Biologiya*, 1995, vol. 100, no. 2, pp. 85–99. (In Russ.)
- Fedorchuk V.N., Neshataev V.Yu., Kuznetsova M.L. Lesnye ekosistemy severo-zapadnykh rajonov Rossii. Tipologiya, dinamika, khozyajstvennye osobennosti. St. Petersburg, 2005. 382 p. (In Russ.)
- Gilyarov A.M. Populyatsionnaya ekologiya: ucheb. pos. Moscow: MSU, 1990. 191 p. (In Russ.)
- Govorushko S.M. Ekologicheskie posledstviya lesozagotovok. *IVUZ. Lesnoj zhurnal*, 2014, vol. 1 (337), pp. 45–53. (In Russ.)
- Kryshen' A.M. Mekhanizmy razvitiya i ustojchivosti lesnykh rastitel'nykh soobshchestv. *Otechestvennaya geobotanika: osnovnye vekhi i perspektivy*. St. Petersburg, 2011, pp. 116–119. (In Russ.)
- Kryshen' A.M., Gnatyuk E.P. Raznoobrazie rastitel'nykh soobshchestv vyrubok Karelii. *Antropogennaya transformatsiya taezhnykh ekosistem Evropy: ekologicheskie, resursnye i khozyajstvennye aspekty*. Petrozavodsk, 2004, pp. 178–182. (In Russ.)
- Kuz'min I.A. K voprosu ob effektivnosti obsemenitelej na vyrubkakh el'nikov-chernichnikov. *Trudy Karel'skogo filiala AN SSSR*, 1961, vol. 25, pp. 59–66. (In Russ.)
- Martinez Pastur G.J., Vanha-Majamaa I., Franklin J.F. Ecological perspectives on variable retention forestry. *Ecological processes*, 2020, vol. 9, art. no. 12.
- Martynov A.S., Mel'nikov E.N., Kovyazin V.F., Anikin A.S., Minaev V.N., Belyaeva N.V. Osnovy lesnogo khozyajstva i taksatsiya lesa: ucheb. pos. St. Petersburg: Lan', 2008. 372 p. (In Russ.)
- Metody izucheniya lesnykh soobshchestv. St. Petersburg: NIIKhimii SPbGU, 2002. 240 p. (In Russ.)
- Mirkin B.M., Naumova L.G. Kratkij kurs obshchej ekologii. Chast' I: Ekologiya vidov i populyatsij: ucheb. Ufa: BSPU, 2011. 206 p. (In Russ.)
- Morozov G.F. Uchenie o lese. Vypusk 1. Vvedenie v biologiyu lesa. St. Petersburg, 1912. 183 p. (In Russ.)

Nitsenko A.A. Izmenenie estestvennoj rastitel'nosti Leningradskoj oblasti pod vliyaniem cheloveka. Leningrad: Izd-vo LSU, 1961. 51 p. (In Russ.)

Pickett S.T.A. Space-for-Time Substitution as an Alternative to Long-Term Studies. Long-Term Studies in Ecology / ed. by G. E. Likens. New York City, 1989, pp. 110–135.

Tikhodeeva M.U., Lebedeva V.Kh. Vosstanovlenie lesnoj rastitel'nosti na meste sukhodol'nykh lugov. Izv. Samarskogo nauchnogo tsentra RAN, 2012, vol. 14, iss. 1(5), pp. 1383–1386. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 11.11.2024

Трошин Д.С., Мирин Д.М. Влияние сохранения *Populus tremula* на вырубках ельников кисличных на динамику древесных компонентов в течение 15 лет // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 37–54. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.37-54

Исследование посвящено оценке влияния сохранения *Populus tremula* на динамику древесной растительности 15-летних вырубок в ельниках кисличных Вологодской области при изучении автогенной сукцессии и естественного лесовосстановления. Методика включала закладку 60 пробных площадей на вырубках и в прилегающих лесах с различными вариантами сохранения осины: одиночными деревьями, куртинами и без сохранения. Проведен комплексный анализ структуры древостоя, жизненного состояния древесных компонентов и характеристик подроста. Результаты демонстрируют положительное влияние сохранения осины на ускорение процессов лесовозобновления и создание благоприятных условий для развития теневыносливых видов, преимущественно *Picea abies*. Максимальная эффективность в поддержании древесного разнообразия и оптимизации микроклиматических условий отмечена при куртинном сохранении осины. Зафиксировано снижение жизненного состояния осины и ели с увеличением постэксплуатационного периода, при этом деревья в куртинах характеризовались более высокими показателями жизненности по сравнению с одиночными экземплярами. Анализ подроста выявил доминирование мягколиственных пород на ранних стадиях сукцессии с последующим повышением доли теневыносливых видов. Исследование подтверждает значимость ретенционного лесоводства для сохранения биологического разнообразия и восстановления лесных экосистем после сплошных рубок.

Ключевые слова: лесовосстановительная сукцессия, видовое разнообразие, постэксплуатационная динамика, естественное возобновление, бореальные леса.

Troshin D.S., Mirin D.M. Impact of *Populus tremula* conservation on the dynamics of tree components of 15-year clearcuts. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 37–54 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.37-54

The present study is devoted to the assessment of the impact of *Populus tremula* conservation on the dynamics of woody vegetation in 15-year-old clearcuts in wood sorrel-spruce forests of the Vologda region. The objective is to examine autogenous succession and natural regeneration. The methodology involved the establishment of 60 sample plots on clear-cuts and in adjacent forests with varying aspen preservation strategies, including single trees, clumps, and no preservation. A comprehensive analysis of stand structure, the vital state of tree components and undergrowth characteristics was conducted. The findings illustrate the beneficial impact of aspen conservation on the acceleration of reforestation processes and the establishment of favourable conditions for the growth of shade-tolerant species, particularly *Picea abies*. The greatest efficacy in maintaining tree diversity and optimizing microclimatic conditions was observed in the conservation of aspen in clumps. A decline in the vitality of aspen and spruce was observed with increasing post-exploitation periods, while trees in clusters exhibited higher vitality indices compared to single specimens. The undergrowth analysis revealed the dominance of soft-leaved species in the early stages of succession, with a subsequent increase in the proportion of shade-tolerant species. The findings confirm the importance of retention silviculture for biodiversity conservation and restoration of forest ecosystems after clear-cutting.

К e y w o r d s: forest regeneration succession, species diversity, post-exploitation dynamics, natural regeneration, boreal forests.

ТРОШИН Дмитрий Сергеевич – аспирант, старший преподаватель Череповецкого государственного университета. SPIN-код: 3483-6675. ORCID: 0000-0002-0719-0981.

162600, пр. Луначарского, д. 5. г. Череповец, Вологодская обл., Россия.
E-mail: troshin1515@mail.ru

TROSHIN Dmitriy S. – PhD student, Senior Lecturer, Cherepovets State University. SPIN-code: 3483-6675. ORCID: 0000-0002-0719-0981.

162600. Lunacharskogo av. 5. Cherepovets. Vologda region. Russia. E-mail: troshin1515@mail.ru

МИРИН Денис Моисеевич – заведующий кафедрой геоботаники и экологии растений Санкт-Петербургского государственного университета, кандидат биологических наук, доцент. ORCID: 0000-0001-5876-7456.

199034, Университетская наб., д. 7/9, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: mirin_denis@mail.ru

MIRIN Denis M. – PhD (Biological), Head of the Department of Geobotany and Plant Ecology, St. Petersburg State University, Associate Professor. ORCID: 0000-0001-5876-7456.

199034. Universitetskaya emb. 7/9. St. Petersburg. Russia. E-mail: mi-rin_denis@mail.ru

А.С. Сергеева

**ФОРМИРОВАНИЕ ЕЛОВОГО ПОДРОСТА
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРЦЕЛЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ
В СПЕЛЫХ СОСНОВО-ЕЛОВЫХ ДРЕВОСТОЯХ
ГАТЧИНСКОГО РАЙОНА ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ**

Введение. Систематизация и инвентаризация растительных сообществ – это фундаментальная основа для изучения и прогнозирования процессов в биосфере. Растительные сообщества являются чувствительными индикаторами всех изменений, что позволяет строить прогнозы и модели [Гусев и др., 2002]. Фитоценозы – базовые объекты при оценке генетического потенциала биоразнообразия, а также при принятии решений в сфере устойчивого развития [Работнов, 1978; Косумов, Демельханов, 2016]. Понимание закономерностей, протекающих в лесных сообществах, способствует решению многих лесохозяйственных и экологических задач.

Значимой элементарной единицей в данном процессе являются фитоценозы, в которых в свою очередь, из-за неоднородной пространственной структуры, удобно выделять такие элементы пространственного расчленения, как парцеллы [Дылис, Цельникер, 1964; Дылис, 1969; Миркин, Розенберг, 1978]. Изучение особенностей формирования фитоценозов позволяет оценить растительные сообщества с точки зрения их места и роли в растительном покрове региона, прогнозировать их дальнейшее развитие, что поможет в решении проблемы деградации лесных экосистем.

На Северо-Западе России изучение еловых молодняков под пологом сосновых древостоев проводилось в 70–80-е годы прошлого столетия в Архангельской области [Гусев, Третьяков, 1988; Астрологова, 1990]. Изучались количественные и качественные параметры, а также фенологические особенности елового подроста без детального изучения парцеллярной структуры фитоценоза. С учетом структуры напочвенного покрова исследования елового подроста проводились уже в еловых древостоях [Шаньгина и др., 2010].

На территории Ленинградской области проводились исследования, отображающие взаимосвязь парцеллярной структуры и елового возобновления в условиях интенсивного хозяйства под пологом еловых древостоев

[Новиков, 1999; Беляева, 2013]. На примере ельников зеленомошной группы была изучена структурная организация фитоценозов, представлены основные типы парцелл для данного типа леса [Грязькин, 1999].

Целью данного исследования было выявление особенностей формирования елового подроста в зависимости от парцеллярной структуры в спелых сосново-еловых древостоях. В задачи входило проанализировать параметры возобновительного процесса ели европейской, протекающего под пологом сосновых древостоев в условиях юга Ленинградской области, с учетом их парцеллярной структуры.

Исследование проводилось в 2021–2024 гг. Объектами исследования стали спелые сосново-еловые древостои, с участием в их составе сосны от 6 до 8 единиц, а также ели европейской (*Pinus sylvestris*) от 1 до 3 единиц, расположенные в Гатчинском районе Ленинградской области и относящиеся к Балтийско-Белозерскому таежному лесорастительному району¹ и к Лужско-Оредежскому ландшафту, в районе Оредежского плато [Благовидов, 1946]. Пробные площади закладывались в лесах, не затронутых хозяйственной деятельностью человека длительное время.

Впервые для региона исследования для спелых сосново-еловых древостоев черничного типа леса была изучена взаимосвязь между парцеллярной структурой и процессами естественного лесовозобновления, протекающими в них. Полученные результаты могут быть использованы для более точной оценки успешности естественного возобновления при проведении лесохозяйственных мероприятий, для восстановления и сохранения лесов юга Ленинградской области.

Материалы и методика исследования. Для определения основных характеристик древостоя, подроста и подлеска, а также выделения парцелл были заложены 10 пробных площадей. Пробные площади закладывались в наиболее однородных и схожих между собой участках. Размер каждой пробной площади составил 0,25 га.

В исследовании применяется общепринятый метод таксации древостоя – сплошной перечет [Сеннов, 2005]. Замер диаметров деревьев осуществлялся на высоте 1,3 м от шейки корня в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Для каждой ступени толщины с помощью высотомера измеряли высоту деревьев (не менее 5 экземпляров). Запасы вычисляли по

¹ Приказ Минприроды России № 367 от 18.08.2014 (ред. от 02.08.2023) «Об утверждении Перечня лесорастительных зон Российской Федерации и Перечня лесных районов Российской Федерации».

таблицам высот и объемов стволов для древостоев Ленинградской области [Третьяков и др., 1952].

Учет подроста был проведен двумя методами: сплошным перечетом на учетных площадках 10×10 м и выборочно-статистическим – на пробных площадях 50×50 м. При выборочно-статистическом методе для учета за-кладывались круговые площадки площадью 10 м^2 . Круговые площадки за-кладывались на одинаковом расстоянии друг от друга по диагональным направляющим при помощи шеста длиной 178,5 см.

Для елового подроста отмечались следующие параметры: высота, диаметр, категория состояния (жизнеспособный, нежизнеспособный, сухой). Для подроста всех лесообразующих пород определялась численность на гектар.

Геоботаническое обследование пробных площадей осуществлялось по квадратам 10×10 м. В каждом из них проводили детальное описание растительности. Заложение квадратов внутри пробных площадей проводилось по схеме, отображенной на рис. 1. Данная схема удобна тем, что позволяет учитывать средние параметры всей пробной площади, а также упрощает картирование в полевых условиях.

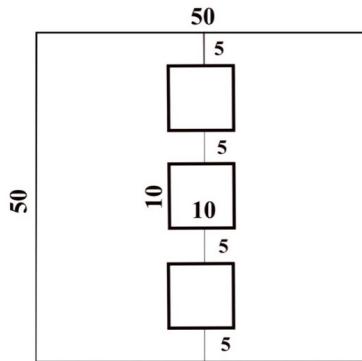


Рис. 1. Схема заложения квадратов для учета парцелярной структуры (размерность указана в метрах)

Fig. 1. Scheme of laying out squares to take into account the parcel structure (dimensions are given in meters)

По результатам описания живого напочвенного покрова и по комплексу других показателей однородные участки объединялись в парцеллы по Н.В. Дылису [1969].

На основании полученных данных была построена карта внутрипарцелярной структуры центральной части фитоценоза каждой пробной площади с нанесенными на нее подростом, подлеском и элементами ветровально-почвенного комплекса (ВПК). Карта парцелярной структуры была создана с помощью компьютерной программы AdobePhotoshop. Объединение картированных участков на примере пробной площади №1 представлено на рис. 2.

Опираясь на карты парцелярной структуры, проводился анализ данных и взаимосвязей с применением программного обеспечения Microsoft (Word и Excel) и пакета прикладных программ для статистического анализа.

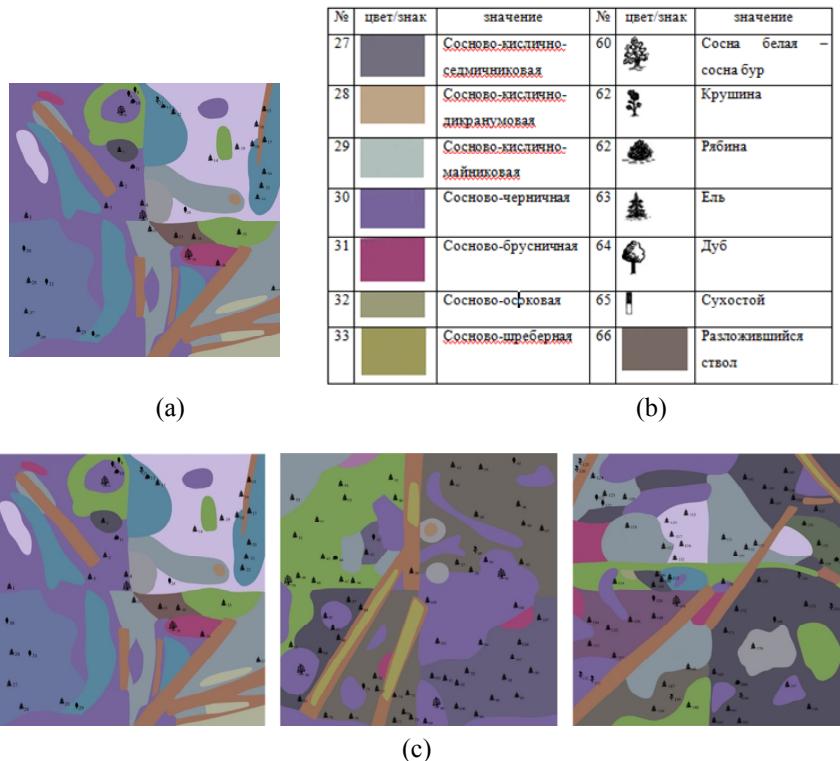


Рис. 2. Парцелярная карта пробной площади №1: а – картированный участок; б – часть легенды; с – картированная пробная площадь №1

Fig. 2. Plot map of trial area №1: a – mapped area; b – part of the legend; c – mapped sample plot №1

Результаты исследования. Характеристики подроста на исследуемых объектах представлены в табл. 1.

Таблица 1

Общая характеристика подроста на исследуемых объектах

General characteristics of undergrowth in the studied objects

Пробная площадь	Состав подроста	Характеристика подроста по преобладающей породе				
		средние			численность в пересчете на крупный, экз./га	встречаемость, %
		возраст A_{cp} , лет	высота H_{cp} , см	прирост по высоте Z_{cp} , см/год		
ПП 1	9.7Е 0.3Б	8,3	1,16	0,141	3727 127	90
ПП 2	10Е	19,6	3,91	0,199	127	30
ПП 3	10Е	18	2,26	0,126	800	90
ПП 4	8.4Е 0.7Б 0.9Ос	24,4	3,53	0,145	783 67 87	80
ПП 5	7.5Е 2.5Б	21,7	3,09	0,142	750 293	80
ПП 6	7.4Е 2.2Б 0.4Д	15,9	2,39	0,15	1190 307 83	90
ПП 7	9.5Е 0.5Д	12,1	1,5	0,119	1440 70	80
ПП 8	6.3Е 2.5Ос 1.2Д	18,7	2,81	0,15	353 110 60	80
ПП 9	7.9Е 1.4Ос 0.7Д	25,9	4,2	0,162	917 120 50	70
ПП 10	9.1Е 0.6Б 0.3Д	6,5	0,88	0,136	2513 240 87	90

Примечание: здесь и далее по тексту для пробной площади употребляется сокращение ПП.

Как видно из табл. 1, на всех пробных площадях отмечается преобладание елового подроста.

Общий расчетный охват проективного покрытия находится в диапазоне от 87,1% до 106,9%, что связано с наличием многоярусности живого напочвенного покрова на исследуемых участках (табл. 2). Наибольшее суммарное проективное покрытие живого напочвенного покрова зафиксировано на участке ПП 4 (106,9%).

Таблица 2

Структура живого напочвенного покрова на объектах исследования

Structure of living ground cover at the research sites

№ пробной площади	Травяно-кустарничковый ярус			Мхи, %	Итого, %
	Кустарнички, %	Травы, %	Итого, %		
ПП 1	35,1	21,7	56,8	42,3	99,1
ПП 2	30,7	19,4	50,1	45,8	95,9
ПП 3	43,5	16,8	60,3	44	104,3
ПП 4	32,9	25,2	58,1	48,8	106,9
ПП 5	32,9	36,1	69,0	33,4	102,4
ПП 6	24,0	19,4	43,4	47,7	91,1
ПП 7	21,7	18,8	40,5	46,6	87,1
ПП 8	20,7	37,4	58,1	32,8	90,9
ПП 9	19,5	30,9	50,4	43,9	94,3
ПП 10	19,1	32	51,1	46	97,1

Из таблицы видно, что на большинстве исследуемых участков в структуре живого напочвенного покрова преобладает доля мохового яруса (участки № 1,2,3,4,6,7,9,10). Лишь на участках №5 и №8 преобладают травянистые растения.

С учетом высокой доли сфагновых мхов на участках и для выявления взаимосвязи между глубиной сфагнума и количеством подроста были проведены замеры глубины верхнего видимого слоя сфагновых парцелл. Замер осуществлялся линейкой до момента упора в почву, количество измерений для каждой пробной площади составило 100 раз. Полученные данные приведены в табл. 3.

При средней глубине сфагнового яруса, равной 11,6 см, наблюдаются наибольшие показатели суммарной численности подроста на участках (выше 1000 экз./га). У данных показателей отмечается статистически значимая сильная положительная корреляция ($p<0,05$, $r>0,7$).

Таблица 3

**Взаимосвязь средней глубины сфагнума и количества подроста
на пробных площадях**

**Relationship between average sphagnum depth and amount of undergrowth
in test plots**

№ Пробной площади	Средняя глубина, см	Количество подроста, экз./га	Количество елового подроста, экз./га
ПП 1	11,81	3854	3727
ПП 2	6,83	127	127
ПП 3	7,19	800	800
ПП 4	9,63	937	783
ПП 5	10,74	1043	750
ПП 6	11,23	1580	1190
ПП 7	13,03	1510	1440
ПП 8	9,44	523	353
ПП 9	9,06	1087	917
ПП 10	14,01	2840	2513

В изученных сосновых борах было выделено 53 парцеллы. Всего 3 типа встречаются на всех 10 пробных площадях, еще 12 типов парцелл встречаются на 6 – 9 ПП. Именно они, скорее всего, будут оказывать основное влияние на формирование подроста и иметь наибольшую взаимосвязь с основными характеристиками древостоя. 24 вида парцелл были зафиксированы лишь на какой-то одной пробной площади.

На основании карттирования парцеллярной структуры, путем наложения сетки с шагом 0,5 м (рис. 3), был произведен расчет соотношения площади парцеллы с произрастающим на ней подростом. Результаты представлены в табл. 4.

Последовательно удаляя парцеллы, площадь которых менее 30 м^2 , и объединяя оставшиеся в группы по доминанте, мы получаем 6 основных коренных парцеллярных групп: сосново-кисличную, сосново-майниковую, сосново-мертвопокровную, сосново-сфагновую, сосново-черничную и сосново-зеленомошную.

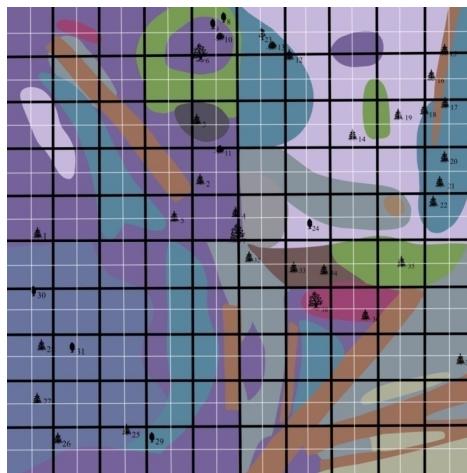


Рис. 3. Наложение сетки для подсчета площади parcels на пробной площади №1, квадрата №1-1

Fig. 3. Overlaying the grid for calculating the area of parcels on trial plot № 1, square №1-1

Стоит отметить, что именно в этих коренных парцелях сосредоточен подрост древесных пород, в первую очередь – еловый. Наибольшая доля площади, на которой был отмечен подрост, приходится на сосново-черничную парцеллу, что объясняется расположением выбранных для исследования лесных участков в черничном типе леса. Значительные территории с присутствием елового подроста распределяются между сосново-сфагновой (15,03%), сосново-зеленомошной (11,58%) и сосново-мертвопокровной (10,05%) коренными парцелями (табл. 4). Различное соотношение площадей в исследуемых растительных сообществах и доминирование черничной парцеллы являются индикаторами соответствующего типа леса.

Такое распределение территорий можно объяснить двумя основными факторами: во-первых, присутствие в составе материнского древостоя единиц ели способствует более сильному затенению нижних ярусов и дальнейшему формированию мертвопокровных парцелл; во-вторых, в микропонижениях рельефа создается избыточное и периодически застойное увлажнение данных территорий, что является благоприятным условием для формирования сфагновых и зеленомошных парцелл.

Таблица 4

Распределение площади коренных parcels с наличием елового подроста**Distribution of the area of native parcels with spruce undergrowth**

№ п/п	Наименование коренных parcels	Площадь, га	Доля от всей площади, %
1	Сосново-кисличная	0,008	2,49
2	Сосново-майниковая	0,010	3,32
3	Сосново-мертвопокровная	0,030	10,05
4	Сосново-сфагновая	0,045	15,03
5	Сосново-черничная	0,050	16,68
6	Сосново-зеленомошная	0,035	11,58
Итого		0,178	59,15
Площадь учетных квадратов		0,3	100

Отдельно рассмотрим распределение елового подроста по категориям состояния. Он распределяется по основным parcels неоднородно. Распределение елового подроста по категориям состояния в коренных parcels представлено в табл. 5. Анализируя эти данные, можно утверждать, что под пологом сосново-еловых древостоев еловый подрост более чем на 80% относится к категории жизнеспособного. Наибольшая доля жизнеспособного подроста встречается в сосново-черничной (100%) коренной parcelле; также близкие высокие значения отмечаются в сосново-сфагновой (98,4%) и сосново-мертвопокровной (98,0%) коренных parcelsах.

Таблица 5

Взаимосвязь parcelлярной структуры и состояния елового подроста**The relationship between the parcel structure and the state of spruce undergrowth**

№ п/п	Наименование коренных parcels	Распределение елового подроста по состоянию			
		Жизнеспособный		Сухой	
		экз./га	%	экз./га	%
1	Сосново-кисличная	66	83,5	13	16,5
2	Сосново-майниковая	36	92,3	3	7,7
3	Сосново-мертвопокровная	339	98,0	7	2,0
4	Сосново-сфагновая	434	98,4	7	1,6
5	Сосново-черничная	215	100	0	0
6	Сосново-зеленомошная	270	89,1	33	10,9
Итого		1360	95,6	63	4,4
					1360

Наименьшее количество жизнеспособного подроста отмечается в сосново-кисличной парцелле (83,5%). Вероятно, это связано с конкуренцией за почвенные ресурсы и тем, что кислица слабо может способствовать защите подроста от неблагоприятных факторов.

Заключение. Изучение парцеллярной структуры спелых сосново-еловых древостоев в условиях Балтийско-Белозерского таежного лесорастительного района выявило, что наибольшая численность елового подроста наблюдается в сосново-сфагновой парцелле с преобладанием доли мелкого и среднего подроста. Данная закономерность объясняется свойствами сфагновых мхов – гигроскопичностью и бактерицидностью, которые формируют благоприятные условия на ранних этапах развития ели европейской и препятствуют гибели семян от грибных и бактериальных заболеваний.

Отмечается статистически значимая сильная положительная корреляция между показателем глубины сфагнового слоя и численностью елового подроста.

Наиболее жизнеспособный еловый подрост формируется в сосново-черничной парцелле (100%), наименее – в сосново-кисличной (83,5%), что связано с конкуренцией за почвенные ресурсы и слабой способностью кислицы к защите подроста от неблагоприятных факторов, таких как резкие колебания температуры и высыхание грунта в засушливые периоды.

Для прогнозирования успешности возобновления лесообразующих пород на вырубках сосново-еловых насаждений черничного типа леса рекомендуется обращать внимание на парцеллярную структуру данного насаждения. Так, при преобладании в структуре сосново-черничной и сосново-сфагновой парцелл можно ориентироваться на естественное возобновление, в обратном случае – на создание лесных культур.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Астрологова Л.Е. Возобновление ели под пологом сосняка черничника свежего // ИВУЗ. Лесной журнал, 1990. №5. С. 13–16.

Беляева Н.В. Закономерности изменения структуры и состояния молодого поколения ели в условиях интенсивного хозяйственного воздействия: дис. д-ра с.-х. наук. СПб.: СПбГЛТУ, 2013. 431 с.

Благовидов Н.Л. Почвы Ленинградской области. Л.: Лениздат, 1946. 144 с.

Грязькин А.В. Структурная организация фитоценозов южной тайги (на примере ельников зеленомошной группы типов леса) // СПбГЛТА, 1999. 136 с.

- Грязькин А.В. Возобновительный потенциал таежных лесов (на примере ельников Северо-Запада России): монография. СПб.: СПбГЛТА, 2001. 188 с.
- Гусев И.И., Третьяков С.В. Сезонный рост еловых молодняков под пологом сосновых древостоев // ИВУЗ. Лесной журнал. 1988. №3. С. 5–9.
- Гусев М.В., Мелохова О.П., Романова Э.П. Сохранение и восстановление биоразнообразия. М., 2002. 286 с.
- Декатов Н.Е. Возобновление ели в Дружносельском и Орлинском районах Сиверского опытного лесхоза в связи с прежним хозяйством // Труды и исследования по лесному хозяйству и лесной промышленности. 1931. Вып. 12. С. 1–49.
- Дылис Н.В., Цельникер Ю.Л. Фитоценоз как компонент лесного биогеоценоза // Основы лесной биогеоценологии. М., 1964. С. 91–215.
- Дылис Н.В. Структура лесного биогеоценоза. М.: Наука, 1969. 55 с.
- Косумов Р.С., Демельханов М.Д. Лесные экосистемы как стабилизирующие факторы антропогенного воздействия на окружающую среду // Молодой ученый. 2016. № 3 (107). С. 415–420.
- Миркин Б.М., Розенберг Г.С. Фитоценология: принципы и методы. М.: Наука, 1978. 212 с.
- Новиков А.В. Возобновление ели в различных парцелях ельника черничного // Современные проблемы и эффективность регулирования фитоценозов в лесном хозяйстве: сб. научн. тр. СПбНИИЛХ. СПб., 1999. С. 163–165.
- Работнов Т.А. Фитоценология. М.: Изд-во МГУ, 1978. 384 с.
- Сеннов С.Н. Лесоведение и лесоводство. М.: Академия, 2005. 256 с.
- Третьяков Н.В., Горский П.В., Самойлович Г.Г. Справочник таксатора. М.-Л.: Гослесбумиздат, 1952. 853 с.
- Шаньгина Н.П., Феклистов П.А., Кузнецова А.А. Возобновление ели под пологом ельников в зависимости от напочвенного покрова // Экологические проблемы севера: межвуз. сб. науч. тр. 2010. Вып. 13. С. 27–30.

References

- Astrologova L.E. Regeneration of spruce under the canopy of fresh blueberry pine forest. IVUZ. Forestry journal, 1990, no. 5, pp. 13–16. (In Russ.)
- Belyaeva N.V. Patterns of change in the structure and condition of the young generation of spruce under intensive economic impact: diss... Doctor of Agricultural Sciences. St. Petersburg: SPbGLTU, 2013. 431 p. (In Russ.)
- Blagovidov N.L. Soils of the Leningrad region. Leningrad: Lenizdat, 1946. 144 p. (In Russ.)
- Dekatov N.E. Renewal of spruce in Druzhnoselsky and Orlinsky districts of the Siversky experimental forestry enterprise in connection with the previous farm. Works and research on forestry and forest industry, 1931, iss. 12, pp. 1–49. (In Russ.)
- Dylis N.V., Tselniker Yu.L. Phytocenosis as a component of forest biogeocenosis. Fundamentals of forest biogeocenology. Moscow, 1964, pp. 91–215. (In Russ.)

- Dylis N.V. Structure of forest biogeocenosis. Moscow: Nauka, 1969. 55 p. (In Russ.)
- Gryazkin A.V. Structural organization of phytocenoses of the southern taiga (on the example of spruce forests of the green moss group of forest types). St. Petersburg: SPbGLTA, 1999. 136 p. (In Russ.)
- Gryazkin A.V. Renewable potential of taiga forests (on the example of spruce forests of the North-West of Russia): monograph. St. Petersburg: SPbGLTA, 2001. 188 p. (In Russ.)
- Gusev I.I., Tretyakov S.V. Seasonal growth of spruce young forests under the canopy of pine stands. *IVUZ. Forestry journal*, 1988, no. 3, pp. 5–9. (In Russ.)
- Gusev M.V., Melokhova O.P., Romanova E.P. Conservation and restoration of biodiversity. Moscow, 2002. 286 p. (In Russ.)
- Kosumov R.S., Demelkhanov M.D. Forest ecosystems as stabilizing factors of anthropogenic impact on the environment. *Young scientist*, 2016, no. 3 (107), pp. 415–420. (In Russ.)
- Mirkin B.M., Rosenberg G.S. Phytocenology: principles and methods. Moscow: Nauka, 1978. 212 p. (In Russ.)
- Novikov A.V. Regeneration of spruce in various parcels of blueberry spruce forest. *Modern problems and efficiency of phytocenosis regulation in forestry*: collection of scientific papers of St. Petersburg Research Institute of Forestry. St. Petersburg, 1999, pp. 163–165. (In Russ.)
- Rabotnov T.A. Phytocenology. Moscow: MSU Publishing House, 1978. 384 p. (In Russ.)
- Sennov S.N. Forest science and forestry. Moscow: Akademiya, 2005. 256 p. (In Russ.)
- Shangina N.P., Feklistov P.A., Kuznetsova A.A. Regeneration of spruce under the canopy of spruce forests depending on the ground cover. *Ecological problems of the north*: interuniversity collection of scientific papers, 2010, iss. 13, pp. 27–30. (In Russ.)
- Tretyakov N.V., Gorsky P.V., Samoylovich G.G. Forest Taxator's Handbook. Moscow-Leningrad: Goslesbumizdat, 1952. 853 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 12.09.2024

Сергеева А.С. Формирование елового подроста в зависимости от парцеллярной структуры в спелых сосново-еловых древостоях Гатчинского района Ленинградской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 55–68. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.55-68

Исследование проведено в 2021–2024 гг. на Северо-Западе России (Ленинградская область Гатчинский район). Объектами исследования стали спелые сосново-еловые древостоя, с участием в их составе сосны от 6 до

8 единиц, а также ели европейской (*Picea abies*) от 1 до 3 единиц, относящиеся к Балтийско-Белозерскому таежному лесорастительному району и к Лужско-Оредежскому ландшафту в районе Оредежского плато. Пробные площади заложены в лесах, не затронутых хозяйственной деятельностью человека длительное время. На 10 пробных площадях проведен сплошной перечет основного древостоя, учет подроста выборочно-статистическим методом. Выполнено геоботаническое описание живого напочвенного покрова. Составлены картографические материалы парцеллярной структуры квадратами 10×10 м, выделенными на исследуемых объектах, с нанесенными деревьями основного древесного яруса, подроста и подлеска. Впервые для региона исследования для спелых сосново-еловых древостояев черничного типа леса была изучена взаимосвязь между парцеллярной структурой и процессами естественного лесовозобновления, протекающими в них. В статье отражено распределение елового подроста по основным коренным парцеллам, выявленным в сосново-еловых лесах. Выявлен ряд закономерностей, отражающих особенности формирования елового возобновления с основными парцеллами в сосново-еловых лесах черничного типа. Даны рекомендации для прогнозирования успешности лесовозобновления на вырубках сосново-еловых насаждений. Полученные результаты могут быть использованы для более точной оценки успешности естественного возобновления при проведении лесохозяйственных мероприятий, для восстановления и сохранения лесов юга Ленинградской области.

Ключевые слова: ель европейская, *Picea abies*, сосново-еловые древостоя, парцеллярная структура, подрост, естественное возобновление.

Sergeeva A.S. Formation of spruce undergrowth depending on the parcel structure in mature pine-spruce stands of the Gatchina district of the Leningrad region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 55–68 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.55-68

The study was conducted in 2021–2024 in the North-West of Russia (Leningrad region, Gatchina district). The objects of the study were mature pine-spruce stands, with 6 to 8 units of pine and 1 to 3 units of Norwegian spruce (*Picea abies*) belonging to the Baltic-Belozersky taiga forest growth region of the Luga-Oredzh landscape in the Oredzh plateau area. Sample plots were laid in forests that have not been affected by human economic activity for a long time. A continuous census of the main tree stand and undergrowth were carried out on 10 sample plots using a selective statistical method. A geobotanical description of the living ground cover was made. Cartographic materials of the parcel structure were compiled in 10×10 m squares allocated at the studied sites with the trees of the main tree layer, undergrowth and undergrowth indicated. For the first time in the study region, the relationship between the parcel structure and the processes of natural reforestation occurring in mature pine-spruce stands of the bilberry type of forest was studied. The article reflects the

distribution of spruce undergrowth by the main native parcels identified in pine-spruce forests. A number of patterns were revealed that reflect the features of the formation of spruce regeneration with the main parcels in pine-spruce forests of the bilberry type. Recommendations are given for predicting the success of reforestation in the clearings of pine-spruce stands. The obtained results can be used for a more accurate assessment of the success of natural regeneration during forestry activities, for the restoration and preservation of forests in the south of the Leningrad Region.

К e y w o r d s : Norway spruce, *Picea abies*, pine-spruce stands, parcel structure, undergrowth, natural regeneration.

СЕРГЕЕВА Анастасия Сергеевна – аспирант кафедры лесоводства, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова. SPIN-код: 7341-0916.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: sergeeva838025@gmail.com

SERGEEEVA Anastasia S. – PhD student of the Department of Forestry, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 7341-0916.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: sergeeva838025@gmail.com

Тун Чэн, А.В. Грязькин, Э.Р. Калайджян

ВЛИЯНИЕ ГУСТОТЫ ДРЕВОСТОЯ И СОМКНУТОСТИ КРОН НА ВИДОВОЙ СОСТАВ СЫРЬЕВЫХ РАСТЕНИЙ В СОСНЯКАХ

Введение. Сосняки – один из основных источников древесины для лесной и целлюлозно-бумажной промышленности страны [Рысин, Савельева, 2008; Коновалов и др., 2017; Ильинцев и др., 2021; Кузнецова и др., 2021]. Кроме древесины в сосняках сконцентрировано множество разнообразных видов сырьевых и не сырьевых ресурсов [Обозов, 1974; Морозов, 2015].

В течение длительного времени заготовку и использование недревесной продукции называли побочным пользованием, в отличие от главного пользования, т. е. заготовки древесины [Обозов, 1974; Растительные..., 2018]. Побочное пользование лесом в прошлом – это народные промыслы, обеспечивавшие население лесных регионов России практически всем необходимым в течение многих столетий [Обозов, 1974]. Если раньше недревесную продукцию заготавливали преимущественно для личного потребления, то сегодня преобладает промышленная заготовка основных видов ресурсов леса [Багинский и др., 2007; Печаткин, 2013; Грязькин, 2022; Ciocă, Enescu, 2018; Gryazkin et al., 2019].

Кроме полезных растений лес содержит живицу разных видов хвойных пород [Обозов, 1974; Морозов, 2015]. Живица – ценнейший натуральный продукт, уникальное сырьё для фармакологии, лакокрасочной и электротехнической промышленности.

Издавна человек заготавливает сахаристый сок древесных пород [Хетагуров, Грязькин, 2013; Хетагуров и др., 2013; Грязькин и др., 2022]. Объёмы заготовки древесного сока превышают 100 тыс. т в год [Багинский и др., 2007; Печаткин, 2013; Морозов, 2015].

Заготовка грибов – особый вид промысла и особая категория пищевого и лекарственного сырья [Обозов, 1974; Грязькин, 2022]. Леса являются источником нематериальных ресурсов, которые до сегодняшнего дня в полном объёме ещё не оценены [Багинский и др., 2007; Печаткин, 2013; Морозов, 2015].

Кора древесных пород – источник дубильных веществ и красителей [Обозов, 1974; Багинский и др., 2007; Чан Чунг Тхань и др., 2025]. Кора

берёзы – береста – является сырьём для химической промышленности и фармакологии, используется в качестве строительного и изоляционного материала, применяется для изготовления художественных изделий и предметов хозяйственно-бытового назначения. Береста обладает уникальными свойствами [Багинский и др., 2007; Чан Чунг Тхань и др., 2025].

Лесной фонд – территория самых обширных угодий для пчеловодства. Лесные пасеки поставляют на мировой рынок до 8 видов уникальной продукции пищевого и лекарственного назначения. Медоносы произрастают в любом регионе России [Обозов, 1974; Чан Чунг Тхань и др., 2025].

Заготовка лекарственных растений в больших объемах ведется во многих странах мира [Нгуен и др., 2013; Абсалямова и др., 2020; Доан Тхи Нга, Нешатаев, 2022; Dai Jianyue et al., 2011; Shao Kaixian et al., 2011; Enescu, 2017; Liu Bo, 2017; Song Manzhen et al., 2017; Preliminary..., 2019]. Наиболее развито это направление использования дикоросов в Китае, во Вьетнаме, в России [Нгуен и др., 2013; Рыжкова, 2017; Абсалямова и др., 2020; Lu Weifeng, Zhong Jinrong, 2012].

Исследование структуры и запасов недревесной продукции осуществляется в разных регионах и в разных географических условиях – в таёжной зоне и в тропиках, на севере и на юге [Обозов, 1974; Peter et al., 2003; Chen Yunshi, 2011]. Видовой состав сырьевых растений выявляется не только под пологом древостоев [Грязькин и др., 2020], но и на гарях [Гаврилова и др., 2023], на вырубках [Белоногова, 1974] и на болотах [Чэн Тун и др., 2021].

Попытки оценки материальных лесных ресурсов леса предпринимались многоократно [Багинский и др., 2007; Грязькин, 2022; Li Zhongkui et al., 2016]. Общий вывод такого рода исследований – суммарный эффект от использования недревесной продукции леса во много раз превышает эффект от заготовки древесины – главной продукции лесных экосистем.

Основные потребители разнообразного лесного сырья – пищевая промышленность и фармакология, целлюлозная промышленность и лесохимия, сельское хозяйство и оленеводство [Багинский и др., 2007; Абсалямова и др., 2020; Грязькин, 2022]. Лес является источником технических и кормовых растений.

Заготовка и использование недревесной продукции практикуются во многих странах мира [Багинский и др., 2007; Грязькин, 2022; Peter et al., 2003; Chen Yunshi, 2011; Li Zhongkui et al., 2016; Qi Yue et al., 2018; World Forestry Congress, 1926–2022]. С 1926 года этому направлению лесопользования мировой наукой уделяется пристальное внимание. Вопросы рацио-

нального использования лесов и многообразия ресурсов регулярно обсуждаются на мировых лесных форумах [World Forestry Congress, 1926–2022].

Впервые вопросы рационального использования лесов обсуждались на 3-м Всемирном конгрессе по лесному хозяйству в Хельсинки, 10–20 июля 1949 года. Более конкретно использование лесных продуктов обсуждалось на 4-м Всемирном конгрессе в Индии. На пятом конгрессе в США (1960 г.) мировой общественности было представлено всё разнообразие лесных продуктов в разных регионах земного шара. В итоге была принята концепция многоцелевого использования лесов. В Испании (1966 г.) состоялся 6-й Всемирный конгресс по лесному хозяйству, на котором обсуждались вопросы планирования использования лесных ресурсов. В Индонезии (1978 г.) на восьмом конгрессе акценты был сделаны на проблемах нехватки продовольствия в мире. Для решения этой проблемы концепция многоцелевого лесного хозяйства была расширена. Одиннадцатый лесной конгресс проходил в Турции в 1997 г. Главное внимание участников было приковано к вопросам снижения темпов вырубки лесов и деградации лесных ресурсов. В декларации содержался призыв к гармонизации потребностей планеты и её жителей с потенциалом лесов. Канада в 2003 г. принимала участников 12-го лесного конгресса, на котором обсуждались вопросы разработки и распространения методологий оценки и управления всем спектром лесной продукции. На 13-м конгрессе (Аргентина, 2009 г.) обсуждались социальные, экологические и экономические аспекты устойчивого лесопользования на местном, региональном и глобальном уровнях. В Южной Африке в 2015 г. состоялся 14-й Всемирный конгресс по лесному хозяйству, на котором была принята Дурбанская декларация – «Перспективы развития лесов и лесного хозяйства до 2050 года». Кроме этого были опубликованы основные результаты оценки мировых лесных ресурсов «Глобальная оценка лесных ресурсов 2015». В Республике Корея в 2022 г. был проведён 15-й лесной конгресс. Основной лейтмотив всемирного форума – построение зеленого, здорового и устойчивого будущего с помощью лесов. В качестве итогового документа принятая Сеульская лесная декларация. Как видно из приведённого выше обзора, практически на каждом Всемирном лесном конгрессе в той или иной мере обсуждались вопросы рационального использования и воспроизводства лесной продукции, включая дикоросы.

Растения, имеющие сырьевое значение, встречаются на лесных участках различных категорий с фитоценозами различного состава. Разнообразие видов зависит от условий места произрастания, типа леса и характеристик фитоценозов. Запасы сырьевых растений целиком и полностью

определяются биологическими особенностями эдификаторов и доминантов в растительном сообществе. В данном случае эту роль выполняет сосна обыкновенная, определяющая структуру фитоценоза на конкретном лесном участке.

Материалы и методика исследования. Объект исследования – сосняки в лесном фонде Ленинградской области. Средний возраст древостоев – 70–140 лет. Относительная полнота – 0,6–0,8. Опытные участки подобраны в разных типах леса. Таксационные характеристики древостоев установлены с использованием общепринятых в лесоводстве и лесной таксации методов.

Полевые работы по учету живого напочвенного покрова, подроста, подлеска проводились по запатентованной методике [Грязькин, 1997]. Использован метод круговых учётных площадок радиусом 178,5 см. Примыкающие друг к другу площадки образуют сплошную учётную ленту. Все учётные площадки закладывались по свободным маршрутным ходам, без предварительной разметки ходов и центров учётных площадок.

На каждой учетной площадке учитывались следующие показатели подроста и подлеска: численность, жизненное состояние, характер размещения по площади, категория крупности. Для живого напочвенного покрова устанавливали встречаемость, проективное покрытие каждого вида и суммарное проективное покрытие видов, составляющих травяно-кустарниковый и мохово-лишайниковый ярусы.

На каждом объекте исследования измеряли величину освещенности с использованием люксметра ТКА-Люкс, причем измеряли как приходящий свет, так и отраженный от поверхности почвы. Одновременно с освещенностью измеряли сомкнутость крон древостоя с использованием кронометра С.В. Белова «КБ 2». Для измерения температуры воздуха и почвы использовали электронный термометр ТЕ-113.

В ходе полевых работ также учитывались характеристики живого напочвенного покрова, проективное покрытие и встречаемость каждого вида. Для выявления различий в видовом составе живого напочвенного покрова по объектам исследования использовали коэффициент Жаккара [Jaccard, 1912]. Значения этого коэффициента (Кж) устанавливали с использованием следующей формулы:

$$Кж = \frac{Д}{(А + Б - Д)} \times 100, \quad (1)$$

где А – число видов на одном из сравниваемых участков, Б – число видов на другом участке, Д – общее количество совпадающих видов на сравниваемых участках.

Результаты исследования. Сосняки в лесном фонде Ленинградской области являются преобладающими формациями как по занимаемой площади, так и по запасу стволовой древесины¹. Таксационная характеристика древостоев на объектах исследования, представлена в табл. 1.

Таблица 1

Таксационная характеристика древостоев на опытных участках

Taxation characteristics of tree stands in experimental areas

Номер объекта	Состав древостоя, %	Тип леса	Относит. полнота	Запас, м ³ /га	Густота древ., шт./га	Средний возраст, лет	Ср. диаметр/ высота, см/м
1	91С8Б1Е	Сбр	0,6	220	438	140	23/22
2	89С8Е3Б	Сбр	0,6	230	472	130	23/21
3	97С3Б	Слиш	0,6	170	440	120	21/18
4	98С2Б	Слиш	0,6	180	408	130	22/18
5	84С9Б4Е3Олс	Сдол	0,8	170	998	80	19/18
6	90С6Б2Дуб2Ива	Стб	0,7	250	577	90	24/21
7	61С20Е11Б5Ос3Олс	Счер	0,7	210	520	70	26/25
8	60С23Е12Б5Ос	Счер	0,8	340	588	100	28/26
9	67С12Б11Е7Олс3Олс	Счер	0,7	240	741	95	24/20
10	89С8Е3Б	Ссф	0,7	130	606	90	18/16
11	60С12Е12Б9Ос7Олс	Счер	0,8	320	629	100	24/23
12	78С13Е5Олс4Б	Сдол	0,7	160	803	90	20/18

Примечание: Сбр – сосняк брусличный, Слиш – сосняк лишайниковый, Сдол – сосняк долгомошный, Стб – сосняк травяно-болотный, Счер – сосняк черничный, Ссф – сосняк сфагновый

По типам леса состав древостоев различается. Если на сухих бедных и переувлажненных почвах сосняки (Слиш, Сдол, Ссф) представлены чистыми по составу древостоями с небольшой примесью березы и ели, то на богатых почвах с оптимальным увлажнением (Счер) состав древостоев весьма разнообразен. В целом доля сосны в составе древостоев варьирует от 60 до 98%.

¹ Постановление Губернатора Ленинградской области №75-пг от 25.12.2018 «Об утверждении Лесного плана Ленинградской области»

Подрост под пологом сосновых древостоев состоит преимущественно из ели и лиственных пород. Сосна, как одна из самых светолюбивых древесных пород, в составе молодого поколения представлена минимально. Исключение составляют сосновки на бедных сухих или переувлажненных почвах. В таких условиях сосна в подросте доминирует. Минимальная численность подроста зафиксирована под пологом сосновки лишайникового – менее 300 экз./га. Под пологом сосновки черничного общее количество подроста составляет более 4 тыс./га.

В подлеске чаще всего встречаются рябина обыкновенная, крушина ломкая, жимолость обыкновенная, шиповник игольчатый, калина обыкновенная. На сухих и бедных почвах в составе подлеска преобладает можжевельник, а на заболоченных почвах – несколько видов ивы. Все указанные виды кустарников являются сырьевыми растениями. Численность подлеска изменяется в пределах от 400 до 3400 экз./га.

В составе живого напочвенного покрова, в зависимости от типа леса, выявлено от 7 до 39 видов сосудистых растений. В составе мохово-лишайникового яруса встречается 4–6 видов лишайников, 5 видов зелёных мхов, 3 вида сфагнумов и кукушкин лён. Общее количество видов в живом напочвенном покрове – более 50.

Почвы под пологом сухих сосновок характеризуются небольшой мощностью гумусированного горизонта в виде пятен или прерывистого горизонта. Имеется прослойка подзола (горизонт вымывания органического вещества). В целом почвы бедные, актуальное плодородие низкое. Почва под пологом сосновок брусличных модергумусная или грубогумусная среднеподзолистая или поверхностно-подзолистая иллювиально-гумусово-железистая супесчаная.

Из данных, представленных в табл. 1, следует, что независимо от типа леса густота древостоев в сосновках варьирует в небольшом диапазоне. Это связано с биологическими особенностями сосны, которая является одной из самых светолюбивых пород. Об этом свидетельствуют и данные по режиму освещенности под пологом сосновок (табл. 2). Измерения освещенности, температуры и сомкнутости крон на объектах исследования проводили примерно в одно время с 12 до 13 часов в июне.

Размах варьирования температуры воздуха под пологом сосновок в зависимости от типа леса имеет небольшие пределы. Изменчивость температуры почвы по типам леса (особенно на поверхностях почвы) значительно больше, чем у температуры воздуха (табл. 3).

Таблица 2

Освещенность под пологом древостоев на опытных участках**Illumination under the canopy of tree stands in experimental areas**

Номер объекта	Состав древостоя, %	Освещенность, тыс. люкс	Сомкнутость крон, %	Кол-во деревьев сосны, шт./га
1	91С8Б1Е	12,9±3	64	402
2	89С8Е3Б	11,8±2	69	422
3	97С3Б	14,0±5	59	430
4	98С2Б	14,2±5	62	400
5	84С9Б4Е3Олс	10,1±3	88	740
6	90С6Б2Дуб2Ива	13,1±3	70	418
7	61С20Е11Б5Ос3Олс	9,2±2	73	220
8	60С23Е12Б5Ос	7,9±2	82	196
9	67С12Б11Е7Олс3Олс	12,7±3	70	436
10	89С8Е3Б	11,0±2	72	512
11	60С12Е12Б9Ос7Олс	8,2±4	86	388
12	78С13Е5Олс4Б	9,0±2	80	643

Таблица 3

Температура воздуха и почвы под пологом сосновок на опытных участках**Air and soil temperature under the canopy of pine forests in experimental areas**

Номер объекта	Тип леса	Сомкнутость крон, %	Густота древ., экз./га	Темпер. воздуха, °C	Температура почвы, °C		
					на поверхности	на глуб. 5 см	на глуб. 10 см
1	Сбр	64	438	22,8	26,9	20,1	16,8
2	Сбр	69	472	22,1	26,1	19,7	16,4
3	Слиш	59	440	24,7	29,7	20,2	17,7
4	Слиш	62	408	25,3	29,1	20,1	17,4
5	Сдол	88	998	20,8	20,4	15,4	12,1
6	Стб	70	577	22	18,1	16	11,8
7	Счер	73	520	19,7	18,8	16,7	12,7
8	Счер	82	588	19,2	17,4	14,9	11,8
9	Счер	70	741	22	18,2	15,3	11,9
10	Ссф	72	606	23,1	17,7	14,9	11,5
11	Счер	86	629	19,7	19,7	14,7	10,9
12	Сдол	80	803	20,1	20,1	15,1	11,1

Температура воздуха и почвы, как и режим освещенности под пологом древостоев, зависит от таксационных характеристик сосняков, в первую очередь от сомкнутости крон и густоты древостоя. В определенной степени различия по освещенности, температуре воздуха и почвы на объектах исследования связаны и с составом растительности нижних ярусов в зависимости от типа леса.

Установлено, что освещенность и температурный режим под пологом древостоев в определенной степени зависят от таких характеристик фитоценоза как сомкнутость крон, густота и состав древостоя. Установлено, что освещенность в большей степени зависит от сомкнутости крон. Зависимость тесная, линейная: $y = -3,5858x + 112,99$ ($R^2 = 0,7514$).

От сомкнутости крон и других характеристик древостоев зависит и температура воздуха под пологом сосняков: $y = -0,177x + 34,701$ ($R^2 = 0,6976$).

Значения коэффициентов детерминации, отражающих зависимость освещенности и температуры от сомкнутости крон и густоты древостоя, представлены в табл. 4.

Таблица 4

Значения коэффициента детерминации, отражающие зависимость освещенности и температуры от сомкнутости крон и густоты древостоя		
Values of the determination coefficient that reflect the dependence of illumination and temperature on the density of the crown and the density of the forest stand		
Зависимая переменная	Сомкнутость крон	Густота древостоя
Освещенность	0,751	0,211
Температура воздуха	0,698	0,255
Температура на поверхности почвы	0,465	0,332
Температура почвы на глубине 5 см	0,643	0,513
Температура почвы на глубине 10 см	0,624	0,479

Как показано выше, для описания зависимости освещенности и температуры под пологом от густоты древостоя и сомкнутости полога могут быть использованы линейные функции. Величина коэффициента детерминации показывает, что более высокая точность аппроксимации зависимости освещенности и температуры выявлена от сомкнутости крон.

Наибольшее количество видов в живом напочвенном покрове выявлено в сосняке черничном и в сосняке травяно-болотном – соответственно, 37 и 41. Под пологом сосняков лишайникового типа леса встречается всего 4 вида в травяно-кустарничковом ярусе и по несколько видов мхов и лишайников.

Значение коэффициента Жаккара менее 50% свидетельствует о существенных различиях в видовом составе растительности на сравниваемых

объектах. Наоборот, в случаях, когда его значение больше 50%, большая часть видов в составе живого напочвенного покрова являются общими на сравниваемых участках. Максимальные различия в видовом составе растений наблюдаются при значениях коэффициента до 10%, т. е. количество одинаковых видов на сравниваемых опытных участках в таких случаях составляет не более 10%.

В табл. 5 указаны виды растений в составе живого напочвенного покрова под пологом сосновок по типу леса: сосняк брусличный – объект исследования № 2, сосняк лишайниковый – № 3, сосняк долгомошный – № 5, сосняк травяно-болотный – № 6, сосняк черничный – № 7, сосняк сфагновый – № 10.

Таблица 5

Видовой состав и проективное покрытие растений по типам леса, %

Species composition and plant coverage by forest type, %

Название вида	Слиш	Сбр	Счер	Сдол	Стб	Ссф
Багульник – <i>Ledum palustre</i> L.	–	–	–	1,2	0,5	6,8
Бодяк – <i>Cirsium heterophyllum</i> L.	–	–	1,0	1,5	0,7	–
Бруслица – <i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.	22,1	35,8	4,0	1,3	1,6	1,5
Вахта трехлистная – <i>Menyanthes trifoliata</i> L.	–	–	–	2,7	5,1	4,4
Вейник – <i>Calamagrostis epigejos</i> Roth	–	–	2,7	7,1	10,2	3,3
Вейник – <i>Calamagrostis arundinacea</i> Roth	–	–	0,7	2,2	–	–
Вербейник – <i>Lysimachia vulgaris</i> L.	–	–	0,1	3,0	5,1	3,3
Вереск – <i>Calluna vulgaris</i> (L.) Hull	21,7	19,3	0,7	–	0,8	1,2
Герань лесная – <i>Geranium sylvaticum</i> L.	–	–	0,8	–	0,3	–
Голубика – <i>Vaccinium uliginosum</i> L.	–	–	–	2,6	–	5,6
Дудник лесной – <i>Angelica sylvestris</i> L.	–	–	1,1	1,2	3,4	–
Звездчатка – <i>Stellaria holostea</i> L.	–	–	3,8	0,1	5,0	–
Зеленые мхи – <i>Bryidae</i> sp. Engl.	2,3	8,3	33,0	15,0	7,3	6,2
Земляника лесная – <i>Fragaria vesca</i> L.	1,2	2,9	1,8	–	0,7	–
Золотарник – <i>Solidago virgaurea</i> L.	–	0,2	2,0	0,1	1,3	–
Иван-чай – <i>Chamaenerion angustifolium</i> L.	–	0,1	1,6	1,1	1,9	0,1
Камыш лесной – <i>Scirpus sylvaticus</i> L.	–	–	0,1	4,6	1,3	1,8
Кислица – <i>Oxalis acetosella</i> Kuntze	–	–	2,2	1,1	0,4	–
Клюква – <i>Oxycoccus palustris</i> Pers.	–	–	–	2,3	–	6,2
Костяника – <i>Rubus saxatilis</i> L.	–	–	5,1	–	1,6	–
Крапива двудомная – <i>Urtica dioica</i> L.	–	–	1,6	–	3,2	–

Окончание табл. 5

Название вида	Слиш	Сбр	Счер	Сдол	Стб	Ссф
Кукушкин лен – <i>Polytrichum commune</i> Hedw.	–	–	2,7	19,2	2,8	23,4
Купырь – <i>Anthriscus sylvestris</i> (L.) Hoffm.	–	–	1,4	–	4,8	–
Ландыш – <i>Convallaria majalis</i> L.	–	–	1,0	0,1	0,2	–
Линнea северная – <i>Linnaea borealis</i> L.	–	–	1,8	3,0	0,8	0,7
Лишайники – <i>Lichenes</i> sp. L.	53,0	15,9	1,3	0,3	–	–
Луговик – <i>Avenella flexuosa</i> (L.) Drejer	–	–	2,5	–	0,8	–
Майник – <i>Maianthemum bifolium</i> L.	–	–	1,2	1,7	1,2	–
Малина обыкновенная – <i>Rubus idaeus</i> L.	–	–	1,8	–	2,2	–
Марьянник – <i>Melampyrum sylvaticum</i> L.	–	–	1,6	0,2	3,2	–
Марьянник – <i>Melampyrum nemorosum</i> L.	–	–	0,7	–	0,1	–
Морошка – <i>Rubus chamaemorus</i> L.	–	–	–	7,2	–	10,1
Мятлик луговой – <i>Poa pratensis</i> L.	–	0,1	–	–	–	–
Ожика – <i>Luzula pilosa</i> (L.) Willd.	–	–	1,2	1,4	1,7	–
Осока лесная – <i>Carex sylvatica</i> Huds.	–	–	0,1	1,2	3,1	0,2
Плаун – <i>Lycopodium clavatum</i> L.	1,8	7,4	0,3	–	–	–
Плаун годичный – <i>Lycopodium annotinum</i> L.	–	–	1,7	2,8	7,7	5,5
Подбел – <i>Andromeda polifolia</i> L.	–	–	–	0,1	0,6	3,1
Подмаренник цепкий – <i>Galium aparine</i> L.	–	–	1,4	–	3,7	–
Пушица – <i>Eriophorum angustifolium</i> Honck.	–	–	–	4,0	2,7	8,5
Сабельник болотный – <i>Comarum palustre</i> L.	–	–	–	3,4	6,4	5,9
Седмичник – <i>Trientalis europaea</i> L.	–	–	1,7	2,1	3,2	–
Ситник развесистый – <i>Juncus effusus</i> L.	–	–	0,5	2,2	1,8	1,9
Сныть – <i>Aegopodium podagraria</i> L.	–	–	0,3	–	4,8	–
Сфагnumы – <i>Sphagnum</i> sp. L.	–	–	1,0	6,8	2,7	34,2
Таволга – <i>Filipendula ulmaria</i> (L.) Maxim.	–	–	–	5,6	7,7	1,7
Черника – <i>Vaccinium myrtillus</i> L.	–	0,2	27,7	3,2	3,7	0,9
Щучка – <i>Deschampsia cespitosa</i> P. Beauv.	–	0,1	2,1	–	1,6	–
Травяно-кустарничковый ярус	46,8	66,2	80,3	69,2	95,1	70,7
Мохово-лишайниковый ярус	55,3	24,2	38,0	42,3	13,8	63,8
Количество видов	6	11	37	34	41	22

С таксационными характеристиками верхнего яруса фитоценозов – с древостоем – связаны количественные показатели растений в составе живого напочвенного покрова – встречаемость и проективное покрытие. Раз-

максимальное варьирование величины встречаемости видов широкий – от 3 до 100%, а проективное покрытие отдельно взятого вида, произрастающего под пологом древостоев, редко превышает 10%. Проективное покрытие мхов и лишайников может достигать 70%.

Проективное покрытие травяно-кустарникового яруса в зависимости от типа леса составляет от 46,8% (сосняк лишайниковый) до 92,1% (сосняк травяно-болотный). Проективное покрытие мохово-лишайникового яруса составляет от 13,8% (сосняк травяно-болотный) до 63,8% (сосняк сфагновый), характеризуется низким видовым разнообразием. Преобладают сфагновые мхи и кукушкин лен.

Все перечисленные в табл. 5 виды относятся к различным категориям ресурсных растений: кормовые растения (9 видов), пищевые растения (12 видов), медоносы (23 вида), лекарственные (31 вид) и технические растения (12 видов). Преобладают медоносы и лекарственные растения. Структура ресурсных растений на лесном участке зависит от типа леса. Если в сосняке сфагновом встречаются только пищевые и лекарственные растения, то в сосняке черничном и в сосняке травяно-болотном произрастают самые разнообразные по сырьевому назначению виды.

В табл. 6 представлены данные по встречаемости растений, имеющих ресурсное значение разных категорий, по типам леса на всех объектах исследования.

Таблица 6

Распределение сырьевых растений по хозяйственному назначению и типам леса

Distribution of raw materials by economic purpose and forest types

Тип леса	Сырьевое значение растений				
	пищевые	лекарственные	медоносы	технические	кормовые
Сбр	+	+	+	+	–
Сбр	+	+	+	+	–
Слиш	+	+	+	–	–
Слиш	+	+	+	–	–
Сдол	+	+	+	–	–
Стб	+	+	+	+	+
Счер	+	+	+	+	+
Счер	+	+	+	+	+
Счер	+	+	+	+	+
Ссф	+	+	–	–	–
Счер	+	+	+	+	+
Сдол	+	+	+	–	–

Видовой состав растений в составе травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов различается значительным образом. Если сравнивать видовой состав растений на объектах исследования по величине коэффициента Жаккара (величина коэффициента Кж установлена для опытных объектов, указанных в табл. 4), то получим следующие значения коэффициента общности видов (табл. 7).

Таблица 7

Значения коэффициента сходства видов в сравниваемых объектах исследования, %

Values of the species similarity coefficient in the compared research objects, %

Тип леса	Коэффициент сходства по сравниваемым объектам				
	Слиш	Сдол	Стб	Счер	Ссф
Сбр	0,55	0,15	0,18	0,26	0,14
Слиш	–	0,08	0,09	0,16	0,08
Сдол	–	–	0,63	0,54	0,65
Стб	–	–	–	0,81	0,43
Счер	–	–	–	–	0,28

Сходный состав травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов характерен для сосняка черничного и сосняка травяно-болотного. Доля общих видов в данных фитоценозах составляет 81%. Напротив, в сосняке лишайниковом и в сосняке сфагновом количество общих видов – всего 8%.

Растительность нижних ярусов под пологом сосняков в наибольшей степени зависит от типа леса, сомкнутости крон, густоты древостоя. Зависимость от других таксационных характеристик проявляется меньше. От типа леса зависит и распределение растений по сырьевым группам. Если медоносы встречаются под пологом сосняков во всех типах леса, то кормовые растения произрастают преимущественно на богатых почвах – в сосняках черничных и травяно-болотных.

Заключение. Видовой состав и обилие растительности нижних ярусов в наибольшей степени зависят от типа леса, сомкнутости крон, густоты древостоя. Зависимость от других таксационных характеристик проявляется меньше.

В сосняке черничном и сосняке травяно-болотном выявлено максимальное количество видов в составе живого напочвенного покрова, 37 и 41

вид соответственно. Из них к сырьевым видам относятся 33 вида в сосновке черничном и 36 видов – в сосновке травяно-болотном. Под пологом сосновки сфагнового встречается 14 видов растений, имеющих ресурсное значение. Преобладают лекарственные и технические растения. Минимальное количество видов, имеющих сырьевое значение, отмечается в сосновках лишайниковых – всего 6 видов.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Абсалямова С.Л., Абсалямов Р.Р., Поздеев Д.А. Таксация запасов лекарственных растений в лесничествах Удмуртской Республики // Лесной вестник. 2020. Т. 24, № 3. С. 5–10. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-3-5-10.

Багинский В.В., Гришашевич Ф.Ф., Бурак З.Г. Комплексная продуктивность земель лесного фонда / под общ. ред. В.Ф. Багинского. Гомель: Институт леса НАН Беларуси, 2007. 295 с.

Белоногова Т.В. Продуктивность живого напочвенного покрова черничных и брусничных сосновок Южной Карелии // Лесные растительные ресурсы Карелии. Петрозаводск, 1974. С. 61–69.

Гаврилова О.И., Грязькин А.В., Чэн Тун, Семенова Е.И. Состав и запасы ресурсных видов растений на постпирогенных землях // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. Вып. 243. С. 28–45. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.243.28-45.

Грязькин А.В. Способ учета подроста: пат. 2084129 Российской Федерации, МКИ С 6 А 01 G 23/00 /. № 94022328/13; Опубл. 20.07.97. Бюл. № 20.

Грязькин А.В. Экономическая эффективность комплексной заготовки недревесной продукции леса. СПб.: Лань, 2022. 200 с.

Грязькин А.В., Чан Чунг Тхань, Сырников И.А., Прокофьев А.Н. Урожайность промысловых видов растений под пологом древостоев // Лесотехнический журнал. 2020. № 2. С. 8–12.

Грязькин А.В., Ву Ван Хунг, Чан Чунг Тхань. Сокопродуктивность березняков. СПб.: Лань, 2022. 163 с.

Доан Тхи Нга, Нешатаев В.Ю. Оценка запасов лекарственных растений в лесах Ленинградской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 240. С. 99–111. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.240.99-111.

Ильинцев А.С., Шамонтьев И.Г., Третьяков С.В. Современная динамика лесопользования в бореальных лесах России (на примере Архангельской области) // Лесотехнический журнал. 2021. Т. 11, № 3 (43). С. 45–62. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.3/4.

Коновалов В.Н., Садкова А.Н., Зарубина Л.В. Биология и рост сосны обыкновенной в северотаежных фитоценозах: монография. Архангельск: САФУ, 2017. 175 с.

Кузнецова Н.Ф., Клужевская Е.С., Аминева Е.Ю. Высокопродуктивные сосновые леса в условиях изменяющегося климата // Лесной журнал. 2021. № 6. С. 9–14.

Нгуен Тхи Тху Ха, Грязькин А.В., Беляева Н.В. Медоносы Ленинградской области // Научное обозрение. 2013. № 6. С. 18–21.

Морозов О.В. Современное состояние побочного пользования лесом // Лесное хозяйство. 2015. № 3. С. 75–78.

Обозов Н.А. Организация побочных пользований и специализированных хозяйств. М.: Лесн. пром-сть, 1974. 256 с.

Печаткин В.В. Эволюция лесопользования и лесовосстановления в России: мифы и реальность // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2013. № 2 (26). С. 48–52.

Растительные ресурсы России. СПб.-М: КМК, 2018. 409 с.

Чан Чунг Тхань, Грязькин А.В., Хетагуров Х.М., Хоанг Минь Ань. Ресурсный потенциал березняков. СПб.: Лань, 2025. 148 с.

Рыжкова С.М. К вопросу о формировании кластеров дикоросов на региональном уровне // Вестник Белгородского университета кооперации, экономики и права. 2017. № 4(65). С. 216–231.

Рысин Л.П., Савельева Л.И. Сосновые леса России. М.: КМК, 2008. 289 с.

Хетагуров Х.М., Грязькин А.В. Высокогорные кленовники Северной Осетии. СПб.: Наука, 2013. 146 с.

Хетагуров Х.М., Базаев А.Б., Грязькин А.В., Тигиев С.Е. Сокопродуктивность *Acer traftvetteri* Medw. в условиях Северной Осетии // Аграрный научный журнал. 2013. № 5. С. 45–48.

Чэн Тун, Го Лубинь, Грязькин А.В., Чан Чунг Тхань, Хоанг Минь Ань. Запасы ресурсных видов растений в сосняке сфагновом // Актуальные вопросы лесного хозяйства : матер. V Междунар. молодеж. науч.-пр. конф. СПб., 2021. С. 14–18.

Chen Yunshi. Pay attention to the protection of forest resources and strengthen forest resource management // Modern Gardening. 2011. Vol. 11X. Art.no. 97.

Cioaca L., Enescu C.M. Trends in the evolution of harvesting of non-wood forest products in Romania // Research Journal of Agricultural Science. 2018. Vol. 50(4). P. 82–86.

Dai Jianyue, Liang Yao, Dong Anqiang. Survey of Medicinal Plant Resources in Shimen National Forest Park, Guangdong // Anhui Agricultural Science. 2011. Vol. 39(30). P. 18484–18487.

Enescu C.M. Which are the most important non-wood forest products in the case of Ialomi – a County // AgroLife Sci. J. 2017. Vol. 6, iss. 1. P. 98–103.

Gryazkin A., Bespalova V., Samsonova I. Potential reserves and development of non-wood forest resources // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. P. 453–468. DOI: 10.1088/1755-1315/316/1/012007.

Jaccard P. The distribution of the flora in the alpine zone // New Phytol. 1912. Vol. 11. P. 37–50.

Li Zhongkui, Chen Shaozhi, Zhang Decheng. Comments and suggestions on the accounting of the value of forest resources in my country // Forestry Resource Management. 2016. Vol. 1. P. 9–13.

Liu Bo. A brief analysis of the countermeasures to strengthen the cultivation and protection of forest resources in our country // Agricult. and Technol. 2017. Vol. 4. Art. no. 188.

Lu Weifeng, Zhong Jinrong. Medicinal Fern Resources in Nanshan Forest Park, Guangdong // Chinese Medical Science. 2012. Vol. 2, iss. 5. Art. no. 168.

Peter C.B., Gordon M., James R.U. Non-timber forest products from the Canadian boreal forest: An exploration of aboriginal opportunities // Journal of Forest Economics. 2003. Vol. 9, iss. 2. P. 75–96. DOI: 10.1078/1104-6899-00027.

Preliminary report on General survey of Medicinal plant resources // Chinese Medicine Journal Res. Prac. 2019. Vol. 33. № 6. P. 2–5.

Shao Kaixian, Gao Deyu, Gao Yumei. Investigation and research on forest wild edible plant resources in Jixi City, Heilongjiang Province // SME Management and Technology. 2011 Vol. 18. Art. no. 302.

Song Manzhen, Zhang Li, Du Zuan. Medicinal plant resources and their applications in wild gardens in Lushan area // Ecological science. 2017. Vol. 36. P. 155–159.

Qi Yue, Ma Ning, Chen Jiancheng. Research on the mechanism of paid use of forest resources in state-owned forest farms // Forestry Economy. 2018. Vol. 2. P. 72–81.

References

Absalyamova S.L., Absalyamov R.R., Pozdeev D.A. Taksatsiya zapasov lekarstvennykh rastenij v lesnichestvakh Udmurtskoj Respubliki. *Lesnoj vestnik*, 2020, vol. 24, iss. 3, pp. 5–10. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-3-5-10. (In Russ.)

Baginskij V.V., Grimashevich F.F., Burak Z.G. Kompleksnaya produktivnost' zemel' lesnogo fonda / pod obshch. red. V.F. Baginskogo. Gomel': Institut lesa NAN Belarusi, 2007. 295 p. (In Russ.)

Belonogova T.V. Produktivnost' zhivogo napochvennogo pokrova chernichnykh i brusnichnykh sosnyakov Yuzhnoj Karelii. *Lesny'e rastitel'ny'e resursy' Karelii*. Petrozavodsk, 1974, pp. 61–69. (In Russ.)

Chan Chung Tyan', A.V. Gryaz'kin, Kh.M. Khetagurov, Hoang Min' An'. Resursnyj potentsial bereznyakov. St. Petersburg: Lan', 2025. 148 p. (In Russ.)

Che'n Tun, Go Lubin', Gryaz'kin A.V., Chan Chung Than', Hoang Min' An'. Zapasy' resursnykh vidov rastenij v sosnyake sfagnovom. Mater. V intern. youth sci.-pr. conf. "Aktual'ny'e voprosy' lesogo khozyajstva". St. Petersburg, 2021, pp. 14–18. (In Russ.)

Chen Yunshi. Pay attention to the protection of forest resources and strengthen forest resource management. *Modern Gardening*, 2011, vol. 11X, art. no. 97.

Cioaca L., Enescu C.M. Trends in the evolution of harvesting of non-wood forest products in Romania. *Research J. of Agricultural Science*, 2018, vol. 50, iss. 4, pp. 82–86.

Dai Jianyue, Liang Yao, Dong Anqiang. Survey of Medicinal Plant Resources in Shimen National Forest Park, Guangdong. *Anhui Agricultural Science*, 2011, vol. 39(30), pp. 18484–18487.

Doan Txi Nga, Neshataev V.Yu. Otsenka zapasov lekarstvenny'kh rastenij v lesakh Leningradskoj oblasti. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2022, iss. 240, pp. 99–111. (In Russ.)

Enescu C.M. Which are the most important non-wood forest products in the case of Ialomi – a County. *AgroLife Sci. J.*, 2017, vol. 6, iss. 1, pp. 98–103.

Gavrilova O.I., Gryaz'kin A.V., Che'n Tun, Semenova E.I. Sostav i zapasy' resursny'kh vidov rastenij na postpirogenny'kh zemlyakh. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2023, iss. 243, pp. 28–45. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.243.28-45. (In Russ.)

Gryaz'kin A.V. Sposob ucheta podrosta: pat. 2084129 Rossijskaya Federaciya, MKI S 6 A 01 G 23/00 /. № 94022328/13; Publ. 20.07.97. Byul. № 20. (In Russ.)

Gryaz'kin A.V. E'konomicheskaya e`ffektivnost' kompleksnoj zagotovki nedrevesoj produktssi lesa. St. Petersburg: Lan', 2022. 200 p. (In Russ.)

Gryaz'kin A.V., Chan Chung Txan', Sy'rnikov I.A., Prokof'ev A.N. Urozhajnost' promy'slov'ykh vidov rastenij pod pologom drevostoev. *Lesotekhnicheskij zhurnal*, 2020, no. 2, pp. 8–12. (In Russ.)

Gryazkin A., Bespalova V., Samsonova I. Potential reserves and development of non-wood forest resources. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, pp. 453–468. DOI: 10.1088/1755-1315/316/1/012007.

Gryaz'kin A.V., Vu Van Xung, Chan Chung Txan'. Sokoproduktivnost' bereznyakov. St. Petersburg: Lan', 2022. 163 p. (In Russ.)

Il'ntsev A.S., Shamont'ev I.G., Tret'yakov S.V. Sovremennaya dinamika lesopol'zovaniya v boreal'ny'kh lesakh Rossii (na primere Arkhangel'skoj oblasti). *Lesotekhnicheskij zhurnal*, 2021, vol. 11, no. 3 (43), pp. 45–62. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.3/4. (In Russ.)

Jaccard P. The distribution of the flora in the alpine zone. *New Phytol.*, 1912, vol. 11, pp. 37–50.

Khetagurov Kh.M., Bazaev A.B., Gryaz'kin A.V., Tigiev S.E. Sokoproduktivnost' *Acer traubvetteri* Medw. v usloviyakh Severnoj Osetii. *Agrarnyj nauchnyj zhurnal*, 2013, no. 5, pp. 45–48. (In Russ.)

Khetagurov Kh.M., Gryaz'kin A.V. Vy'sokogornye klenovniki Severnoj Osetii. St. Petersburg: Nauka, 2013. 146 p. (In Russ.)

Konovalov V.N., Sadkova A.N., Zarubina L.V. Biologiya i rost sosny' ob'y'knovennoj v severotaezhny'kh fitocenozakh. Arkhangel'sk: SAFU, 2017. 175 p. (In Russ.)

Kuznetsova N.F., Klushevskaya E.S., Amineva E.Yu. Vy'sokoproduktivnye sosnovy'e lesa v usloviyakh izmenyayushchegosya klimata. *Lesnoj zhurnal*, 2021, no. 6, pp. 9–14. (In Russ.)

Li Zhongkui, Chen Shaozhi, Zhang Decheng. Comments and suggestions on the accounting of the value of forest resources in my country. *Forestry Resource Management*, 2016, vol. 1, pp. 9–13.

Liu Bo. A brief analysis of the countermeasures to strengthen the cultivation and protection of forest resources in our country. *Agricul. and Technol.*, 2017, vol. 4, art. no. 188.

Lu Weifeng, Zhong Jinrong. Medicinal Fern Resources in Nanshan Forest Park, Guangdong. *Chinese Medical Science*, 2012, vol. 2, iss. 5, art. no. 168.

Morozov O.V. Sovremennoe sostoyanie pobochnogo pol'zovaniya lesom. *Lesnoe khozyajstvo*, 2015, no. 3, pp. 75–78. (In Russ.)

Nguen Txi Txu Xa, Gryaz'kin A.V., Belyaeva N.V. Medonosy' Leningradskoj oblasti. *Nauchnoe obozrenie*, 2013, no. 6, pp. 18–21. (In Russ.)

Obozov N.A. Organizaciya pobochny'kh pol'zovanij i spetsializirovanny'kh khozyajstv. Moscow: Lesn. prom-st', 1974. 256 p. (In Russ.)

Pechatkin V.V. E`volyuciya lesopol'zovaniya i lesovosstanovleniya v Rossii: mi-fy' i real'nost'. *E`konomicheskie i social'ny'e peremeny': fakty', tendencii, prognoz*, 2013. no. 2 (26), pp. 48–52. (In Russ.)

Peter C.B., Gordon M., James R.U. Non-timber forest products from the Canadian boreal forest: An exploration of aboriginal opportunities. *Journal of Forest Economics*, 2003, vol. 9, iss. 2, pp. 75–96. DOI: 10.1078/1104-6899-00027.

Preliminary report on General survey of Medicinal plant resources. *Chinese Medicine Journal Res. Prac.*, 2019, vol. 33, iss. 6, pp. 2–5.

Qi Yue, Ma Ning, Chen Jiancheng. Research on the mechanism of paid use of forest resources in state-owned forest farms. *Forestry Economy*, 2018, vol. 2, pp. 72–81.

Rastitel'ny'e resursy' Rossii. St. Petersburg-Moscow: KMK, 2018. 409 p. (In Russ.)

Ry'sin L.P., Savel'eva L.I. Sosnovy' e lesa Rossii. Moscow: KMK, 2008. 289 p. (In Russ.)

Ry'zhkova S.M. K voprosu o formirovaniii klasterov dikorosov na regional'nom urovne. *Vestnik Belgorodskogo universiteta kooperatsii, e`konomiki i prava*, 2017, vol. 4(65), pp. 216–231. (In Russ.)

Shao Kaixian, Gao Deyu, Gao Yumei. Investigation and research on forest wild edible plant resources in Jixi City, Heilongjiang Province. *SME Management and Technology*, 2011, vol. 18, art.no. 302.

Song Manzhen, Zhang Li, Du Zuan. Medicinal plant resources and their applications in wild gardens in Lushan area. *Ecological science*, 2017, vol. 36, iss. 3, pp. 155–159.

World Forestry Congress. 1926–2022.

Материал поступил в редакцию 13.09.2024

Чэн Тун, Грязькин А.В., Калайджян Э.Р. Влияние густоты древостоя и сомкнутости крон на видовой состав сырьевых растений в сосняках // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 69–88. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.69-88

Представлены результаты многолетних исследований по оценке обилия сырьевых растений в сосновках Ленинградской области. Сосновки характеризуются смешанным составом древостоев. Средний возраст сосновок – 70–140 лет. Относительная полнота древостоев – 0,6–0,8. Густота древостоев – 548–782 экз./га. Под пологом древостоев встречается подрост сосны и берёзы. Общая численность подроста – 410–880 экз./га. Подлесок представлен можжевельником обыкновенным, рябиной обыкновенной и крушиной ломкой. Общая численность подлеска не превышает 570 экз./га. Величину встречаемости и проективное покрытие для каждого вида в составе живого напочвенного покрова определяли на учётных площадках размером 10 м². На каждом опытном участке закладывали от 30 до 48 учётных площадок в зависимости от размеров опытного участка. Установлено, что видовой состав и обилие зависят от характеристик фитоценоза и условий места произрастания. Общее количество видов в живом напочвенном покрове – более 50. В составе мохово-лишайникового яруса встречается 4–6 видов лишайников, 5 видов зелёных мхов, 3 вида сфагнумов и кукушкин лён. Показано, что для промышленной заготовки пригодно 19 видов сырьевых растений. Встречаемость таких растений составляет не менее 30%, проективное покрытие – 5% и выше. В сосновке черничном и сосновке травяно-болотном выявлено максимальное количество видов в составе живого напочвенного покрова, 37 и 41 вид соответственно. Из них к сырьевым видам относятся 33 вида в сосновке черничном и 36 – в сосновке травяно-болотном. Под пологом сосновок преобладают лекарственные и технические растения. Минимальное количество видов, имеющих сырьевое значение, отмечается в сосновках лишайниковых – всего 6 видов. По хозяйственному назначению сырьевые растения представлены всеми группами. Многие виды сырьевых растений являются полиресурсными видами.

Ключевые слова: Ленинградская область, сосновки, недревесные ресурсы леса, видовой состав.

Cheng Tun, Gryazkin A.V., Kalaidzhyan E.R. Influence of tree density and crown closure on the species composition of raw materials in pine forests. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 69–88 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.69-88

The results of long-term studies on the abundance of raw materials plants are presented. The species composition and abundance of plants of resource value were studied in the pine forests of the Leningrad Region. The pine forests are characterized by a mixed composition of the stands. The average age of the pine forests is 70–140 years. The relative completeness of the stands is 0,6–0,8. The density of the stands is 548–782 specimens/ha. Under the canopy of tree stands, there is an undergrowth of pine and birch. The total number of undergrowth is 410–880 individuals per hectare.

The undergrowth is represented by common juniper, common rowan, and common buckthorn. The total number of undergrowth does not exceed 570 individuals per hectare. The frequency of occurrence and the projective cover of each species in the living ground cover were determined on 10 m² plots. On each experimental plot, 30 to 48 counting plots were laid depending on the size of the experimental plot. It was found that the species composition and abundance depend on the characteristics of the phytocenosis and the growing conditions. The total number of species in the living ground cover is more than 50. The moss-lichen layer includes 4–6 species of lichens, 5 species of green mosses, 3 species of sphagnum, and cuckoo moss. It has been shown that 19 species of raw plant materials are suitable for industrial harvesting. The occurrence of such plants is at least 30%, the projective cover is from 5% and higher. In the blueberry pine forest and the grassy-marsh pine forest the maximum number of species in the living ground cover was identified, with 37 and 41 species, respectively. Of these, 33 species are raw materials in the blueberry pine forest and 36 species are raw materials in the grassy-marsh pine forest. Medicinal and technical plants predominate under the canopy of pine forests. The minimum number of species with raw material value is found in the lichen pine forest, which contains only 6 species. All groups of raw material plants in terms of their economic purpose are represented. The living ground cover includes 12 species of honey plants, 16 species of medicinal plants, 4 species of berry plants, 4 species of salad plants, 9 species of technical plants, and 6 species of forage plants. Many species of raw materials plants are poly-resource species.

Keywords: Leningrad Region, pine forests, non-wood forest resources, species composition

ЧЭН Тун – аспирант Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. ORCID: 0000-0001-6376-2481.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: tongc9199@gmail.com

CHEENG Tong – PhD student, St.Petersburg State Forestry University. ORCID: 0000-0001-6376-2481.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: tongc9199@gmail.com

ГРЯЗЬКИН Анатолий Васильевич – профессор кафедры лесоводства Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор биологических наук. SPIN-код: 7206-1050. ResearcherID: C-6699-2018. ORCID: 0000-0002-3497-9312. SCOPUS AuthorID: 55988504200.

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

GRYAZKIN Anatoly V. – DSc (Biological), Professor of the Department of Forestry of the St.Petersburg State Forestry University. SPIN-code: 7206-1050. ResearcherID: C-6699-2018. ORCID: 0000-0002-3497-9312. SCOPUS AuthorID: 55988504200.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: lesovod@bk.ru

КАЛАЙДЖЯН Эвелина Р. – инженер Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: rafikovna002@mail.ru.

KALAYDJYAN Evelina R. – Engineer, St.Petersburg State Forestry University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: rafikovna002@mail.ru

И.С. Стешин, И.В. Петухов

**МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ БЕЗ УЧИТЕЛЯ
НА ОСНОВЕ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ
И СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ
В ЗАДАЧЕ КЛАССИФИКАЦИИ ДЕРЕВЬЕВ**

Введение. Классификация деревьев с использованием машинного обучения стала мощным инструментом для ботаников, экологов и специалистов по охране окружающей среды, революционизируя способ идентификации и каталогизации древесных пород. Традиционные методы классификации, основанные на ручной идентификации морфологических параметров растительности, таких как листья, кора и узоры ветвления, часто являются времязатратными и трудоемкими. В противовес традиционным методам дешифрирования, алгоритмы машинного обучения могут анализировать огромные объемы данных, включая изображения, спектральную информацию и экологические переменные, для идентификации древесных пород с большей скоростью и точностью [Fassnacht et al., 2016; Wäldchen, Mäder, 2018]. Такие методы машинного обучения, как деревья решений, метод опорных векторов (SVM), полносвязные нейронные сети (FCN) и свёрточные нейронные сети (CNN), были успешно применены для автоматизации классификации пород деревьев даже в сложных экосистемах, таких как тропические леса и смешанные ландшафты. Применение подобных подходов не только способствует совершенствованию инструментов экологических исследований, но и поддерживает усилия по охране окружающей среды, где быстрая и точная идентификация видов имеет решающее значение для мониторинга биоразнообразия и борьбы с обезлесением и изменением климата [Weinstein et al., 2020; Zhong et al., 2024].

Индексы растительности, особенно те, которые получены на основе данных дистанционного зондирования, играют ключевую роль в классификации растений с использованием машинного обучения. Такие индексы, как нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI), усовершенствованный вегетационный индекс (EVI) и зеленый-красный вегетационный индекс (GRVI), применяются при оценке состояния здоровья и плотности растительности [Huete et al., 2002; Hamunyela et al., 2016]. Использование индексов растительности в сочетании с моделями машинного обучения по-

могает улучшить точность классификации, предоставляя критически важные данные о физиологических характеристиках растений, таких как содержание хлорофилла, структура листьев и уровни влаги. Это особенно полезно для различения древесных пород, которые могут выглядеть схожими в видимом свете, но имеют уникальные спектральные сигнатуры в других диапазонах, таких как ближний инфракрасный (NIR) или красный край (680–730 нм). Алгоритмы машинного обучения могут обрабатывать большие наборы изображений, данных об индексах растительности для классификации видов растений, оценки здоровья леса и мониторинга биоразнообразия в различных экосистемах [Nevalainen et al., 2017; Onishi, Ise, 2018; Weinstein et al., 2021; Chehreh et al., 2023; Zhong et al., 2024]

Большинство исследований, связанных с применением методов машинного обучения, направлено на построение моделей, основанных на уже размеченных данных, то есть имеющих область применимости, ограниченную набором древесных пород, содержащихся в тренировочном наборе. Данная работа посвящена разработке метода классификации древесных пород, не использующего заранее подготовленный обучающий набор. Данный метод исключает продолжительный по времени этап сбора и разметки обучающих данных при построении модели, имеет высокую область применимости вне зависимости от древесной породы и при этом сохраняет высокую точность классификации.

Материалы и методика исследования. Для проведения исследования был выбран Нолькинский лесной участок Учебно-опытного участкового лесничества Куярского лесничества, находящийся в пользовании ФГБОУ ВО ПГТУ. Съемка была проведена 20 августа 2024 года с использованием аэрофотосъемочного комплекса Geoscan Gemini Мультиспектр (Геоскан..., 2024), высота съемки 100 м. Были выбраны 2 участка с распределением деревьев «сосна (*Pinus sylvestris* L.) / береза (*Betula pendula* Roth)» (А) и «сосна (*Pinus sylvestris*) / ель (*Picea abies* (L.) H. Karst.)» (В), площадь каждого участка примерно 0,64 га. Данные были собраны с 5 спектральных датчиков – синего (470 нм), зеленого (560 нм), красного (665 нм), дальнего красного (720 нм) и инфракрасного (840 нм).

Данные синего, зеленого и красного спектральных каналов были объединены в RGB изображения, которые в дальнейшем использовались для детектирования крон деревьев с помощью модели DeepForest [Weinstein et al., 2019]. После завершения процесса детектирования проведен анализ и исключены случаи, когда корона дерева полностью не помещалась на изображение, а также когда выявлялась растительность, не относящаяся к деревьям (рис. 1).

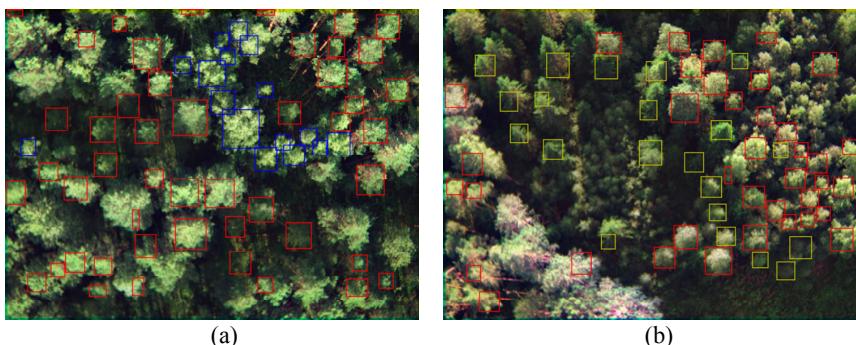


Рис. 1. Идентифицированные кроны деревьев с помощью модели DeepForest, после удаления выбросов: (а) Участок А: красный – сосна, синий – береза; (б) Участок В: красный – сосна, желтый – ель

Fig. 1. Identified tree crowns using the DeepForest model, after removing outliers: (a) Plot A: red – pine, blue – birch; (b) Plot B: red – pine, yellow – fir

На основе спектральных данных были рассчитаны 30 вегетационных индексов по каждому из участков. Далее с помощью границ распознанных крон деревьев была произведена экстракция пикселей с карт вегетационных индексов и спектральных снимков.

Пиксели по каждой выбранной кроне дерева были переведены из матричного в векторный вид, и отсортированы по возрастанию. Из каждого вектора были рассчитаны следующие параметры: минимальное, максимальное, среднее, медианное значения, стандартное отклонение, а также 25-й и 75-й квантили и энтропия Шеннона [Crutchfield, Feldman, 2001; Barandas et al., 2020].

К спектральным характеристикам (вегетационный индекс / спектр отражения) каждого участка был применен алгоритм понижения размерности – метод главных компонент (PCA) [Jolliffe, Cadima, 2016] – для определения наиболее значимых параметров. Величина дисперсии, необходимой для описания набора данных, была выбрана равной 95%.

Далее на основе наиболее значимых параметров из восьми представленных выше проводилась классификация методом машинного обучения без учителя k-means ($k = 2$) [Macqueen, 1967] по каждой спектральной характеристике. Этапы построения одной модели k-means по произвольной спектральной характеристике представлены на рис. 2.

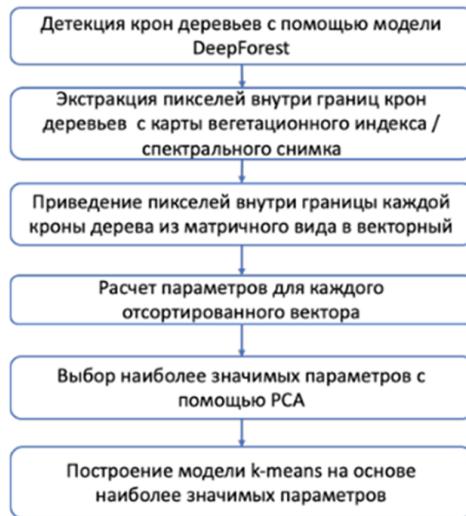


Рис. 2. Схема построения модели k-means по произвольной спектральной характеристике

Fig. 2. Scheme for constructing a k-means model based on an arbitrary spectral characteristic

В качестве метрики расстояния было использовано евклидово представление. Перед применением PCA или k-means алгоритмов данные были стандартизированы согласно уравнению (1)

$$p' = \frac{p - m}{s}, \quad (1)$$

где p' – стандартизированный параметр, p – изначальный параметр, m – среднее значение параметра, s – среднеквадратичное отклонение параметра.

Для оценки точности классификации моделей k-means были использованы следующие метрики – *Accurasy* и *F1* [Михайличенко, 2022]. Метрика *F1* была также рассчитана для каждого отдельного класса. Общий рейтинг точности классификации был отобран на основе гибридной метрики $F1_h$ согласно уравнению (2)

$$F1_h = F1_c * F1_s, \quad (2)$$

где $F1_c$ – среднее значение *F1* между всеми классами, $F1_s$ – значение *F1* для класса с наименьшим количеством образцов.

На каждом участке путем глазомерной таксации были определены породы деревьев для оценки классификационной точности моделей k-means. Распределение деревьев по породам на каждом участке представлено в табл. 1.

Таблица 1

Количество деревьев на каждом участке

Number of trees in each plot

Участок	Древесная порода	Количество отдельных древесных пород на участке	Содержание отдельных древесных пород на участке, %
A	сосна	48	75
	береза	16	25
B	сосна	38	64
	ель	21	36

Для построения моделей машинного обучения k-means был написан код на языке Python 3 с использованием библиотек numpy [Harris et al., 2020], scipy [Virtanen et al., 2020] и scikit-learn [Pedregosa et al., 2011].

Результаты исследования. Проведенная классификация методом k-means демонстрирует разные результаты для исследуемых участков (рис. 3). Значения метрики $F1$ участка B (сосна – ель) превышают соответствующие значения для участка A (сосна – береза) примерно на 25% (рис. 3). Таким образом, кластеризация, основанная на большинстве используемых в данной работе вегетационных индексов и отдельных спектров отражения, имеет сравнительно низкую классификационную способность в случае «сосна – береза».

Использование гибридных метрик $F1_h$ и $F1_{hb}$ (метрика $F1_{hb}$ рассчитана аналогично $F1_h$, но для класса с большим количеством образцов) показывает отсутствие высокой точности классификации деревьев на участке A. В случае «сосна – береза» точность моделей k-means колеблется около $F1 \approx 0,5$. Дополнительный анализ метрик $F1_h$ и $F1_{hb}$ выявляет DVI как наиболее перспективный индекс для классификации.

Для случая «сосна – ель» точность моделей $F1 > 0,7$ для большего количества спектральных характеристик. При этом сортировка по метрике $F1_h$ моделей для участка B имеет согласованность как для метрик $F1$, так и для *Accuracy* и $F1_{hb}$. Расхождения среди этих метрик начинают заметно проявляться только при достаточно низких значениях $F1_h$. Таким образом, классификация «сосна – ель» произведена не только с большей точностью, но и с большей выборкой различных спектральных характеристик для классификации. Значительное улучшение точности классификации моделей k-means для участка B может быть связано с тем, что участок B более сбалансирован, чем участок A, то есть в данных для участка B различные древесные породы имеют более равномерное распределение, снижая риск смещения в сторону более представленного класса (табл. 1).

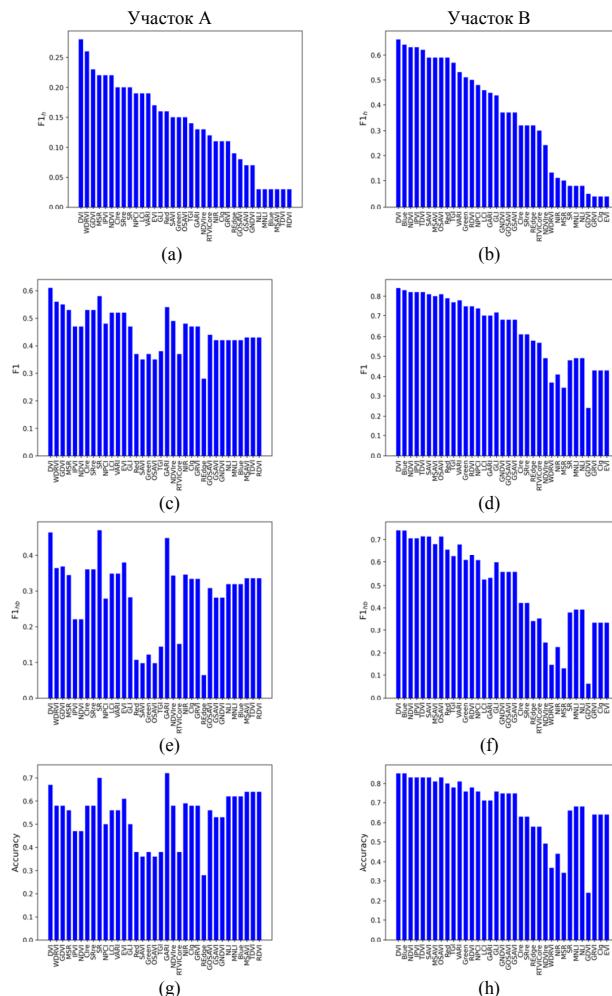


Рис. 3. Оценка качества построенных моделей k-means для различных вегетационных индексов и спектров отражения. Очередность спектральных характеристик отсортирована по точности $F1_h$ моделей для каждого участка.
 Участок А: $F1_h$ (а), $F1$ (с), $F1_{hb}$ (е), $Accuracy$ (г); Участок В: $F1_h$ (б), $F1$ (д), $F1_{hb}$ (ф), $Accuracy$ (х)

Fig. 3. Quality assessment of constructed k-means models for various vegetation indices. The order of spectral characteristics is sorted by the accuracy of $F1_h$ models for each plot. Plot A: $F1_h$ (a), $F1$ (c), $F1_{hb}$ (e), $Accuracy$ (g); Plot B: $F1_h$ (b), $F1$ (d), $F1_{hb}$ (f), $Accuracy$ (h)

Следует отметить, что при классификации «сосна – ель» индекс DVI, а также значения синего канала занимают лидирующие позиции, а вегетационные индексы, использующие синий спектр отражения, – нет. В то же время вегетационные индексы, использующие зеленый спектр отражения, показывают одни из худших результатов как для классификации «сосна – береза», так и для «сосна – ель».

Для оценки вклада каждого спектрального канала в классификацию с помощью вегетационных индексов были построены коробчатые диаграммы по метрике $F1$ (рис. 4а, б). Из коробчатых диаграмм видно, что вклад дальнего красного спектрального канала является самым незначительным для обоих случаев. Максимальный вклад наблюдается для вегетационных индексов, использующих красный и инфракрасный спектральные каналы. Также данные диаграммы подтверждают, что при переходе от случая классификации «сосна – ель» к случаю «сосна – береза» наблюдается значительное снижение вкладов синего и зеленого спектров отражения. Отбор наиболее значимых параметров с помощью РСА показывает, что для построения модели классификации k -means достаточно использовать 3–4 параметра (рис. 4с, д). При этом энтропия Шеннона, максимальное и среднее значения являются наиболее частыми параметрами для описания спектральных характеристик деревьев и демонстрируют наибольшую дисперсию внутри данных по обоим участкам ((рис. 4е, ф).

Обсуждение. Были построены модели бинарной классификации с использованием метода машинного обучения без учителя k -means и вегетационных индексов / спектров отражения для двух участков с различным распределением древесных пород (сосна – ель / сосна – береза). В задаче классификации «сосна – ель» вегетационные индексы, а также синий спектральный канал (470 нм) показывают точность, соответствующую $F1 > 0,8$ и $Accuracy > 0,8$, что является близким к точности методов машинного обучения с учителем в аналогичных задачах [Nevalainen et al., 2017; Onishi, Ise, 2018]. В то же время аналогичные модели k -means для задачи классификации «сосна – береза» не достигают высокой точности, и значение метрики $F1$ для наилучших моделей колеблется около 0,6.

Относительно невысокая точность при классификации участка «сосна – береза» может быть связана также с сезонными изменениями вегетационных индексов у сосны и березы, имеющих общую тенденцию к максимальному насыщению (достижению предельного значения) в июле – августе [Pettorelli et al., 2005; Rautiainen et al., 2009; Piekarski, Zwoliński, 2014]. Возможно, наибольшую классификационную способность данным методом можно достичь в осенний или весенний период, когда разница между хвойными и лиственными деревьями будет более значимой. При этом в обеих задачах лидирующую позицию занимает вегетационный индекс DVI по сравнению с другими аналогами.

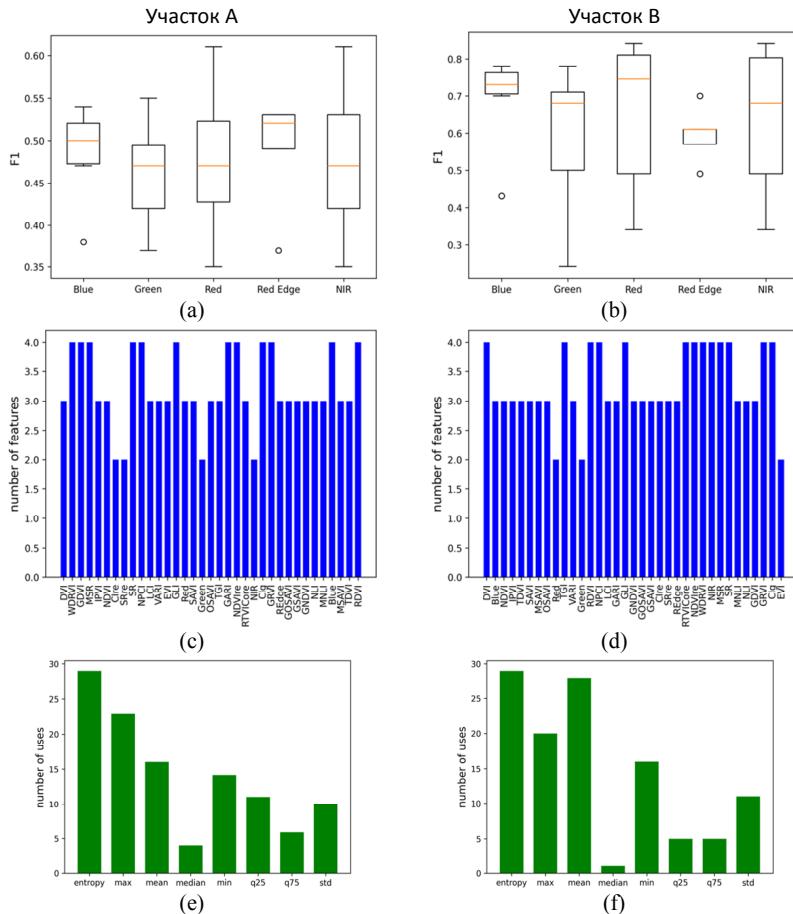


Рис. 4. Определение наиболее значимых спектров отражения, а также описательных характеристик и их количества для классификации древесных пород: а, б – коробчатые диаграммы метрики $F1$ для оценки вклада спектральных каналов в классификацию древесных пород; с, д – гистограммы с количеством параметров после применения алгоритма PCA; е, ф – гистограммы параметров использованных для построения моделей k-means для участков А и В соответственно

Fig. 4. Determination of the most significant spectra, as well as descriptive characteristics and their quantities for identifying tree species: a, b – box plots of the $F1$ metric to assess the contribution of spectral channels to the classification of tree species; c, d – histograms with the number of parameters after applying the PCA algorithm; e, f – histograms of the parameters used to build k-means models for Plots A and B respectively

Заключение. Были получены смешанные результаты по построению моделей классификации древесных пород с использованием метода машинного обучения без учителя k-means. Точность классификации модели зависит от древесных пород лесного массива. Также однозначно установлено, что DVI и синий спектр отражения (470 нм) обладают хорошими описательными характеристиками для построения моделей k-means с высокой точностью ($F1 > 0,8$) для лесных массивов, содержащих древесные породы «сосна – ель».

Относительно невысокая точность классификации лесного массива «сосна – береза» вскрывает проблему близких значений описательных характеристик вегетационных индексов и спектров отражения, используемых в данной работе. Дальнейшее изучение классификации древесных пород методами машинного обучения будет направлено на поиск наиболее репрезентативных вегетационных индексов, универсально описывающих большинство древесных пород, а также на разработку новых алгоритмов обработки спектральных характеристик крон деревьев.

Вклад авторов. И.С. Стешин – 70%, И.В. Петухов – 30%

Сведения о финансировании исследования. Исследование выполнено при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Геоскан Gemini Мультиспектр. URL: <https://www.geoscan.ru/ru/products/gemini-m> (дата обращения: 05.05.2024).

Михайличенко А.А. Аналитический обзор методов оценки качества алгоритмов классификации в задачах машинного обучения // Вестник АГУ. 2022. Вып. 4(311). С. 52–59.

Barandas M., Folgado D., Fernandes L., Santos S., Abreu M., Bota P., Liu Hui, Schultz T., Gamboa H. TSFEL: Time Series Feature Extraction Library // SoftwareX. 2020. Vol. 11. Art. no. 100456.

Chehreh B., Moutinho A., Viegas C. Latest Trends on Tree Classification and Segmentation Using UAV Data—A Review of Agroforestry Applications // Remote Sens (Basel). 2023. Vol. 15, iss. 9. Art. no. 2263.

Crutchfield J.P., Feldman D.P. Regularities Unseen, Randomness Observed: Levels of Entropy Convergence. 2001. URL: <https://arxiv.org/abs/cond-mat/0102181> (дата обращения: 14.09.2024).

Fassnacht F.E., Latifi H., Stereńczak K., Modzelevska A., Lefsky M., Waser L.T., Straub C., Ghosh A. Review of studies on tree species classification from remotely sensed data // Remote Sens Environ. 2016. Vol. 186. P. 64–87.

Hamunyela E., Verbesselt J., Herold M. Using spatial context to improve early detection of deforestation from Landsat time series // *Remote Sens Environ.* 2016. Vol. 172. P. 126–138.

Harris C.R., Millman J., van der Walt S.J., Gommers R., Virtanen P., Cournapeau D., Wieser E., Taylor J., Berg S., Smith N.J., Kern R., Picus M., Hoyer S., van Kerkwijk M.H., Brett M., Haldane A., del Río J.F., Wiebe M., Peterson P., Gérard-Marchant P., Sheppard K., Reddy T., Weckesser W., Abbasi H., Gohlke H., Oliphant T.E. Array programming with NumPy // *Nature*. 2020. Vol. 585, iss. 7825. P. 357–362.

Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E.P., Gao X., Ferreira L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices // *Remote Sens Environ.* 2002. Vol. 83, iss. 1–2. P. 195–213.

Jolliffe I.T., Cadima J. Principal component analysis: A review and recent developments // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2016. Vol. 374. Art. no. 2065.

Macqueen J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations // *Berkeley Symp. on Math. Statist. and Prob.* 1967. P. 281–297.

Nevalainen O., Honkavaara E., Tuominen S., Viljanen N., Hakala T., Yu Xiaowei, Hyppä J., Saari H., Pöölönen I., Imai N.N., Tommaselli A.M.G. Individual tree detection and classification with UAV-Based photogrammetric point clouds and hyperspectral imaging // *Remote Sens (Basel)*. 2017. Vol. 9, iss. 3. Art. no. 185.

Onishi M., Ise T. Automatic classification of trees using a UAV onboard camera and deep learning. 2018. URL: <https://arxiv.org/abs/1804.10390> (дата обращения: 14.09.2024)

Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O., Blondel M., Prettenhofer P., Weiss R., Dubourg V., Vanderplas J., Passos A., Cournapeau D., Brucher M., Perrot M., Duchesnay É. Scikit-learn: Machine Learning in Python // *Journal of Machine Learning Research*. 2011. Vol. 12. P. 2825–2830.

Pettorelli N., Vik J.O., Mysterud A., Gaillard J.-M., Tucker S.J., Stenseth N.C. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change // *Trends Ecol Evol.* 2005. Vol. 20, iss. 9. P. 503–510.

Piekarski P., Zwoliński Z. Temporal variation in vegetation indexes for pine and beech stands during the vegetation season, Szczecin Lowland, Poland // *Quaestiones Geographicae*. 2014. Vol. 33, iss. 3. P. 131–143.

Rautiainen M., Nilson T., Lükk T. Seasonal reflectance trends of hemiboreal birch forests // *Remote Sens Environ.* 2009. Vol. 113, iss. 4. P. 805–815.

Virtanen P., Gommers R., Oliphant T.E., Haberland M., Reddy T., Cournapeau D., Burovski E., Peterson P., Weckesser W., Bright J., van der Walt S.J., Brett M., Wilson J., Millman K.J., Mayorov N., Nelson A.R.J., Jones E., Kern R., Larson E., Carey C.J., Polat I., Feng Yu, Moore E.W., VanderPlas J., Laxalde D., Perktold J., Cimrman R., Henriksen I., Quintero E.A., Harris C.R., Archibald A.M., Ribeiro A.H., Pedregosa F., van Mulbregt P., SciPy 1.0 Contributors. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python // *Nat. Methods*. 2020. Vol. 17, iss. 3. P. 261–272.

Wäldchen J., Mäder P. Plant Species Identification Using Computer Vision Techniques: A Systematic Literature Review // Archives of Computational Methods in Engineering. 2018. Vol. 25, iss. 2. P. 507–543.

Weinstein B.G., Marconi S., Bohlman S., Zare A., White E. Individual tree-crown detection in rgb imagery using semi-supervised deep learning neural networks // Remote Sens (Basel). 2019. Vol. 11, iss. 11. Art. no. 1309.

Weinstein B.G., Marconi S., Bohlman S., Zare A., White E. Cross-site learning in deep learning RGB tree crown detection // Ecol. Inform. 2020. Vol. 56. Art. no. 101061.

Weinstein B.G., Graves S.J., Marconi S., Singh A., Zare A., Stewart D., Bohlman S., White E. A benchmark dataset for canopy crown detection and delineation in co-registered airborne RGB, LiDAR and hyperspectral imagery from the National Ecological Observation Network // PLoS Comput. Biol. 2021. Vol. 17, iss. 7. Art. no. e1009180.

Zhong Lihui, Dai Zhengquan, Fang Panfei, Cao Yong, Wang Leiguang. A Review: Tree Species Classification Based on Remote Sensing Data and Classic Deep Learning-Based Methods // Forests. 2024. Vol. 15, iss. 5. Art. no. 852.

References

Barandas M., Folgado D., Fernandes L., Santos S., Abreu M., Bota P., Liu Hui, Schultz T., Gamboa H. TSFEL: Time Series Feature Extraction Library. *SoftwareX*, 2020, vol. 11, art. no. 100456.

Chehreh B., Moutinho A., Viegas C. Latest Trends on Tree Classification and Segmentation Using UAV Data—A Review of Agroforestry Applications. *Remote Sens (Basel)*, 2023, vol. 15, iss. 9, art. no. 2263.

Crutchfield J.P., Feldman D.P. Regularities Unseen, Randomness Observed: Levels of Entropy Convergence. 2001. URL: <https://arxiv.org/abs/cond-mat/0102181> (accessed: 14.09.2024)

Fassnacht F.E., Latifi H., Stereńczak K., Modzelevska A., Lefsky M., Waser L.T., Straub C., Ghosh A. Review of studies on tree species classification from remotely sensed data. *Remote Sens Environ.*, 2016, vol. 186, pp. 64–87.

Geoscan Gemini Multispectral. URL: <https://www.geoscan.ru/ru/products/gemini-m> (accessed May 05, 2024).

Hamunyela E., Verbesselt J., Herold M. Using spatial context to improve early detection of deforestation from Landsat time series. *Remote Sens Environ.*, 2016, vol. 172, pp. 126–138.

Harris C.R., Millman J., van der Walt S.J., Gommers R., Virtanen P., Cournapeau D., Wieser E., Taylor J., Berg S., Smith N.J., Kern R., Picus M., Hoyer S., van Kerkwijk M.H., Brett M., Haldane A., del Río J.F., Wiebe M., Peterson P., Gérard-Marchant P., Sheppard K., Reddy T., Weckesser W., Abbasi H., Gohlke H., Oliphant T.E. Array programming with NumPy. *Nature*, 2020, vol. 585, iss. 7825, pp. 357–362.

Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E.P., Gao X., Ferreira L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sens Environ.*, 2002, vol. 83, iss. 1–2, pp. 195–213.

Jolliffe I. T., Cadima J. Principal component analysis: A review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2016, vol. 374, art. no. 2065.

MacQueen J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. *Berkeley Symp. on Math. Statist. and Prob.*, 1967, pp. 281–297.

Mikhaylichenko A.A. Analytical review of methods for assessing the quality of classification algorithms. *ASU Bulletin*, 2022, iss. 4(311), pp. 52–59. (In Russ.)

Nevalainen O., Honkavaara E., Tuominen S., Viljanen N., Hakala T., Yu Xiaowei, Hyppä J., Saari H., Pöölönen I., Imai N.N., Tommaselli A.M.G. Individual tree detection and classification with UAV-Based photogrammetric point clouds and hyperspectral imaging. *Remote Sens (Basel)*, 2017, vol. 9, iss. 3, art. no. 185.

Onishi M., Ise T. Automatic classification of trees using a UAV onboard camera and deep learning. 2018. URL: <https://arxiv.org/abs/1804.10390> (accessed: 14.09.2024)

Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O., Blondel M., Prettenhofer P., Weiss R., Dubourg V., Vanderplas J., Passos A., Cournapeau D., Brucher M., Perrot M., Duchesnay É. Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 2011, vol. 12, pp. 2825–2830.

Pettorelli N., Vik J.O., Mysterud A., Gaillard J.-M., Tucker S.J., Stenseth N.C. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends Ecol Evol.*, 2005, vol. 20, iss. 9, pp. 503–510.

Piekarski P., Zwoliński Z. Temporal variation in vegetation indexes for pine and beech stands during the vegetation season, Szczecin Lowland, Poland. *Quaestiones Geographicae*, 2014, vol. 33, iss. 3, pp. 131–143.

Rautiainen M., Nilson T., Lükk T. Seasonal reflectance trends of hemiboreal birch forests. *Remote Sens Environ.*, 2009, vol. 113, iss. 4, pp. 805–815.

Virtanen P., Gommers R., Oliphant T.E., Haberland M., Reddy T., Cournapeau D., Burovski E., Peterson P., Weckesser W., Bright J., van der Walt S.J., Brett M., Wilson J., Millman K.J., Mayorov N., Nelson A.R.J., Jones E., Kern R., Larson E., Carey C.J., Polat I., Feng Yu, Moore E.W., VanderPlas J., Laxalde D., Perktold J., Cimrman R., Henriksen I., Quintero E.A., Harris C.R., Archibald A.M., Ribeiro A.H., Pedregosa F., van Mulbregt P., SciPy 1.0 Contributors. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nat. Methods*, 2020, vol. 17, iss. 3, pp. 261–272.

Waldchen J., Mäder P. Plant Species Identification Using Computer Vision Techniques: A Systematic Literature Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2018, vol. 25, iss. 2, pp. 507–543.

Weinstein B.G., Marconi S., Bohlman S., Zare A., White E. Individual tree-crown detection in rgb imagery using semi-supervised deep learning neural networks. *Remote Sens (Basel)*, 2019, vol. 11, iss. 11, art. no. 1309.

Weinstein B.G., Marconi S., Bohlman S., Zare A., White E. Cross-site learning in deep learning RGB tree crown detection. *Ecol. Inform.*, 2020, vol. 56, art. no. 101061.

Weinstein B.G., Graves S.J., Marconi S., Singh A., Zare A., Stewart D., Bohlman S., White E. A benchmark dataset for canopy crown detection and delineation in co-

registered airborne RGB, LiDAR and hyperspectral imagery from the National Ecological Observation Network. *PLoS Comput. Biol.*, 2021, vol. 17, iss. 7, art. no. e1009180.

Zhong Lihui, Dai Zhengquan, Fang Panfei, Cao Yong, Wang Leiguang. A Review: Tree Species Classification Based on Remote Sensing Data and Classic Deep Learning-Based Methods. Forests, 2024, vol. 15, iss. 5, art. no. 852.

Материал поступил в редакцию 14.10.2024

Стешин И.С., Петухов И.В. Машинное обучение без учителя на основе вегетационных индексов и спектров отражения в задаче классификации деревьев // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 89–102. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.89-102

Статья посвящена применению метода машинного обучения k-means и вегетационных индексов для классификации древесных пород на основе материалов съемки с БПЛА. Вегетационные индексы анализируют спектральные характеристики растений, что особенно полезно для классификации схожих видов деревьев, поскольку они имеют разные спектральные сигнатуры. Исследование проведено на двух лесных участках с распределением деревьев «сосна – береза» и «сосна – ель». Данные были собраны с 5 спектральных датчиков – синего (470 нм), зеленого (560 нм), красного (665 нм), дальнего красного (720 нм) и инфракрасного (840 нм). Детекция крон деревьев была произведена по RGB изображениям, полученным с помощью спектральных датчиков и модели DeepForest. Далее внутри границы детектированных крон деревьев данные со спектральных датчиков обрабатывались для расчета вегетационных индексов каждого дерева. Пиксели по каждому дереву из матричного вида были разложены в вектор, отсортированный по возрастанию. Из каждого вектора были рассчитаны следующие параметры: минимальное, максимальное, среднее, медианное значения, а также 25-й и 75-й квантили и энтропия Шеннона. После чего применялся метод понижения размерности PCA и кластеризации k-means для разделения типов деревьев. Результаты показали, что в случае с сосновой и елью точность классификации превышала 80%, тогда как для сосны и березы метрики были менее успешными, что может быть связано с сезонными изменениями индексов. В обоих случаях лучшими индикаторами оказались DVI, демонстрируя высокую эффективность для определенных лесных покрытий.

Ключевые слова: машинное обучение, таксация деревьев, вегетационные индексы, БПЛА.

Steshin I.S., Petukhov I.V. Unsupervised machine learning based on vegetation indices and reflectance spectra for tree classification. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 89–102 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.89-102

The article is devoted to the use of the k-means machine learning method and vegetation indices for the classification of tree species based on UAV survey materials. Vegetation indices analyze the spectral characteristics of plants, which is especially useful for distinguishing similar tree species, as they exhibit different spectral signatures. The study was conducted on two forest plots with tree distributions of pine-birch and pine-spruce. Data were collected from five spectral sensors: Blue (470 nm), Green (560 nm), Red (665 nm), Far Red (720 nm), and Infrared (840 nm). Tree crown detection was performed using RGB images captured by spectral sensors and the DeepForest model. Within the boundaries of the detected crowns, spectral sensor data were processed to calculate the vegetation indices for each tree. Pixels for each tree from the matrix view were decomposed into a vector, sorted in ascending order. The following parameters were calculated from each vector: minimum, maximum, mean, median values, as well as the 25th and 75th percentiles and Shannon entropy. Dimensionality reduction via PCA and k-means clustering were then applied to differentiate tree types. The results showed that for pine and spruce, classification accuracy exceeded 80%, whereas for pine and birch, the metrics were less successful, possibly due to seasonal changes in the indices. In both cases, DVI proved to be the most effective indicator, demonstrating high efficiency for certain forest covers.

Ключевые слова: machine learning, tree identification, vegetation indices, UAV

СТЕШИН Илья Сергеевич – младший научный сотрудник Поволжского государственного технологического университета. ORCID: 0009-0009-4241-3798.

424000, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия.
E-mail: ilyasteshinm@yandex.ru

STESHIN Ilya S. – junior researcher at Volga State Technological University. ORCID: 0009-0009-4241-3798.

424000. Lenin sq. 3. Yoshkar-Ola. Mari El. Russia. E-mail: ilyasteshinm@yandex.ru

ПЕТУХОВ Игорь Валерьевич – профессор кафедры проектирования и производства электронно-вычислительных средств Поволжского государственного технологического университета, доктор технических наук. SPIN-код: 6009-1846. ORCID: 0009-0000-2365-4857.

424000, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия.
E-mail: PetuhovIV@volgatech.net

PETUKHOV Igor V. – DSc (Technical), Professor of the Department of Design and Production of Electronic Computing Tools, Volga State Technological University. SPIN-code: 6009-1846. ORCID: 0009-0000-2365-4857.

424000. Lenin Sq. 3. Yoshkar-Ola. Mari El. Russia. E-mail: PetuhovIV@volgatech.net

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

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛОТНОСТИ
ДРЕВЕСИНЫ СОСНИКОВ (*PINUS SYLVESTRIS* L.)
НА ПОСТАГРОГЕННЫХ ПОЧВАХ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН**

Введение. Плотность древесины и содержание сухого вещества в компонентах фитомассы деревьев и древостоев являются ключевыми признаками, дающими сведения о механических свойствах древесины и полезную информацию для многих промышленных и научных целей [Перелыгин, Уголев, 1971; Полубояринов, 1976; Лавров, 2015; Усольцев, Цепордей, 2020; Rodriguez et al., 2016; Rosner, 2017].

Плотность влияет на многие физические свойства древесины и дает хорошее представление о ее механических свойствах. С ее помощью можно рассчитать содержание сухого вещества, определить весовую продуктивность древостоев, дать объективную оценку эффективности лесохозяйственных мероприятий. О.И. Полубояринов [1976] показал, что изменения в анатомическом строении древесины лежат в основе колебаний ее плотности.

Знание свойств древесины позволяет разрабатывать эффективные технологические процессы ее переработки, а также делает возможным выращивание древесины с заданными свойствами. Древесина – это материал биологического происхождения, для которого характерна вариативность свойств. Это связано с особенностями биологического развития дерева в онтогенезе. Свойства древесины варьируются как по высоте, так и по сечению ствола [Тюрин и др., 2024]. На показатели изменчивости сильно влияют условия произрастания дерева. Климатические условия оказывают большое влияние на формирование плотности, особенно в раннем возрасте. Формирование плотности древесины зависит от широтной зональности и климатического региона; влияние расстояния между деревьями и класса роста насаждений не оказывает существенного влияния на формирование плотности древесины в зрелом возрасте [Clark, Saucier, 1989; Kantieva et al., 2021].

Расстояние между деревьями оказывает существенное влияние на формирование плотности древесины в стволе дерева в менее благоприятных условиях произрастания в лесостепной зоне, а также в континенталь-

ном и умеренно континентальном климате. Изменчивость погодных условий является определяющим фактором роста деревьев в лесостепи [Fujimoto, Koga, 2010; Kiseleva et al., 2020]. Увеличение широтной зональности способствует увеличению плотности древесины в древостоях в зоне муссонного климата, в зоне той же зональности (восточные регионы Российской Федерации) [Костенко, 2012].

Сосновые молодняки на постагрогенных землях существенно отличаются от древостоев естественного происхождения в регионе исследования по состоянию, росту и дифференциации деревьев, строению и нуждаются в особых подходах к их изучению.

Исследованию плотности древесины хвойных на бывших сельскохозяйственных землях посвящён ряд работ для европейской части РФ, однако для региона исследования публикации фактически отсутствуют [Лохов, 2011; Голубева, Наквасина, 2017; Грибов и др., 2020; Януш, Данилов, 2020; Danilov et al., 2018]. В связи с этим целью проведенного исследования являлось выявление закономерностей формирования показателей плотности древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в насаждениях, произрастающих в различных районах Республики Татарстан на постагрогенных землях.

Объекты и методика исследования. На основании анализа картографических и лесоустроительных материалов Республики Татарстан были отобраны участки залежных земель, к настоящему времени занятые сосновыми насаждениями. Были охвачены объекты с различающимися сроками прекращения использования под пашню. Средний возраст соснового элемента леса по объектам на бывших пахотных землях составлял от 10 до 55 лет, что позволило сделать обоснованные выводы по различным возрастным этапам. Естественно сформировавшиеся молодняки имели незначительную примесь березы (*Betula pendula* Roth) в составе. Схема опыта представляла из себя три естественно сформировавшихся молодняка и контрастный к ним лесокультурный объект. Также для сравнительного анализа формирования плотности на бывшей пашне и на лесных почвах в сходных лесоклиматических условиях региона был выбран участок соснового древостоя естественного происхождения возрастом 85 лет, тип лесорастительных условий – А2-В2.

На каждом участке были заложены пробные площади (далее – ПП), руководствуясь ОСТ 56-69-83. Лесоводственно-таксационные показатели исследуемых насаждений на 2023 г. приведены в табл. 1. В древостоях средним возрастом 55 и 85 лет проводился сплошной перечет деревьях на площадках

0,25 га (по ступеням толщины с шагом 2 см), в молодняках учет проводился методом круговых площадок [Грязькин, 1997]. На ПП были сделаны прикопки для определения почвенно-грунтовых условий [Чертов, 1981].

Таблица 1

Таксационные характеристики насаждений по объектам исследования

Taxation characteristics of stands according to research objects

№ ПП	A _{ср} , лет		H _{ср} , м		D _{ср} , см		Густота, тыс. шт./га		M, м ³
	С	Б	С	Б	С	Б	С	Б	
Бугульминский р-н РТ, Петровское л-во, ЕВ, выщелоченный постагротенный чернозем									
ПП-1	15	11	4,8	5,0	6,2	10	8,7	0,2	101
ПП-2	15	11	4,2	4,7	6,8	11	7,2	0,1	92
Лаишевский р-н РТ, Пригородное л-во, Столбищенское уч. л-во, ЕВ, песчаный серый агрозём									
ПП-1	11	11	2,8	4,6	10	6,1	5,1	0,1	44
ПП-2	12	11	3,2	4,1	8,8	5,6	4,2	0,1	40
Высокогорский р-н РТ, Высокогорское уч. л-во, ЕВ, суглинистый серый агрозем									
ПП-1	12	11	4,2	5,1	4,2	6,1	6,8	0,3	82
ПП-2	12	11	4,6	4,5	4,8	5,6	5,2	0,2	61
Пестречинский р-н РТ, Шигалеевское поселение, склоновые противоэррозионные ЛК на бывшей пашне, суглинистый серый агрозем									
ПП-1	10	—	3,5	—	4,4	—	3,5	—	37
ПП-2	10	—	3,6	—	4,6	—	3,6	—	39
Лаишевский р-н РТ, Пригородное л-во, Столбищенское уч. л-во, ЛК на старопахотных почвах, песчаная серая почва									
ПП-1	55	—	19,1	—	20	—	0,8	—	255
ПП-2	55	—	20,1	—	22	—	0,8	—	260
Лаишевский р-н РТ, Пригородное л-во, Матюшинское уч. л-во, ЕВ, песчаная серая почва									
ПП-1	85	—	23,5	—	32	—	0,7	—	210

Примечание: здесь и далее A_{ср} – средний возраст элемента леса; H_{ср} – средняя высота ствола; D_{ср} – средний диаметр ствола; M – общий запас; РТ – Республика Татарстан; ЕВ – естественно возобновившееся насаждение; ЛК – лесные культуры; С – сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*); Б – береза повислая (*Betula pendula*); уч. л-во – участковое лесничество

Средние данные по рядам распределения деревьев сосны по ступеням толщины в молодняках приведены на рис. 1. В естественных древостоях сосны наблюдается близкое к нормальному распределение стволов деревьев. В культурах имеется правый скос кривой распределения ступеней, что, вероятно, связано с регулярным размещением деревьев.

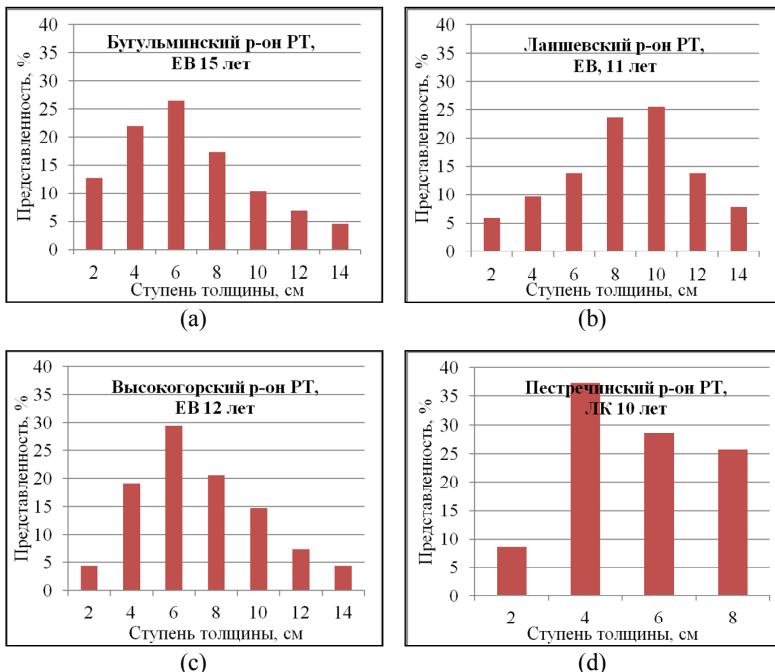


Рис. 1. Ряды распределения по ступеням толщины насаждений сосны в молодняках на бывших пахотных землях: (а) Бугульминский р-н РТ; (б) Лайшевский р-н РТ; (в) Высокогорский р-н РТ; (г) Пестречинский р-н РТ

Fig. 1. Tree distribution according to the thickness stages of young pine stands:
 (a) Bugulminsky district of the Republic of Tatarstan; (b) Laishevsky district;
 (c) Vysokogorsky district; (d) Pestrechinsky district

На объектах возрастом 55 и 85 лет распределение имеет скос в сторону крупных ступеней толщины. В культурах 55 лет наиболее представлены деревья 20 см ступени толщины (31%).

На опытных объектах проводился отбор модельных деревьев по представленным ступеням толщины с последующей их валкой и раскряжевкой. Всего было изучено 12 моделей в насаждениях 55 лет и 32 образца в насаждениях до 15 лет (охвачены наиболее представленные ступени тол-

шины). Подход к отбору образцов с модельных деревьев различался в связи с возрастом объектов: для молодняков до 15 лет диски отбирались через каждый метр длины ствола, а для насаждений возрастом 55 лет отбор был произведен с интервалом в 10% от длины ствола [Полубояринов, 1976]. Определялась базисная плотность образцов древесины по секторам дисков методом максимальной влагоемкости согласно методике, предложенной проф. О.И. Полубояриновым; средняя плотность дерева рассчитывалась как средневзвешенная в соответствии с объемом древесины, представляемой сектором образца [Полубояринов, 1976].

Достоверность различий показателей базисной плотности по объектам оценивалась с помощью дисперсионного анализа [Доспехов, 2011]. В дальнейшем составлялись регрессионные уравнения определения базисной плотности древесины с высоты отбора образца на высоте 1,3 м от уровня почвы [Полубояринов, 1976; Данилов, 2017; Усольцев, Цепордей 2020]. Применимость предложенных уравнений оценивалась с помощью коэффициента детерминации R^2 [Доспехов, 2011].

Результаты исследования. В ходе проведённого исследования были получены показатели средней базисной плотности древесины ствола на модельных деревьях по ступеням толщины насаждения. По сосновым молоднякам данные представлены в табл. 2.

Таблица 2

Средняя базисная плотность ствола сосны (кг/м³) по ступеням толщины в молодняках на опытных объектах

The average basis density of the spruce trunk according to diameter classes (kg/m³) at experimental sites

	Ступень толщины ствола, см						
	2	4	6	8	10	12	14
Бугульминский р-н РТ, ЕВ 15 лет, выщелоченный постагротический чернозем							
ρ _{ср. баз.}	—	410,7	359,1	383,7	426,6	398,9	358,9
Лаишевский р-н РТ, ЕВ 11 лет, песчаный серый агрозём							
ρ _{ср. баз.}	—	281	249	267	291	340	284
Высокогорский р-н РТ, ЕВ 12 лет, суглинистый серый агрозём							
ρ _{ср. баз.}	380,2	380,4	370,7	232,7	312,7	351,2	365,9
Пестречинский р-н РТ, склоновые противоэрозионные ЛК на бывшей пашне 10 лет, суглинистый серый агрозём							
ρ _{ср. баз.}	304,6	365,7	309,7	306,9	—	—	—

Примечание: ρ_{ср. баз.} – средняя базисная плотность древесины ствола сосны, кг/м³

Распределения плотности по ступеням толщины для лесных культур на старопахотных почвах и на лесной почве старших возрастов приведены на рис. 2. В естественных и в искусственных насаждениях региона средняя плотность древесины ствола снижается с увеличением диаметра дерева на данных возрастных этапах.

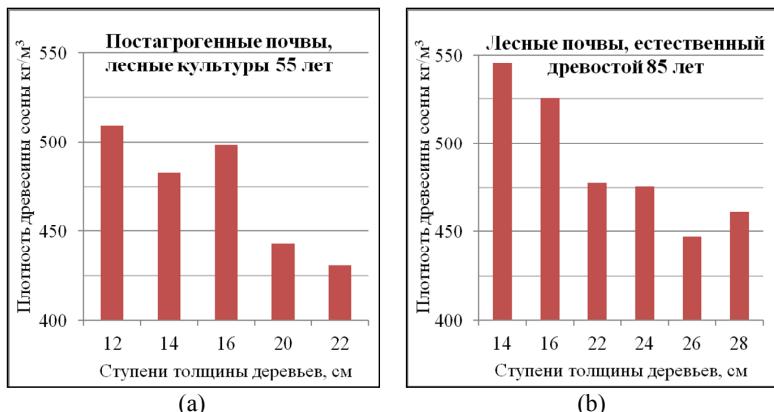


Рис. 2. Средняя плотность древесины ствола сосны по ступеням толщины на песчаных серых почвах в Лайшевском р-не РТ, Пригородное л-во: (а) Столбischенское уч. л-во, лесные культуры на старопахотных землях; (б) Матюшинское уч. л-во, естественно сформировавшиеся насаждения на лесной почве

Fig. 2. The average density of pine trunk wood according to diameter classes on sandy gray soils in Laishevsky district of the Republic of Tatarstan, Prigorodnoye forestry:

- (a) Stolbischenskoe district forestry, forest plantations on old fallow lands;
- (b) Matyushinskoe district forestry, naturally formed plantations on forest soils

Дисперсионный анализ показал значимое влияние почвенного фактора на показатели плотности древесины ствола для молодняков по критерию Фишера ($F_{расч} = 13,08$ при $F_{0,05} = 2,70$). Региональные различия по молоднякам сосны подтверждаются при пошаговом анализе между древостоями сосны, возобновившимися на почвенных разностях в районах региона исследования (табл. 3). Для суглинистых серых агроземов в культурах и в естественно сформировавшихся древостоях средняя плотность древесины ствола значимо не различается.

Показатели средней плотности древесины ствола сосны в древостоях на старопахотных почвах (55 лет) и объекте на лесных почвах (85 лет), расположенных на песчаных серых почвах Лайшевского района РТ, имели разные показатели (рис. 2). Однако проведённый дисперсионный анализ не подтвердил значимость этих различий ($F_{расч} = 0,41$ при $F_{0,05} = 2,70$).

**Дисперсионный анализ различий показателей плотности древесины
ствола сосны в молодняках по *t*-критерию Стьюдента**

**Analysis of variance of differences in the wood density of pine trunks
of young stands by Student's *t*-test**

Сравниваемые пары районов исследования	<i>t</i>	<i>p-value</i>
Выщелоченные чернозёмы постагрогенные (ЕВ, Бугульминский р-н РТ) и песчаные серые агрозёмы (ЕВ, Лаишевский р-н РТ)	6,71	0,001
Выщелоченные чернозёмы постагрогенные (ЕВ, Бугульминский р-н РТ) и суглинистые серые агроземы (ЕВ, Высокогорский р-н РТ)	2,64	0,018
Песчаные серые агрозёмы (Лаишевский р-н РТ) и суглинистые серые агроземы (Высокогорский р-н РТ)	-2,90	0,012
Суглинистые серые агроземы (ЛК, Пестречинский р-н РТ) и выщелоченные чернозёмы постагрогенные (ЕВ, Бугульминский р-н РТ)	-4,24	0,001
Суглинистые серые агроземы (ЛК, Пестречинский р-н РТ) и песчаные серые агрозёмы (ЕВ, Лаишевский р-н РТ)	2,33	0,035
Суглинистые серые агроземы (ЛК, Пестречинский р-н РТ) и суглинистые серые агроземы (ЕВ, Высокогорский р-н РТ)	-0,99	0,341

Примечание: *t* – расчетное значение *t*-критерия Стьюдента; *p-value* – расчетный уровень значимости при тестировании с использованием *t*-критерия

На основании проведённых исследований плотности древесины сосны с использованием модельных деревьев был получен ряд данных по взаимосвязи показателей базисной плотности на высоте 1,3 м от уровня почвы со средней базисной плотностью всего ствола по районам исследования в Республике Татарстан. Была использована линейная аппроксимация полученных данных, регрессионные уравнения приведены в табл. 4. Несмотря на отсутствие значимых различий (табл. 3), в показателях по суглинистым агроземам приведены различные уравнения по объектам исследования, т.к. они показали разное качество предсказания модели (по R^2).

Коэффициенты линейного уравнения при переменной и свободный член являются сходными для естественно возобновившихся сосновых молодняков, однако для десятилетних лесных культур связь показателей плотности на высоте груди и общей плотности ствола не такая сильная и не столь обуславливается линейным уравнением. Для древостоев 55 и 85 лет свободный член предложенных уравнений достаточно высок, что показывает значительное смещение от начала координат.

Таблица 4

Линейные уравнения зависимости средней базисной плотности древесины ствола сосны (кг/м³) от показателя на высоте 1,3 м по опытным объектам

Linear equations of dependence of average basic density of pine trunk wood (kg/m³) on the basic density at a height of 1.3 m on experimental sites

Район, объект	Уравнение	R^2
Выщелоченные чернозёмы постагротические (ЕВ 15 лет, Бугульминский р-н РТ)	$y = 0,88x + 62,63$	0,83
Песчаные серые агроземы (ЕВ 11 лет, Лаишевский р-н РТ)	$y = 0,80x + 78,84$	0,84
Суглинистые серые агроземы (ЕВ 12 лет, Высокогорский р-н РТ)	$y = 0,85x + 59,80$	0,85
Суглинистые серые агроземы (ЛК 10 лет, Пестречинский р-н РТ)	$y = 1,10x - 25,84$	0,64
Песчаные серые почвы (ЛК 55 лет на старопахотных почвах, Лаишевский р-н РТ)	$y = 0,51x + 204,50$	0,85
Песчаные серые почвы (естественный древостой 85 лет на лесных почвах, Лаишевский р-н РТ)	$y = 1,03x - 77,16$	0,77

Примечание: у – средняя базисная плотность древесины ствола сосны, кг/м³; x – базисная плотность древесины сосны на высоте 1,3 метра

Заключение. Сосновые древостои Республики Татарстан формируют различную плотность стволовой древесины в зависимости от региона произрастания. Лесные культуры 55 лет, произрастающие на старопахотных землях, сформировали относительно сходную по плотности стволовую древесину с древостоями естественного происхождения старшего возраста, при этом опережая их по запасу. Таким образом, фитомасса древесины таких культур уже в 55 лет превышает фитомассу естественных древостоев 85 лет в сходных почвенных условиях региона. Различающиеся почвенно-грунтовые условия оказали достоверное влияние на формирование плотности древесины в молодняках. В молодняках естественного происхождения на бывшей пашне полученные в ходе исследования регрессионные уравнения имеют достаточный уровень коэффициента детерминации (R^2) и, следовательно, могут быть использованы для определения средней плотности древесины ствола и в дальнейшем стволовой фитомассы сосновых насаждений, произрастающих на постагротических землях Республики Татарстан.

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

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Голубева Л.В., Наквасина Е.Н. Трансформация постагрогенных земель на карбонатных отложениях: монография. Архангельск: Консультационное информационно-рекламное агентство, 2017. 152 с.

Грибов С.Е., Корчагов С.А., Хамитов Р.С., Евдокимов И.В. Производительность древостоев, сформировавшихся на землях сельскохозяйственного назначения // Лесной вестник / Forestry Bulletin. 2020. Т. 24, № 6. С. 19–25. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-6-19-25

Грязькин А.В. Патент № 2084129, Российская Федерация, МКИ С 6 А 01 G 23/00. Способ учета подроста. № 940223. Опубл. 20.07.97. Бюл. № 20.

Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Альянс, 2011. 350 с.

Костенко Н.А. Влияние плотности древесины на производительность лесозаготовительной системы машин, используемых в Амурской области // Вестник КрасГАУ. 2012. № 2. С. 187–191.

Лавров М.Ф. Составление карт распределения плотности в поперечных и продольных сечениях ствола дерева // Наука и образование. 2015. № 2. С. 78–84.

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

Перелыгин Л.М., Уголов Б.Н. Древесиноведение. М.: Лесн. пром-сть, 1971. 288 с.

Полубояринов О.И. Плотность древесины. М.: Лесная промышленность, 1976. 160 с.

Тюрин Д.С., Зайцев Д.А., Данилов Д.А. Структура надземной фитомассы ели и сосны в плантационных насаждениях, выращиваемых по короткой ротации // Труды СПбНИИЛХ. 2024. № 1. С. 4–18. DOI: 10.21178/2079-6080.2024.1.4

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

Чертов О.Г. Экология лесных земель (почвенно-экологическое исследование лесных местообитаний). Л.: Наука, 1981. 192 с.

Януш С.Ю., Данилов Д.А. Таксационная и товарная структура древостоев сосны и ели на старопахотных и лесных почвах в Ленинградской области // Труды СПбНИИЛХ. 2020. № 4. С. 54–64. DOI: 10.21178/2079–6080.2020.4.54

Clark A., Saucier J.R. Influence of initial planting density, geographic location, and species on juvenile wood formation in southern pine // Forest Products Journal. 1989. Vol. 39, iss. 7/8. P. 42–48.

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

Fujimoto T., Koga S. An application of mixed-effects model to evaluate the effects of initial spacing on radial variation in wood density in Japanese larch (*Larix kaempferi*) // Journal of Wood Science. 2010. Vol. 56. P. 7–14. DOI: org/10.1007/s10086-009-1045-1.

Kantieva E., Snegireva S., Platonov A. Formation of density and porosity of pine wood in a tree trunk // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 875, iss. 1. P. 1–6. DOI:10.1088/1755-1315/875/1/012016.

Kiseleva A.V., Snegireva S.N., Platonov A.D., Pinchevska O.A. Density formation along the trunk radius in various wood species based on latitudinal or altitudinal zoning // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 595, iss. 1. Art. no. 012055. DOI:10.1088/1755-1315/595/1/012055.

Rodriguez H.G., Maiti R., Kumari A., Sarkar N.C. Variability in wood density and wood fibre characterization of woody species and their possible utility in North-eastern Mexico // American Journal of Plant Sciences. 2016. Vol. 7. P. 1139–1150. DOI:10.4236/ajps.2016.77109.

Rosner S. Wood density as a proxy for vulnerability to cavitation: size matters // Journal of Plant Hydraulics. 2017. Vol. 4. P. 1–10. DOI:10.20870/jph.2017.e001.

References

Chertov O.G. Ecology of forest lands (soil-ecological study of forest habitats). Leningrad: Nauka, 1981. 192 p. (In Russ.)

Clark A., Saucier J.R. Influence of initial planting density, geographic location, and species on juvenile wood formation in southern pine. *Forest Products Journal*, 1989, vol. 39, iss. 7/8, pp. 42–48.

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

Dospekhov B.A. Methodology of field experiment (with the basics of statistical processing of research results). Moscow: Alliance, 2011. 350 p. (In Russ.)

Fujimoto T., Koga S. An application of mixed-effects model to evaluate the effects of initial spacing on radial variation in wood density in Japanese larch (*Larix kaempferi*). *Journal of Wood Science*, 2010, vol. 56, pp. 7–14. DOI: org/10.1007/s10086-009-1045-1.

Golubeva L.V., Nakvasina E.N. Transformation of post-agrogenic lands on carbonate sediments: a monograph. Arkhangelsk: Consulting Information and Advertising Agency, 2017. 152 p. (In Russ.)

Gribov S.E., Korchagov S.A., Khamitov R.S., Evdokimov I.V. Productivity of forest stands formed on agricultural lands. *Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, iss. 6, pp. 19–25. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-6-19-25. (In Russ.)

Gryazkin A.V. Patent No. 2084129, Russian Federation, IPC C 6 A 01 G 23/00. Method for recording undergrowth. № 940223. Publ. 20.07.97. Byul. № 20. (In Russ.)

Kantieva E., Snegireva S., Platonov A. Formation of density and porosity of pine wood in a tree trunk. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 875, iss. 1, pp. 1–6. DOI:10.1088/1755-1315/875/1/012016.

Kiseleva A.V., Snegireva S.N., Platonov A.D., Pinchevska O.A. Density formation along the trunk radius in various wood species based on latitudinal or altitudinal zoning. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 595, iss. 1, art. no. 012055. DOI:10.1088/1755-1315/595/1/012055.

Kostenko N.A. The influence of wood density on the productivity of the logging system of machines used in the Amur region. *The Bulletin of KrasGAU*, 2012, vol. 2, pp. 187–191. (In Russ.)

Lavrov M.F. Compilation of density distribution maps in transverse and longitudinal sections of a tree trunk. *Science and Education*, 2015, vol. 2, pp. 78–84. (In Russ.)

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

Pereleygin L.M., Ugolev B.N. Wood science. Moscow: Lesn. prom-st', 1971. 288 p. (In Russ.)

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

Rodriguez H.G., Maiti R., Kumari A., Sarkar N.C. Variability in wood density and wood fiber characterization of woody species and their possible utility in Northeastern Mexico. *American Journal of Plant Sciences*, 2016, vol. 7, pp. 1139–1150. DOI:10.4236/ajps.2016.77109.

Rosner S. Wood density as a proxy for vulnerability to cavitation: size matters. *Journal of Plant Hydraulics*, 2017, vol. 4, pp. 1–10. DOI:10.20870/jph.2017.e001.

Tyurin D.S., Zaitsev D.A., Danilov D.A. Structure of aboveground phytomass of spruce and pine in plantation stands grown by short rotation. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, vol. 1, pp. 4–18. DOI: 10.21178/2079-6080.2024.1.4. (In Russ.)

Usoltsev V.A., Tseporei I.S. Qualimetry of phytomass of forest trees: density and dry matter content: a monograph. Yekaterinburg: USFTU, 2020. 179 p. (In Russ.)

Yanush S.Yu., Danilov D.A. Taxation and commodity structure of pine and spruce stands on old arable and forest soils in the Leningrad region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2020, vol. 4, pp. 54–64. DOI: 10.21178/2079-6080.2020.4.54. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 11.11.2024

Гибадуллин Н.Ф., Зайцев Д.А., Бачериков И.В., Мусин Х.Г., Мирсияпов Н.И., Галимуллин А.Ф. Особенности формирования плотности древесины сосняков (*Pinus sylvestris* L.) на постагрогенных почвах Республики Татарстан // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 103–117. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.103-117

В настоящее время большое количество земель, ранее использовавшихся в сельском хозяйстве, выведено из активного хозяйственного оборота, и на этих участках идёт процесс восстановления аборигенной лесной растительности. Данные участки постагрогенных земель представляют интерес для изучения закономерностей формирования не только запаса, но и плотности древесины. В ходе исследования проведена комплексная оценка сосновых древостоев, произрастающих на бывших пахотных землях Республики Татарстан. Опыт проведен по двум направлениям: серия объектов на различных по характеру агроземах в четырех районах республики (молодняки возрастом 10–15 лет, в том числе лесные культуры), и объект на старопахотных почвах (культуры возрастом 55 лет) с контрастным к нему естественно сформировавшимся древостоем (85 лет в сходных почвенно-грунтовых условиях на лесных почвах). На опытных объектах были заложены пробные площади, на которых проводился учет растительности и осуществлялся отбор модельных деревьев сосны с последующей их раскряжевкой. Используя полученные наборы дисков древесины с моделяй, была посекторно определена их базисная плотность и в дальнейшем проведен расчет средней базисной плотности ствола по ступеням толщин древостоя. Были выявлены закономерности формирования плотности древесины сосновых древостоев на постагрогенных почвах и предложены регрессионные уравнения по взаимосвязи показателей базисной плотности древесины на высоте 1,3 м от уровня почвы со средней базисной плотностью всего ствола по районам исследования. Регрессионные уравнения имеют достаточный уровень коэффициента детерминации (R^2) и могут быть использованы для определения средней плотности древесины ствола и в дальнейшем стволовой фитомассы сосновых насаждений, произрастающих на постагрогенных землях Республики Татарстан.

Ключевые слова: плотность древесины, древостои сосны, постагрогенные земли, старопахотные почвы, регрессионные уравнения.

Gibadullin N.F., Zaytsev D.A., Bacherikov I.V., Musin H.G., Mirsiyapov N.I., Galimullin A.F. Features of wood density formation in pine forests (*Pinus sylvestris* L.) on postagrogenic soils of the republic of Tatarstan. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 103–117 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.103-117

Currently, a large number of lands previously used in agriculture have been removed from active economic circulation, and the process of restoring native forest vegetation is underway in these areas. These areas of post-agrogenic lands are of interest for studying the patterns of formation of not only the wood stock, but also the density of wood. In the process of the study, a comprehensive assessment of pine stands growing on the former arable lands of the Republic of Tatarstan was carried out. The experiment was conducted in two directions: a series of objects on different

types of post-agrogenic soils in four regions of the republic (young stands aged 10–15 years, including forest plantations), and an object on old arable soils (forest plantations aged 55 years) with a contrasting naturally formed stand (85 years in similar soil conditions on forest soils). Trial sites were laid out at the experimental objects, where vegetation was recorded and model pine trees were selected, followed by their felling. Using the obtained sets of wood discs from the models, their basic density was determined sectorially and then the average basic density of the trunk was calculated according to the diameter classes of the stand. Patterns of wood density formation in pine stands on post-agrogenic soils were determined and regression equations were proposed for the relationship of the basic density of wood at an altitude of 1.3 m from the soil level with the average basic density of the entire trunk in the study areas. The regression equations have a sufficient level of the coefficient of determination (R^2) and can be used to determine the average density of the trunk wood and subsequently the stem phytomass of pine plantations growing on the post-agrogenic lands of the Republic of Tatarstan.

Keywords: wood density, pine stands, post-agrogenic lands, old arable soils, regression equations.

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

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

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

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

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

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия;
старший научный сотрудник отдела агрохимии и агроландшафтов Ленинградского НИИСХ «Белогорка» – филиала ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр картофеля им. А.Г. Лорха». SPIN-код: 1340-0849. ORCID: 0000-0002-8704-6516.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

М.А. Николаева, М.Е. Гузюк, Н.И. Баранов, А.В. Жигунов

**ИЗУЧЕНИЕ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ
В ДВУХ ПОКОЛЕНИЯХ КУЛЬТУР ЕЛИ
В ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ**

Введение. Изучению географической изменчивости наследственных свойств лесных пород в географических культурах в нашей стране и за рубежом издавна уделяется большое внимание [Тарханов, 1998; Шутяев, 2011; Giertych, 1976; Norway..., 2012]. На основании многолетних испытаний климатипов в географических культурах совершенствуется лесосеменное районирование, которое служит фундаментом для создания лесосеменной базы в отдельных регионах, обеспечивающим оптимизацию генетического состава создаваемых насаждений, перевод лесокультурного производства на использование селекционно ценных семян и сохранение генофонда лесообразующих пород [Лесосеменное..., 1982]. Однако действующее Лесосеменное районирование (Приказ МПР РФ от 2022 г.) игнорирует мнение учёных и сводится к административно-территориальному подразделению лесосеменных районов, что впоследствии может привести к необратимым потерям устойчивости лесов [Санников и др., 2017; Николаева и др., 2019; Раевский и др., 2022]. Таким образом, проблема научно обоснованного лесосеменного районирования в России до сих пор не решена.

Испытание потомств климатипов в ряде поколений географических культур позволит уточнить адаптационную способность инорайонных потомств к изменению физико-географических условий произрастания, оценить перспективность их отбора, выявить и использовать закономерности географической изменчивости наследственных свойств лесообразующих пород, в особенностях в условиях изменяющегося климата.

Опыты по изучению географических культур во II, III поколении представляют значительный интерес для лесной селекции [Шутяев, 2007]: в результате внутривидовой гибридизации между географически различающимися популяциями можно ожидать проявления гетерозисного эффекта роста [Park, Gerhold, 1986]. Соответствующие исследования проводились в Воронежской [Шутяев, 2007], Архангельской [Наквасина, Барабин, 2009], Волгоградской [Морозова, Иозус, 2015] областях, на Украине [Паттай, 1974], в Беларуси [Манцевич, 1971; Лацевич, 2003], в Республике Коми

[Наквасина, 2014], Красноярском крае [Матвеева и др., 2019], но посвящены они сосне обыкновенной или сосне кедровой сибирской. В Беларуси в культурах сосны II поколения, благодаря заготовке черенков среди отдельных климатипов и лучших по фенотипу деревьев, создана клоновая гибридно-семенная плантация и впервые зарегистрирован сорт сосны обыкновенной «Негорельская», отличающийся интенсивным ростом и обильным семеношением [Поплавская и др., 2017]. В Костромской области прослежено влияние факторов происхождения семян на развитие потомств в двух поколениях географических культур ели [Багаев, 2014].

Работа посвящена анализу и обобщению результатов, полученных на объектах географических культур ели первого (I) и второго (II) поколений. Цель – изучение географической изменчивости ели на основе сравнительного анализа сохранности, состояния и роста потомств в двух поколениях географических культур и отбор наиболее перспективных климатипов для Ленинградского лесосеменного подрайона.

Объекты и методика исследований. Исследованы географические культуры (ГК) ели двух поколений в Ленинградской области (ЛО). В урожайные годы, в 24- и 31-летних ГК I поколения выполнена заготовка шишек, выращены полусибосовые потомства и созданы ГК II поколения.

Объект ГК I поколения является частью обширного эксперимента, заложенного по единой программе и методике ВНИИЛМ [Изучение..., 1972] в 1977 г. на территории Тосненского лесничества Лисинского лесохозяйственного техникума (в настоящее время относится к Любанско-Лисинскому лесничеству); географические координаты местонахождения объекта – 59°30' с.ш., 30°52' в.д. Высота над уровнем моря – 46 м. До освоения участок представлял собой свежую вырубку на месте берёзово-еловых и берёзово-осиновых насаждений II-III классов бонитета кисличных и черничных типов леса. Почвы дерновые, слабоподзолистые, глеевые, среднесуглинистые на моренном валунном тяжелом суглинке. ГК высажены на площади 24 га, в 3-кратной повторности, 3-летними сеянцами, густота посадки – 5,35 тыс. шт./га. Испытываются потомства 35 климатипов, в том числе *Picea abies* (L.) Karst., *P. obovata* Ledeb. и происходящие из зоны интровергессивной гибридизации между этими двумя видами.

Сбор шишек в I поколении ГК предусматривал выполнение сравнительного анализа и оценку качества семенного и посадочного материала по всем вариантам [Николаева, 2005]. Однако особого внимания заслуживают потомства с высоким потенциалом самовозобновления. Высокие урожай шишек и качество семян в потомствах *Picea abies* и гибридных форм ели

позволили создать в ЛО три объекта ГК II поколения. Принимая во внимание слабую способность к цветению *P. obovata* в условиях ЛО, активное перепопыление её с *P. abies* маловероятно. В связи с низким урожаем шишек и слабым выходом семян из шишек *P. obovata* не включена в исследования.

Зимой 2000/2001 гг. впервые провели заготовку шишек. В результате был выращен посадочный материал – 4-летние саженцы (1+3) – и в 2006 г. создан первый в ЛО объект ГК II поколения, расположенный в Гатчинском лесничестве ($59^{\circ}19'$ с.ш., $30^{\circ}01'$ в.д.). Под посадку занята вырубка 2005 г., на месте которой, вследствие повреждения насаждений ели корневой губкой (*Heterobasidion annosum* (Fr. (Bref.) и короедом-типографом (*Ips tipographus* L.), проводилась сплошная санитарная рубка; насаждение было представлено спелым-перестойным ельником кисличным (C_2) II класса бонитета. Площадь – 1,5 га. Почвы хорошо дренированные, среднеподзолистые, супесчаные, местами легкосуглинистые. Густота посадки – 2,86 тыс. шт./га.

Другие два объекта ГК II поколения созданы семенным материалом, заготовленным зимой 2007/2008 гг. В Лисинском учебно-опытном лесничестве (Лисинское УОЛ) ($59^{\circ}26'$ с.ш., $30^{\circ}43'$ в.д.) ГК были заложены в 2013 г., на площади 5,5 га, в 2-кратной повторности, 5-летними саженцами (2+3); густота посадки – 2,0 тыс. шт./га. Под культуры занята свежая вырубка на месте ельника кислично-черничного (C_{2-3}) II класса бонитета, с количеством пней 600 шт./га и естественным возобновлением берёзой и осиной 1000 шт./га. Почвы грубогумусные, слабоподзолистые, среднесуглинистые на моренном суглинке, с избыточным увлажнением; с целью создания оптимального гидрологического режима создана сеть осушительных канав с сорбителями. ГК в Кировском лесничестве ($59^{\circ}40'$ с.ш., $31^{\circ}19'$ в.д.) заложены в 2015 г., на площади 2,0 га, в 2-кратной повторности, 6-летними саженцами; густота посадки – 1,25 тыс. шт./га. Почвы сильноподзолистые, на суглинках, недостаточно дренированные. Посадка выполнена на участке культур сосны, пройденных пожаром.

Всего в ГК II поколения испытываются потомства 20 климатипов с видовой принадлежностью к *Picea abies* и гибридным формам с признаками *Picea abies* и *P. obovata*.

В табл. 1 приведены сведения об исходном географическом происхождении семян, которые были использованы при создании ГК I поколения, климатические данные (сумма эффективных температур – $\sum t > 5^{\circ}\text{C}$ – и сумма годовых осадков) в районах заготовок семян согласно паспорту на создание объекта, результаты учётов урожайности шишек в год заготовки и сведения о наличии потомств на объектах ГК II поколения.

Таблица 1

**Географическое происхождение климатипов ели, урожайность шишек
в культурах I поколения и представленность потомства во II поколении**

**Geographical origin of spruce climatypes, cone yield in first generation crops
and representation of offspring in the second generation**

№ пункта по гос. реестру. Район заготовки семян (область, республика, лесхоз)	Географ. координаты (с.ш./в.д.)	Σ $t >$ 5°C	Σ год. осад- ков	Балл урожай- ности*	Год закладки		
					2006	2013	2015
<i>Picea abies</i> (L.) Karst.							
8. Эстония, Вильяндинский	58°24'/25°38'	2170	660	5,0/ 5,0	—	+	—
32А. Новгородск., Поддорский	57°17'/31°07'	2320	650	5,0/ 5,0	+	+	—
7. Псковская, Великолукский	56°23'/30°30'	2320	550	5,0/ 5,0	+	+	+
9. Литва, Таурагский	55°17'/22°19'	2540	700	5,0/ 5,0	+	+	+
32. Калужская, Калужский	54°25'/36°16'	2380	680	5,0/ 5,0	—	+	—
30. Тверская, Нелидовский	56°14'/32°48'	2200	625	5,0/ 4,5	—	+	—
10. Латвия, Даугавпилсский	56°10'/26°30'	2470	600	5,0/ 4,5	—	+	+
11. Витебская, Бешенковичский	55°05'/29°28'	2510	660	5,0/ 4,5	+	+	+
17. Закарпатская, Раховский	48°07'/24°03'	2460	1120	4,9/ 5,0	+	+	+
гибридные формы с преобладанием признаков <i>Picea abies</i> (L.) Karst.							
5. Ленинградская, Госненский	59°30'/30°52'	2120	594	5,0/ 5,0	+	+	+
Карелия	4. Пудожский	61°40'/36°40'	1920	570	5,0/ 5,0	+	+
	3. Пряжинский	61°40'/33°33'	1830	570	4,5/ 4,5	—	—
24. Вологодская, Череповецкий	59°07'/37°57'	2070	580	4,5/ 5,0	+	+	+
27. Костромская, Галичский	59°24'/42°20'	2150	600	3,5/ 4,5	—	+	—
Москов- ская	29А. Загорский	56°19'/38°09'	2120	600	4,9/ 4,7	—	+
	29. Солнечногорский	56°10'/36°58'	2210	600	4,7/ 4,5	+	—
гибридные формы с преобладанием признаков <i>Picea obovata</i> Ledeb.							
Архан- гельская	21. Коношский	60°58'/40°11'	1780	575	1,1/ 3,5	—	+
	21А. Плесецкий	62°45'/40°15'	1660	525	1,3/ 4,0	+	+
	20. Пинежский	64°45'/43°14'	1520	490	0,7/ 2,0	—	+
25. Коми, Корткеросский	61°41'/51°31'	1800	500	0,5/ 1,0	+	—	

Примечание: * балл урожайности в год заготовки шишек: в числителе – зима 2000/2001 гг., в знаменателе – зима 2007/2008 гг.

Изучение географических культур выполнено в соответствии с методикой ВНИИЛМ [Изучение..., 1972]. В 45-летних ГК I поколения, в потомствах 20 климатипов, в каждой из трёх повторностей учтено около 100 деревьев на вариант, всего по варианту – не менее 300, причём выбирали ряды с отсутствием или наименьшим наличием снеголома и вывала. На объектах II поколения выполнен сплошной перечёт. Сохранность (%) по потомству определена как отношение числа живых деревьев к фактическому числу посадочных мест. Диаметр стволов замерен на высоте груди с точностью до 1 см. В Любанском и Гатчинском лесничествах высоту находили по графикам; с этой целью в каждом из вариантов (потомств / провениенций) замерено 20 высот пропорционально числу деревьев по ступеням толщины. В Лисинском УОЛ и Кировском лесничестве сплошной учёт высот выполнен с помощью нивелирной рейки. Уровень изменчивости показателей роста установлен по шкале С.А. Мамаева [1970], класс бонитета – по таблицам проф. М.М. Орлова [1931]. Определена категория состояния деревьев и рассчитан средневзвешенный балл состояния R по потомству [Мозолевская и др., 1984]. Селекционный коэффициент K рассчитан как отношение процента средней высоты потомства от контроля (ленинградский вариант) к проценту отпада в потомстве [Черепнин, 1980]. Рассчитан показатель целесообразности внедрения климатипа g , учитывающий относительную успешность потомств по сохранности, состоянию, диаметру и высоте в долях стандартного отклонения [Мерзленко, Мельник, 1995]. Проведено распределение потомств по рангам. Результаты исследований обработаны с помощью программы Excel 97-2003 и с применением методов статистики [Бондаренко, Жигунов, 2016].

Результаты исследований и обсуждение. Анализ развития ГК I поколения выполнялся на разных возрастных этапах [Марисая и др., 1980; Филиппова, Уварова, 1988; Николаева, Пелевина, 2000; Николаева и др., 2010; Николаева, Варенцова, 2019]. В первые годы после посадки приживаемость в большей степени зависела от микроусловий посадочных мест. К 10 годам наименьший отпад (30–42%) наблюдался в ленинградском, псковском, новгородском, солнечногорском, калужском, латвийском, эстонском потомствах. В годы заготовок шишек эти же потомства имели лучшую по объекту сохранность (в 2000 г. – 55–67%, в 2007 г. – 47–60%).

В возрасте жердняка в вариантах с видовой принадлежностью *Picea abies* и *P. abies* × *P. obovata* начался период ветровала и вывала крупных деревьев [Николаева, Гузюк, 2009], что связано с развитием неглубокой корневой системы и отсутствием рубок ухода. Зимой 2019 г. наблюдался снеголом; в центре большинства блоков согнувшиеся от тяжести ели ломало по середине стволов, в лучшем случае – вершины (рис. 1).



Рис. 1. Снеголом и вывал ели в потомстве калужского (слева, фото – май 2019 г.) и ленинградского (справа, фото – июль 2022 г.) климатипов

Fig. 1. Snowfall and fall of spruce in the progeny of the Kaluga (left, photo – May 2019) and Leningrad (right, photo – July 2022) climatotypes

По данным 2022–2023 гг., высокая сохранность (38–41%) отмечена в потомствах солнечногорского, ленинградского, эстонского, псковского и пряжинского климатипов (табл. 2).

За годы наблюдений прослежена прямая связь сохранности с ростом потомств по высоте ($r = 0,320 \div 0,596$) и диаметру ($r = 0,310 \div 0,380$) и обратная – с факторами географического происхождения (сев. широтой – $r = -0,220 \div -0,569$; вост. долготой – $r = -0,370 \div -0,596$). С удалением материнского климатипа на север и восток сохранность его потомства в районе испытания хуже; однако с возрастом эти связи постепенно ослабевают и доля влияния географических факторов снижается от 32–36 до 5–14%, что объясняется значительным отпадом крупных елей в потомствах *Picea abies* и *P. abies* × *P. obovata*. Так, в латвийском потомстве сохранность за последние 13 лет учёта снизилась от 53 до 23%; в новгородском, псковском, ленинградском – от 59–60 до 36–38,5%.

В первые 10 лет развития ГК I поколения закарпатский климатип про-исхождением из юго-западной части ареала *P. abies* опережал местный ленинградский по диаметру на 78%, по высоте – на 14% и был выделен в качестве кандидата в сортовой. Однако южные потомства для вступления в вегетацию наследственно приспособлены к максимальному накоплению сумм эффективных температур (100°C и более); в условиях ЛО они имеют крайне поздние сроки начала и окончания роста и длительный период роста побегов (68–70 дней), соответственно, более других подвержены поздневесенним и раннеосенним заморозкам [Уварова, 1983; Николаева, Жигунов, 2012]. В 22-летних ГК лидирующее положение занимало псковское потомство, опережавшее высоту местного на 11%; в числе лучших – эстонское и вологодское [Николаева, 2005]. В 32 года высокий запас стволовой древесины (355–385 м³/га) был установлен в псковском, калужском, солнечногорском, эстонском потомствах [Николаева, Гузюк, 2009]; в 45 лет – в ленинградском и пудожском (550–580 м³/га).

Таблица 2

Таксационная характеристика потомства ели в 45-летних географических культурах Любанского лесничества

Taxation characterization of spruce progeny in 45-year provenance trials

№ пункта по гос. реестру. Район заготовки семян	Сохран- ность, %	Параметры роста		Бони- тет*	Балл со- стояния <i>R</i>	
		средний <i>D_{1,3}</i> , см	<i>H_{граф}</i> , м			
<i>Picea abies</i> (L.) Karst.						
8. Эстония, Вильяндинский	39,0	17,2±0,39	19,0	I-Ia (1)	2,35	
32A. Новгородская, Поддорский	36,0	16,3±0,31	18,1	I (2)	2,32	
7. Псковская, Великолукский	38,9	16,9±0,33	19,2	I-Ia (1)	2,26	
9. Литва, Таурагский	31,0	16,2±0,35	17,9	I (2)	2,30	
32. Калужская, Калужский	33,5	18,8±0,34	20,3	Ia (1)	2,18	
30. Тверская, Нелидовский	35,1	17,8±0,41	19,0	I (3)	2,18	
10. Латвия, Даугавпилсский	23,6	17,7±0,38	19,8	Ia (2)	2,36	
11. Витебская, Бешенковичский	28,0	15,9±0,29	18,8	I (1)	2,26	
17. Закарпатская, Раховский	32,8	15,4±0,29	18,4	I (1)	2,43	
гибридные формы с преобладанием признаков <i>Picea abies</i> (L.) Karst.						
5. Ленинградская, Госченский	38,5	18,6±0,34	20,1	Ia (3)	2,01	
Карелия	4. Пудожский	31,8	19,9±0,44	20,5	Ia (4)	2,15
	3. Пряжинский	39,0	16,5±0,36	17,6	I (1)	2,35
24. Вологодская, Череповецкий	29,7	19,8±0,41	20,5	Ia (1)	2,15	
27. Костромская, Галичский	27,0	18,8±0,40	19,7	Ia (4)	2,18	
Москов- ская	29A. Загорский	34,0	17,0±0,34	18,2	I (1)	2,20
	29. Солнечногорский	41,0	17,5±0,31	18,3	I (1)	2,04
гибридные формы с преобладанием признаков <i>Picea obovata</i> Ledeb.						
Архан- гельская	21. Кониошский	30,5	14,1±0,37	15,6	II (4)	2,33
	21A. Плесецкий	30,0	15,4±0,33	16,6	I-II (4)	2,35
	20. Пинежский	24,5	13,8±0,28	14,6	II (5)	2,90
25. Коми, Корткеросский	25,0	12,3±0,22	14,1	II (5)	2,46	

Примечание: *класс бонитета по потомству; в скобках – исходного насаждения, в котором производилась заготовка шишек для создания ГК I поколения

На данном этапе исследований нельзя утверждать, что идёт активный процесс проявления генотипических особенностей; скорее наблюдается комплексное влияние биотических и абиотических факторов на генотип особей. Класс бонитета насаждения в пределах потомств, по сравнению с бонитетом насаждений, в которых заготавливались семена для создания ГК I поколения, или сохранился на прежнем высоком уровне, или стал выше, что является проявлением фенотипа.

Средневзвешенный балл состояния большинства потомств варьирует в узких пределах, от 2,01–2,46, что свидетельствует об их ослабленном состоянии; пинежское потомство отличается наименьшей приспособленностью к изменившимся условиям произрастания. Высокая доля (39–43%) здоровых елей наблюдалась в местном ленинградском, витебском и московских потомствах.

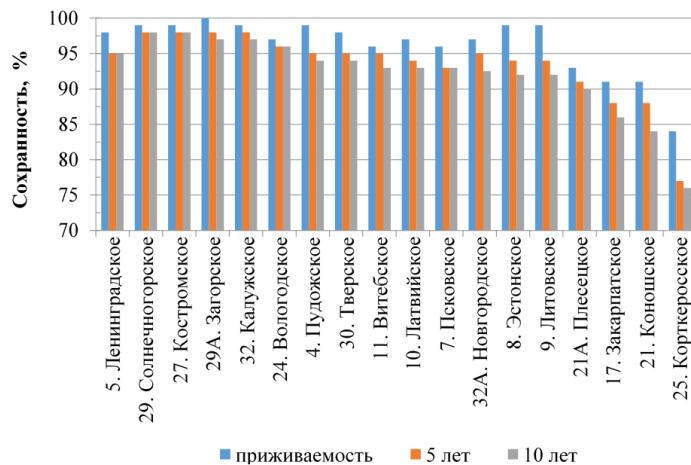
В ГК II поколения, по сравнению с I поколением, сохранность и рост потомств в соответствующих возрастных категориях всегда выше. Расхождения между показателями сохранности на объектах 2006, 2013, 2015 гг. посадки в значительной мере зависят от условий произрастания.

В Лисинском УОЛ в 10-летних культурах (биологический возраст – 15 лет) наблюдалась сплошная сомкнутость крон в ряду; в большинстве потомств сохранность достигала 90÷98%; в потомствах, исходные климатипы которых наиболее удалены от места испытания (закарпатское, корткеросское, коношское) она сократилась до уровня 76–86% (рис. 2а). В 18-летних культурах (биологический возраст – 22 года) Гатчинского лесничества сохранность составляла 69 (литовское) ÷ 78% (новгородское) (рис. 2б); причём в материнских ГК в таком же возрасте новгородский вариант также отличался самой высокой сохранностью. В культурах 4-летнего возраста (биологический возраст – 10 лет) в Кировском лесничестве сохранность большинства вариантов превышала 65%, исключение составили плецецкое и пряжинское потомства (рис. 2с).

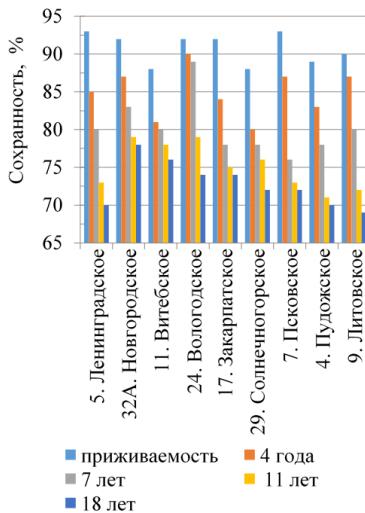
На разных возрастных этапах прослежены слабые или умеренные прямые связи между сохранностью потомств двух поколений ($r = 0,199 \div 0,332$). И в I, и во II поколении чем выше сохранность, тем лучше рост ($r = 0,274 \div 0,502$) (исключение – ГК Гатчинского лесничества).

Анализ роста показал, что лидирующее положение закарпатского потомства в первые годы его развития в I поколении ГК не только не сохранилось в последующие годы, но и не передалось потомству. На всех трёх объектах II поколения лучше местного ленинградского представлено потомство из Псковской обл. (табл. 3).

а)



б)



в)

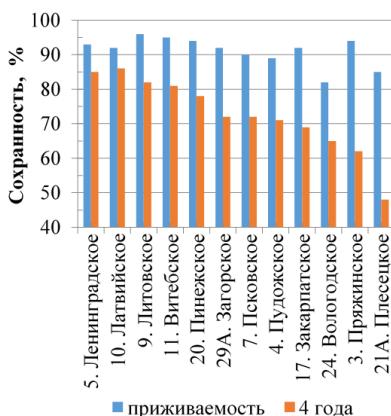


Рис. 2. Сохранность потомства ели в географических культурах II поколения:
а) Лисинское УОЛ; б) Гатчинское лесничество; в) Кировское лесничество

Fig. 2. Survival of spruce progeny in second-generation provenance trials:
a) Lisinskoe UOL; b) Gatchina forestry; c) Kirov forestry

Таблица 3

Рост и состояние потомств во II поколении географических культур
Growth and condition of offspring in the second generation of geographical crops

№ пункта по гос. реестру	Лесничество, год закладки ГК II поколения								
	Гатчинское, 2006			Лисинское УОЛ, 2013		Кировское, 2015			
	ср. диам., $D_{1,3}$, см	$H_{раф.}$, м	балл, R	ср. диаметр, $D_{1,3}$, см	ср. высота, H , м	ср. высота H , см	балл, R		
<i>Picea abies</i> (L.) Karst.									
8	—		$3,55 \pm 0,08$	$4,1 \pm 0,08$	—				
32A	$6,6 \pm 0,27$	7,8	1,82	$3,22 \pm 0,09$	$3,5 \pm 0,08$	—			
7	$8,8 \pm 0,16$	9,7	1,44	$4,12 \pm 0,10$	$4,3 \pm 0,08$	$68,9 \pm 1,95$	1,98		
9	$7,7 \pm 0,19$	8,6	1,50	$3,96 \pm 0,11$	$3,9 \pm 0,09$	$65,7 \pm 1,26$	2,10		
32	—		$3,91 \pm 0,08$	$4,2 \pm 0,07$	—				
30	—		$4,34 \pm 0,10$	$4,6 \pm 0,09$	—				
10	—		$3,08 \pm 0,09$	$3,7 \pm 0,10$	$68,0 \pm 1,57$	1,98			
11	$7,2 \pm 0,28$	8,5	1,74	$4,48 \pm 0,08$	$4,9 \pm 0,07$	$59,6 \pm 1,44$	2,54		
17	$7,0 \pm 0,25$	8,3	1,56	$3,53 \pm 0,08$	$4,0 \pm 0,08$	$57,7 \pm 1,63$	2,76		
гибридные формы с преобладанием признаков <i>Picea abies</i> (L.) Karst.									
5	$8,0 \pm 0,25$	9,2	1,72	$3,52 \pm 0,09$	$4,1 \pm 0,08$	$65,1 \pm 1,31$	1,85		
4	$8,6 \pm 0,23$	9,0	1,51	$2,90 \pm 0,09$	$3,4 \pm 0,09$	$63,2 \pm 1,80$	2,09		
3	—		—			$61,7 \pm 1,81$	1,94		
24	$6,8 \pm 0,30$	7,9	1,57	$3,36 \pm 0,08$	$3,7 \pm 0,06$	$72,1 \pm 2,54$	1,90		
27	—		$3,25 \pm 0,07$	$3,6 \pm 0,06$	—				
29A	—		$3,40 \pm 0,07$	$3,7 \pm 0,06$	$78,8 \pm 2,59$	1,76			
29	$7,7 \pm 0,31$	8,8	1,61	$3,57 \pm 0,10$	$3,8 \pm 0,09$	—			
гибридные формы с преобладанием признаков <i>Picea obovata</i> Ledeb.									
21	—		$2,26 \pm 0,11$	$2,8 \pm 0,11$	—				
21A	—		$2,97 \pm 0,10$	$3,3 \pm 0,09$	$56,7 \pm 1,70$	2,02			
20	—		—			$65,1 \pm 2,23$	1,91		
25	—		$2,57 \pm 0,08$	$3,0 \pm 0,07$	—				

В ГК II поколения в Гатчинском лесничестве псковское потомство является лидером по росту; при уровне значимости 0,01 оно достоверно превышает местный вариант по диаметру (критерий Стьюдента $t_{St.} = 2,695$) и является самым высокорослым на объекте. Темп роста пудожского варианта мало отличается от местного ленинградского.

В ГК II поколения в Лисинском УОЛ (рис. 3) тверское, витебское, ли-

товское, калужское, псковское потомства достоверно превосходят рост местного по диаметру ($t_{St} = 3,096 \div 7,972$) и не уступают ему по высоте (за исключением литовского). В сравнении с местным достоверно лучшими по высоте признаны тверское и витебское потомства ($t_{St} = 4,152 \div 7,016$). Можно отметить прямую связь между показателями роста 9-летних ГК I поколения и 10-летними ГК II поколения (по диаметру: $r = 0,627$, $t_r = 3,22$, достоверно при $p = 0,01$; высоте: $r = 0,748$, $t_r = 4,51$, достоверно при $p = 0,001$), что показывает высокий уровень наследуемости признаков роста. При этом по росту ель в материнских культурах [Филиппова, Уварова, 1988] в соответствующих возрастных категориях заметно уступает дочерним: в 9-летних ГК I поколения средние высоты лучших потомств (ленинградского, псковского, витебского, закарпатского) составляли $1,35 \div 1,40$ м, а во II поколении – $4,00 \div 4,86$ м, средние высоты худших (коношского и корткеросского) – соответственно, $0,90 \div 1,01$ м и $2,8 \div 3,0$ м.



Рис. 3. Потомства *Picea abies* витебского климатипа (осветление выполнено студентами СПбГЛТУ) (слева) и латвийского климатипа (справа), май 2023 г.

Fig. 3. Offspring of *Picea abies* of the Vitebsk climatotype (lightening was carried out by students of St. Petersburg State Forest Technical University) (left) and the Latvian climatotype (right), May 2023

В самых молодых ГК II поколения (Кировское лесничество) лучше местного варианта растут московско-загорское и вологодское потомства ($t_{St} = 2,449 \div 4,720$); отдельные особи в этих вариантах достигали 160 см. Псковское, латвийское, литовское, пинежское и оба карельские потомства исследований растут не хуже местного ленинградского.

Учёт лесопатологического состояния ели на объектах II поколения показал, что в Лисинском УОЛ культуры представлены преимущественно здоровыми особями; в латвийском потомстве наблюдалось первое цветение

и семеношение. В ГК Гатчинского лесничества средневзвешенный балл состояния потомств мало изменчив ($1,44 \div 1,82$); признаками ослабления являются некрозно-раковые поражения (1,0–8,3%; максимально – в местном климатипе), выражающиеся засмолёными наростами, вздутием коры, смолотечением, и пороки, такие как двуствольность, двувершинность, искривление, пасынок (5–15%). В Кировском лесничестве негативные условия произрастания оказывают большее влияние на развитие ели, чем факторы географического происхождения. Культуры застают орляком (*Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn), угнетены порослью осины и берёзы, местами страдают от переувлажнения; негативное состояние ели представлено искривлением и наклоном стволиков, обмерзанием побегов, усыханием или отсутствием вершин и нижних ветвей; в пудожском и псковском потомствах встречался опёнок летний (*Kuehneromyces mutabilis* (Schaeff.) Singer & A.H. Sm.), в пинежском и плесецком – еловая малая ложнощитовка (*Physokermes piceae* (Schrank)), в латвийском и вологодском – еловый хермес (*Adelges* sp. Vallot); средневзвешенный балл состояния потомств – $1,76 \div 2,76$, что свидетельствует о снижении устойчивости ели уже в 4-летнем возрасте; максимальная доля здоровых елей (45%) – в московско-загорском потомстве.

Прослежена географическая изменчивость показателей сохранности и роста потомств в I и II поколениях ГК (табл. 4).

Корреляционные связи между двумя поколениями ГК наиболее чётко прослеживаются при сравнении с объектом Лисинского УОЛ. Как в ГК Любанского лесничества (I поколение), так и в Лисинском УОЛ (II поколение) выявлена обратная зависимость сохранности, высоты и диаметра потомств от географических широты и долготы районов местонахождения родительских климатипов (расположенных в районах заготовок семян для создания ГК I поколения) и прямая – от факторов климата в районах местонахождения родительских климатипов, что указывает на лучшую сохранность и рост потомств, «родители» которых удалены к югу и западу и имеют большую обеспеченность влагой и тем более теплом. При сравнении с 10-летними ГК I поколения [Филиппова и др., 1988] во II поколении доля влияния факторов географического происхождения на рост потомств по высоте возросла незначительно: с 24–33% в I поколении (коэффициент детерминации $d_{xy} = 0,237\text{--}0,327$) до 31–35% во II поколении ($d_{xy} = 0,350\text{--}0,345$); по диаметру же отмечено ослабление этого влияния с 48–50% ($d_{xy} = 0,483\text{--}0,500$) до уровня 31–35% ($d_{xy} = 0,309\text{--}0,347$), что можно объяснить воздействием спонтанного переопыления в ГК I поколения, а также более высокой сохранностью при высокой сомкнутости крон в ряду.

Таблица 4

Корреляционные зависимости между факторами влияния и показателями сохранности и роста потомств в I и II поколениях

Correlation dependencies between influencing factors and indicators of survival and growth of offspring in the first and second generations

Фактор влияния	I поколение ГК			II поколение ГК							
	Любанское л-во			Гатчинское л-во			Лисинское УОЛ			Кировское л.	
	сохр.	D	H	сохр.	D	H	сохр.	D	H	сохр.	H
сев. шир.	-0,220	-0,204	-0,447	-0,276	0,392	0,207	-0,185	-0,589	-0,592	-0,283	0,005
вост. долг.	-0,370	-0,290	-0,505	0,068	0,130	0,00	-0,276	-0,556	-0,587	-0,485	0,191
Σ $t > 5^{\circ}\text{C}$	0,186	0,364	0,606	0,276	-0,337	-0,164	0,373	0,712	0,703	0,542	0,094
Σ год. осадк.	0,147	0,031	0,245	0,197	-0,440	-0,334	0,080	0,267	0,302	0,066	-0,329
бонитет насажд.	-0,552	-0,379	-0,540	-0,476	0,432	0,241	-0,487	-0,524	-0,522	-0,052	-0,290
балл урож.*	0,532 0,552	0,714 0,762	0,844 0,855	-0,116 —	0,373 —	0,409 —	— 0,784	— 0,525	— 0,526	— 0,028	— 0,137

Примечание: *урожайность в ГК I поколения: зима 2000 / 2001 гг. – в числителе; зима 2007 / 2008 гг. – в знаменателе. Наличие достоверности коэффициента корреляции по t -критерию Стьюдента при уровне значимости $p = 0,05$ выделено курсивом; $p = 0,01$ – жирным курсивом; $p = 0,001$ – жирным шрифтом

Нужно отметить, что в ГК II поколения в Гатчинском лесничестве потомства происхождением из районов с меньшим количеством тепла и осадков растут лучше; крайне южные потомства (литовское, витебское, западноподольское) с большим количеством накопленного тепла и влаги, чем в ЛО, уступают по росту местному варианту. Оценка роста культур в Кировском лесничестве на ранних этапах развития мало показательна, хотя связи географических и климатических факторов с сохранностью потомств по преимуществу соответствуют данным, полученным на других объектах.

Большое значение для развития культур имеет бонитет материнского насаждения: заготовка шишек в насаждениях с высоким классом бонитета способствует лучшей сохранности и более успешному темпу роста потомств. Урожайность шишек ели в I поколении более чем наполовину (на 51–73%; $d_{xy} = 0,510$ –0,731) зависит от успешности развития материнских деревьев и положительно влияет на сохранность и рост ГК II поколения.

Расчет селекционного коэффициента и показателя целесообразности внедрения климатипа по ГК двух поколений позволил выделить лучшие из них, которые оцениваются более высоким рангом (табл. 5).

Таблица 5

Селекционная оценка и ранговое распределение потомств

Selection evaluation and ranking of offspring

№ пункта по гос. реестру	Лесничество, год закладки ГК II поколения													
	I поколение ГК			Гатчинское, 2006			Лисинское УОЛ, 2013			Кировское, 2015				
	<i>K</i>	<i>g</i>	ранг	<i>K</i>	<i>g</i>	ранг	<i>K</i>	<i>g</i>	ранг	<i>K</i>	<i>g</i>	ранг		
<i>Picea abies</i> (L.) Karst.														
8	1,55	+0,57	7	—	—	12,7	+0,24	8	—	—	—	—		
32A	1,41	+0,10	11	3,85	-0,29	6	11,5	-0,31	13	—	—	—		
7	1,57	+0,59	6	3,77	+0,49	1	15,3	+0,61	4	3,78	+0,27	5		
9	1,29	-0,26	13	3,02	-0,71	9	12,1	+0,35	7	5,61	+0,47	4		
32	1,52	+0,76	3	—	—	34,5	+0,80	3	—	—	—	—		
30	1,46	+0,46	8	—	—	19,0	+1,13	2	—	—	—	—		
10	1,29	-0,14	12	—	—	13,0	-0,24	12	7,46	+0,84	2	2		
11	1,30	-0,34	14	3,85	+0,10	5	17,1	+1,30	1	4,82	-0,06	7		
17	1,36	+0,19	10	3,47	-0,33	7	7,0	-0,21	11	2,86	-0,76	9		
гибридные формы с преобладанием признаков <i>Picea abies</i> (L.) Karst.														
5	—	+1,01	1	—	+0,14	4	—	+0,37	6	—	+0,56	3		
4	1,49	+0,87	2	3,26	+0,31	3	13,8	-0,49	14	3,35	-0,23	8		
3	1,44	+0,24	9	—	—	—	—	—	2,49	-0,77	9	9		
24	1,45	+0,73	4	3,30	-0,60	8	22,5	+0,24	9	3,16	+0,20	6		
27	1,34	+0,25	9	—	—	44,8	+0,13	10	—	—	—	—		
29A	1,37	+0,12	11	—	—	30,7	+0,22	9	4,32	+1,06	1	1		
29	1,54	+0,66	5	3,41	+0,42	2	46,9	+0,42	5	—	—	—		
гибридные формы с преобладанием признаков <i>Picea obovata</i> Ledeb.														
21	1,12	-1,07	16	—	4,3	-1,83	16	—	8,2	-0,72	15	1,67	-1,81	10
21A	1,18	-0,70	15		—	—	—	—						
20	0,96	-1,68	17		—	—	—	—	4,55	+0,24	5	5	5	5
25	0,94	-1,99	18		3,1	-2,00	17	—	—	—	—	—	—	—

Примечание: *K* – селекционный коэффициент; *g* – показатель целесообразности внедрения климатипа; ранг – средний ранг, учитывающий ранговое положение потомств по «*K*», «*g*» и параметрам роста потомств

Расчёт ранговой корреляции r Спирмена показал наличие прямой умеренной связи ($r_s = 0,383 \div 0,536$) между ранговыми положениями потомств двух поколений (45-летними ГК Любанского лесничества и 10–18-летними ГК Гатчинского лесничества и Лисинского УОЛ; связь с 4-летними ГК Кировского лесничества слабая).

В ГК I поколения ленинградский климатип в первые 10 лет имел 4 ранг, в 20–30-летних культурах – 2–3 ранги [Николаева, 2005; Николаева, Гузюк, 2009], в 45-летнем возрасте, учитывая состояние, сохранность, параметры роста, селекционную оценку, он является самым успешным. Во II поколении потомство ленинградского климатипа, в зависимости от объекта и возраста культур (4 \div 18 лет), занимает 3 \div 6 ранги. По комплексу полученных данных на объектах ГК двух поколений высокую значимость, наряду с местным ленинградским климатипом, имеют потомства происхождением из Великолукского лесхоза Псковской обл., Солнечногорского лесхоза Московской обл. и Калужского лесхоза Калужской обл.

Заключение. Сравнительная оценка развития и роста ГК в двух поколениях, причем II поколение испытывается в различных условиях произрастания, позволяет проследить клинальную географическую изменчивость вида, уточнить перспективность использования инорайонных семян. В Ленинградской обл. отмечается успешное развитие потомств ели европейской (*Picea abies* (L.) Karst.) и гибридных форм с преобладанием признаков ели европейской. В то же время, крайне южное потомство *P. abies*, закарпатское, выделенное в ГК I поколения в раннем возрасте в качестве кандидата в сортовой, во II поколении в первые же годы своего развития в культурах характеризуется слабой селекционной оценкой.

Обратная зависимость роста дочерних потомств от класса бонитета материнских насаждений и прямая – от урожайности шишек в материнских насаждениях указывает на целесообразность заготовок шишек в высокобонитетных и высокоурожайных насаждениях.

В сравнении с исходными материнскими насаждениями климатипов, расположенныхными в различных регионах России, в ГК Любанского лесничества (I поколение) наблюдается соответствие или улучшение их класса бонитета по сравнению с исходным насаждением, что определяется произрастанием потомств в более благоприятных условиях. В сравнении с соответствующими возрастными этапами развития потомств в I поколении II поколение ГК имеет более высокие показатели сохранности и роста, что, вероятно, является проявлением эффекта гетерозиса.

В культурах 45-летнего возраста лидирующую позицию по продуктивности и состоянию занимает местное ленинградское потомство, второй ранг – в потомстве из Пудожского лесхоза Республики Карелия.

На объектах Любанского лесничества (I поколение) и Лисинского УОЛ (II поколение) южные и западные потомства с большей тепло- и влагообеспеченностью в районах исходных происхождений растут успешнее, чем северные и восточные, с меньшим количеством тепла и осадков, при чём сумма эффективных температур имеет большее значение, чем сумма годовых осадков.

Основой отбора лучших климатипов должны быть результаты много летних исследований в ГК I поколения, но с ориентацией на II поколение. В связи с негативными факторами, имеющими место при создании опытных культур и возникающими в процессе их роста, такими как завышенная густота посадки, нарушение гидрологического режима почв, отсутствие рубок ухода, вывал, ветровал, снеголом и т. п., культуры начинают терять свою устойчивость, и проявление географической изменчивости становится менее выраженным. Поэтому ГК II поколения, в т.ч. представленные полусибсовыми потомствами, являются большим подспорьем, позволяющим продолжать исследования, в т.ч. с учётом происходящих изменений климата и на генетическом уровне.

Наряду с использованием семян местных популяций перспективными поставщиками семян ели в Ленинградский лесосеменной подрайон следует признать Псковскую, Тверскую, Московскую (с, с-з), Калужскую (ц, с), Витебскую (с, с-в) области и южную часть Республики Карелия, с ограничением координатами ориентировочно $54^{\circ}20' \div 61^{\circ}40'$ с.ш. и $27^{\circ} \div 39^{\circ}$ в.д.; высоты над уровнем моря в районах заготовки и использования семян не должны сильно различаться. Целесообразность поставок семян из республик Прибалтики на данном этапе исследований опровергается.

Сведения о финансировании исследования. Исследование выполнено за счёт средств Российского научного фонда (проект № 25-16-00109 (код проекта: 1-RSCF-6113)).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Багаев С.С. Исследование географической изменчивости ели в Костромской области // Лесохозяйственная информация. 2014. № 4. С. 40–53.

Бондаренко А.С., Жигунов А.В. Статистическая обработка материалов лесоводственных исследований: учеб. пособ. СПб.: Политех. ун-т, 2016. 125 с.

Изучение имеющихся и создание новых географических культур: программа и методика работ. Пушкино: ВНИИЛМ, 1972. 52 с.

Лацевич А.В. Изучение макроскопических признаков и плотности древесины второго поколения климаэкотипов сосны обыкновенной // Леса Евразии – Белые ночи: мат. III Межд. конф. молодых ученых. М., 2003. С. 105–107.

Лесосеменное районирование основных лесообразующих пород в СССР. М., 1982. 368 с.

Мамаев С.А. Закономерности внутривидовой изменчивости семейства Pinaceae на Урале: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Свердловск: Ин-т экологии растений и животных УФ АН СССР, 1970. 54 с.

Манцевич Е.Д. Особенности роста второго поколения географических культур сосны обыкновенной // Лесоведение и лесное хозяйство. 1971. Вып. 4. С. 83–87.

Марисая Г.К., Уварова Н.И., Филиппова Л.Н. Результаты географического испытания сосны, ели, лиственницы на Северо-Западе РСФСР // Селекция, генетика и семеноводство древесных пород как основа создания высокопродуктивных лесов: тез. докл. и сообщ. на Всесоюз. науч.-техн. совещ. М., 1980. Ч. I. С. 246–249.

Матвеева Р.Н., Буторова О.Ф., Щерба Ю.Е., Комарницкий В.В., Иванов В.С., Гришилов Д.А. Влияние географического происхождения на рост сосны кедровой сибирской во втором поколении // Хвойные бореальной зоны. 2019. Т. 37, № 6. С. 426–431.

Мерзленко М.Д., Мельник П.Г. Итог тридцати вегетаций в географических культурах ели Сергиево-Посадского опытного лесхоза // Науч. труды МГУЛ. 1995. Вып. 274. С. 64–77.

1. Мозолевская Е.Г., Катаев О.А., Соколова Э.С. Методы лесопатологического обследования очагов стволовых вредителей и болезней леса. М.: Лесная промышленность, 1984. 152 с.

Морозова Е.В., Иозус А.П. Особенности процессов адаптации географических культур сосны второго поколения в условиях сухой степи Нижнего Поволжья // Фундаментальные исследования. 2015. № 7 (часть 2). С. 260–262.

Наквасина Е.Н. Испытание межгеографических потомств сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в Республике Коми // ИВУЗ. Лесной журнал. 2014. № 5. С. 17–24.

Наквасина Е.Н., Барабин А.И. Рост полусибовых межгеографических гибридов сосны обыкновенной в испытательных культурах северной подзоны тайги Архангельской области // ИВУЗ. Лесной журнал. 2009. № 5. С. 25–30.

Николаева М.А. Рост и репродуктивные особенности ели в географических культурах Ленинградской области: дис. ... канд. с.-х. наук. СПб.: СПбНИИЛХ, 2005. 176 с.

Николаева М.А., Пелевина Н.Н. Сравнительная оценка климатиков ели в географических культурах Ленинградской области // Труды СПбНИИЛХ. 2000. Вып. 2 (3). С. 119–128.

Николаева М.А., Гузюк М.Е. Состояние, продуктивность и особенности семеношения ели в географических культурах Ленинградской области // Труды СПБНИИЛХ. 2009. Вып. 1 (18). С. 105–122.

Николаева М.А., Ямалеев О.А., Ануфриева Е.С. Особенности адаптации хвойных пород в географических культурах Северо-Западного лесосеменного района // Лесные вести. 2010. № 3 (4). С. 97–105.

Николаева М.А., Жигунов А.В. Фенологические и репродуктивные особенности ели в географических культурах Ленинградской области // Лесоведение. 2012. № 2. С. 35–46.

Николаева М.А., Варенцова Е.Ю. Фитопатологическое состояние и сохранность ели в географических культурах Любанского лесничества Ленинградской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2019. Вып. 228. С. 216–233. DOI: 10.21266/2079-4304.2019.228.216-233.

Николаева М.А., Жигунов А.В., Гузюк М.Е., Гузюк А.С. Испытание климатипов основных лесообразующих пород – основа лесосеменного районирования в России // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: мат. IV науч-тех. конф. СПб., 2019. С. 148–151.

Орлов М.М. Лесная вспомогательная книжка для таксации и технических расчётов. 8-е перераб. изд. М.-Л.: Гос. изд. с/х и колхозно-кооп. лит., 1931. 736 с.

Паттай И.П. Рост и устойчивость сосны в географических культурах второго поколения в Тростянецком лесхоззаге Сумской области // Лесной журнал. 1974. № 6. С. 155–160.

Поплавская Л.Ф., Ребко С.В., Тупик П.В. Использование эколого-географического метода подбора родительских пар при селекции сосны обыкновенной // Сохранение лесных генетических ресурсов: мат. 5-й Межд. конф.-совещ. Гомель, 2017. С. 189–191.

Раевский Б.В., Игнатенко Р.В., Новичонок Е.В., Прокопюк В.М., Куклина К.К. Современное состояние селекции и семеноводства хвойных пород // ИВУЗ. Лесной журнал. 2022. № 6. С. 9–37. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-6-9-37.

Санников С.Н., Петрова И.В., Санникова Н.С., Афонин А.Н., Чернодубов А.И., Егоров Е.В. Генетико-климатолого-географические принципы семенного районирования сосновых лесов России // Сибирский лесной журнал. 2017. № 2. С. 20–30.

Тарханов С.Н. Изменчивость ели в географических культурах Республики Коми. Екатеринбург: УрО РАН, 1998. 195 с.

Уварова Н.И. Использование географической изменчивости хвойных на Северо-Западе РСФСР: методические указания. Л.: ЛенНИИЛХ, 1983. 22 с.

Филиппова Л.Н., Уварова Н.И. Результаты испытания сосны и ели разного географического происхождения на Северо-Западе РСФСР // Развитие генетики и селекции в лесохозяйственном производстве. М., 1988. С. 60–61.

Черепнин В.Л. Изменчивость семян сосны обыкновенной. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1980. 183 с.

Шутяев А.М. Изменчивость хвойных видов в испытательных культурах Центрального Черноземья. М.: МПР РФ, НИИЛГиС, 2007. 296 с.

Шутяев А.М. Каким быть лесному семеноводству в XXI веке (книга-обзор). Воронеж: Истоки, 2011. 248 с.

Giertych M. Summary results of the IUFRO 1938 Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) provenance experiment. Height growth // *Silvae Genetica*. 1976. Vol. 25 (5-6). P. 154–164.

Norway spruce in the Conservation of Forest Ecosystems in Europe. The results of the IUFRO experimental tests series: 1938/39, 1964/68, 1972 and others: proceeding of conf. Kraków – Wisła, Beskid Montains, 2012. 110 p.

Park Y.S., Gerhold H.D. Population hybridization in Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.): I. Genetic variance components and heterosis // *Silvae Genetica*. 1986. Vol. 35 (4). P. 159–165.

References

Bagaev S.S. The study of geographical variabiliy of spruce provenance trials in Kostroma region. *Forestry information*, 2014, no. 4, pp. 40–53. (In Russ.)

Bondarenko A.S., Zhigunov A.V. Statistical processing of forestry research materials: manual. St. Petersburg: Polytech. University, 2016. 125 p. (In Russ.)

Filippova L.N., Uvarova N.I. Results of testing pine and spruce of different geographical origins in the North-West of the RSFSR. *Development of genetics and selection in forestry production*. M., 1988, pp. 60–61. (In Russ.)

Forest seed zoning of the main forest-forming species in the USSR. Moscow: Lesnaya promyshlennost, 1982. 368 p. (In Russ.)

Giertych M. Summary results of the IUFRO 1938 Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) provenance experiment. Height growth. *Silvae Genetica*, 1976, vol. 25 (5-6), pp. 154–164.

Latsevich A.V. Study of macroscopic features and wood density of the second generation of Scots pine climaecotypes. *Forests of Eurasia – White Nights*: proceedings of the III Int. conf. of young scientists. Moscow, 2003, pp. 105–107. (In Russ.)

Mamaev S.A. Patterns of intraspecific variability of the family Pinaceae in the Urals: Diss. ... Doct. Biol. Sci. Sverdlovsk: Institute of Ecology of Plants and Animals UF AN SSSR, 1970. 54 p. (In Russ.)

Marisaya G.K., Uvarova N.I., Filippova L.N. Results of geographical testing of pine, spruce, larch in the North-West of the RSFSR. *Selection, genetics and seed production of tree species as a basis for creating highly productive forests*: abstracts of reports and communications at the All-Union sci.-tech. conf. Moscow, 1980, part I, pp. 246–249. (In Russ.)

Matveeva R.N., Butorova O.F., Shcherba Yu.E., Komarnitskiy V.V., Ivanov V.S., Grishilov D.A. Influence of geographical origin on the growth of second-generation

siberian stone pine. *Conifers of the boreal area zone*, 2019, vol. 37, no. 6, pp. 426–431. (In Russ.)

Merzlenko M.D., Mel'nik P.G. The result of thirty vegetations in provenance trials of the spruce of the Sergiev Posad experimental forestry. *Scientific works of Moscow State Forestry University*, 1995, vol. 274, pp. 64–77. (In Russ.)

Morozova E.V., Iozus A.P. Features of adaptation processes of Scots pine provenance trials of second-generation in the dry steppe conditions of the Lower Volga region. *Fundamental research*, 2015, no. 7 (part 2), pp. 260–262. (In Russ.)

Mozolevskaya E.G., Kataev O.A., Sokolova Eh.S. Methods of forest pathological survey of locus of stem pests and forest diseases. Moscow: Forest Industrial, 1984. 152 p. (In Russ.)

Nakvasina E.N. Testing intergeographical progenies of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Komi Republic. *IVUZ. Forestry Journal*, 2014, no. 5, pp. 17–24. (In Russ.)

Nakvasina E.N., Barabin A.I. Growth of half-sib intergeographical hybrids of Scots pine in test crops of the northern taiga subzone of the Arkhangelsk region. *IVUZ. Forestry Journal*, 2009, no. 5, pp. 25–30. (In Russ.)

Nikolaeva M.A. The growth and reproductive features of spruce in provenance trials of the Leningrad region: Diss. ... Cand. Agric. Sci. St. Petersburg: St. Petersburg forestry research institute, 2005. 176 p. (In Russ.)

Nikolaeva M.A., Pelevina N.N. Comparative assessment of spruce climatypes in provenance trials of the Leningrad region. *St. Petersburg forestry research institute proceedings*, 2000, vol. 2 (3), pp. 119–128. (In Russ.)

Nikolaeva M.A., Guzyuk M.Ye. Health, productivity and seed-bearing characteristics of spruce in provenance trials of the Leningrad region. *St. Petersburg forestry research institute proceedings*, 2009, vol. 1 (18), pp. 105–122. (In Russ.)

Nikolaeva M.A., Yamaleev O.A., Anufrieva E.S. Features of adaptation of coniferous species in provenance trials of the North-West forest seed region. *Forest news*, 2010, no. 3 (4), pp. 97–105. (In Russ.)

Nikolaeva M.A., Zhigunov A.B. Phenological and reproductive features of spruce in geographical plantations of the Leningrad region. *Lesovedenie*, 2012, no. 2, pp. 35–46. (In Russ.)

Nikolaeva M.A., Varentsova E.Yu. Phytopatological status and preservation of spruce in provenance trials of the Lyubansky Forest District of Leningrad Region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2019, iss. 228, pp. 216–233. (In Russ.) DOI: 10.21266/2079-4304.2019.228.216-233.

Nikolaeva M.A., Zhigunov A.B., Guzyuk M.Ye., Guzyuk A.S. Testing of climatypes of the main forest-forming species as a basis for forest seed zoning in Russia. *Forests of Russia: policy, industry, science, education: proceedings of IV sci.-tech. conf. St. Petersburg*, 2019, pp. 148–151. (In Russ.)

Norway spruce in the Conservation of Forest Ecosystems in Europe. The results of the IUFRO experimental tests series: 1938/39, 1964/68, 1972 and others: proceeding of conf. Kraków – Wisła, Beskid Mountains, 2012. 110 p.

Orlov M.M. Forest auxiliary book for taxation and technical calculation. 8th revision ed. Moscow-Leningrad: Gos. izd. sel./khoz. i kolhozno-koop. lit., 1931. 736 p. (In Russ.)

Park Y.S., Gerhold H.D. Population hybridization in Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.): I. Genetic variance components and heterosis. *Silvae Genetica*, 1986, vol. 35 (4), pp. 159–165.

Patlay I.P. The growth and sustainability of Scots pine in second-generation provenance trials in Trostyanets forestry plantation of Sumy region. *Lesnoy zhurnal*, 1974, no. 6, pp. 155–160. (In Russ.)

Poplavskaya L.F., Rebko S.V., Tupik P.V. The use of ecological-geographical method of selection of parental pairs in breeding of scots pine. *Conservation of Forest Genetic Resources: proceedings of the 5th Int. conf.* Gomel, 2017, pp. 189–191. (In Russ.)

Raevsky B.V., Ignatenko R.V., Novichonok E.V., Prokopiuk V.M., Kuklina K.K. The current state of coniferous species breeding and seed production. *IVUZ. Forestry Journal*, 2022, no. 6, pp. 9–37. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-6-9-37. (In Russ.)

Shutyayev A.M. The variability of coniferous species in the test plantations of the Central Black Earth Region. Moscow, 2007. 296 p. (In Russ.)

Shutyayev A.M. What is forest seed production in the XXI century (book-survey). Voronezh: Istoki, 2011. 248 p. (In Russ.)

The study of available and creation of new provenance trials: program and methods of work. Pushkino: VNIILM, 1972. 52 p. (In Russ.)

Tarkhanov S.N. Variability of spruce in provenance trials of Republic Komi. 1998. Ekaterinburg: UrO RAS, 1998. 195 p. (In Russ.)

Uvarova N.I. Using the geographical variability of coniferous in the North-West of the RSFSR: guidelines. Leningrad: LenNIIILH, 1983. 22 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 15.09.2025

Николаева М.А., Гузюк М.Е., Баранов Н.И., Жигунов А.В. Изучение географической изменчивости в двух поколениях культур ели в Ленинградской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 118–141. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.118-141

Исследования двух поколений географических культур ели, заложенных в Ленинградской области, позволяют проследить географическую изменчивость видов *Picea abies* (L.) Karst. и *Picea obovata* Ledeb. Объект культур первого поколения создан в рамках программы ВНИИЛМ в 1977 г. на территории Любанского лесничества, где была произведена заготовка шишек для создания географических культур второго поколения. Второе поколение представлено полусибсовыми потомствами на трёх объектах, которые были заложены в 2006–2015 гг. в Гатчин-

ском и Кировском лесничествах и в Лисинском учебно-опытном лесничестве (УОЛ). В культурах двух поколений установлено успешное развитие потомств *Picea abies* и замедленный темп роста *P. obovata*. Отмечено позитивное влияние состояния материнских климатипов на сохранность и рост потомств: заготовка шишек в насаждениях с высоким классом бонитета способствует более успешному росту потомств как в первом, так и во втором поколении. Южные и западные потомства с большей тепло- и влагообеспеченностью в районах исходных происхождений растут интенсивнее, чем северные и восточные, с меньшим количеством тепла и влаги. Доля влияния материнского генотипа по показателям роста достигает 56%. Выявлена прямая связь между урожайностью шишек в материнских насаждениях и ростом дочерних потомств. В 45-летних культурах самыми высокопродуктивными являются местное ленинградское потомство и потомство из Пудожского лесхоза Республики Карелия (550–580 м³/га). На объектах второго поколения наиболее высокую селекционную значимость имеет потомство климатипа из Великолукского лесхоза Псковской области. Поставки семян ели в Ленинградский лесосеменной подрайон возможны из Псковской, Тверской, Московской (север, северо-запад), Калужской (центр, север), Витебской (север, северо-восток) областей и южной части Республики Карелия, с ограничением координатами ориентировочно 54°20' ÷ 61°40' с.ш. и 27° ÷ 39° в.д.

Ключевые слова: географические культуры, *Picea*, географическое происхождение, потомство климатипа, поколение, сохранность, рост, ранг.

Nikolaeva M.A., Guzyuk M.Ye., Baranov N.I., Zhigunov A.V. Study of geographical variability in two generations of spruce culture in the Leningrad region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 118–141 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.118-141

The study of two generations of spruce provenance trials established in the Leningrad Region allows us to trace the geographical variability of the species *Picea abies* (L.) Karst. and *Picea obovata* Ledeb. The first-generation culture object was created within the framework of the VNILM program in 1977 on the territory of the Lyuban forestry, where cones were harvested to create second-generation provenance trials. The second generation is represented by semi-sib progenies on three objects that were established in 2006–2015 in the Gatchina and Kirov foresteries and in the Lisinsky educational and experimental forestry (UOL). In the cultures of two generations, successful development of the offspring of *Picea abies* and a slow growth rate of *P. obovata* were established. The positive influence of the state of maternal climatypes on the preservation and growth of progenies was noted: the procurement of cones in plantations with a high bonitet class contributes to a more successful growth of progeny in both the first and second generations. Southern and western offspring with greater heat and moisture supply in the areas of original origins grow more intensively than northern and eastern ones, with less heat and moisture. The share of the influence of the maternal genotype in growth indicators reaches

56%. A direct relationship between the cone yield in mother plantations and the growth of daughter progenies was revealed. In 45-year-old crops, the most highly productive are the local Leningrad progeny and the progeny from the Pudozh forestry of the Republic of Karelia (550–580 m³/ha). In the second-generation objects, the highest selection significance is possessed by the climatype progeny from the Velikiye Luki forestry of the Pskov Region. Deliveries of spruce seeds to the Leningrad forest seed sub-district are possible from the Pskov, Tver, Moscow (north, northwest), Kaluga (center, north), Vitebsk (north, northeast) regions and the southern part of the Republic of Karelia, with coordinates limited to approximately 54°20'–61°40' N and 27° – 39°E.

Ключевые слова: происхождение, *Picea*, географическое происхождение, климатический потомство, сохранение, рост, ранг.

НИКОЛАЕВА Марина Алексеевна – заведующий лабораторией кафедры ботаники и дендрологии Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 6445-0694. ORCID: 0000-0002-1777-3937.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия;
старший инженер-исследователь Проектного Центра Агро Технологий Сколковского Института науки и технологий (Сколтех).

121205, Большой бульвар, д. 30, стр. 16, г. Москва, Россия. E-mail: marin.nikol_1060@mail.ru

NIKOLAEVA Marina A. – PhD (Agriculture), Head of the Laboratory of Department of Botany and Dendrology, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 6445-0694. ORCID: 0000-0002-1777-3937.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia;
Senior Research Engineer of Project Center of Agro Technologies of Skolkovo Institute of Science and Technologies (Skoltech).

121205. Bolshoy boul. 30. Build. 1. Moscow. Russia. E-mail: marin.nikol_1060@mail.ru

ГУЗЮК Марианна Евгеньевна – доцент кафедры лесных культур Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 4663-449. ORCID: 0009-0007-7646-3967.

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

GUZYUK Marianna Ye. – PhD (Agriculture), Associate Professor of the Department of Forest Cultures, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 4663-449. ORCID: 0009-0007-7646-3967.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: marguz@list.ru

БАРАНОВ Никита Игоревич – аспирант кафедры лесных культур Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 1653-0090. ORCID: 0009-0005-7030-5007.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: n.star13@yandex.ru

BARANOV Nikita I. – PhD student of the Forest Cultures Department, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 1653-0090. ORCID: 0009-0005-7030-5007.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: n.star13@yandex.ru

ЖИГУНОВ Анатолий Васильевич – профессор, заведующий кафедрой лесных культур Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор сельскохозяйственных наук. WoS ResearcherID: AAK-8124-2020. SPIN-код: 6704-5792. ORCID: 0000-0001-8707-7526.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия;
научный сотрудник Проектного Центра Агро Технологий Сколковского Института науки и технологий (Сколтех).

121205, Большой бульвар, д. 30, стр. 16, г. Москва, Россия. E-mail: a.zhigunov@bk.ru

ZHIGUNOV Anatoliy V. – DSc (Agriculture), Professor, Head of the Department of Forest Cultures, St.Petersburg State Forest Technical University. WoS ResearcherID: AAK-8124-2020. SPIN-code: 6704-5792. ORCID: 0000-0001-8707-7526.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia;
Researcher of Project Center of Agro Technologies of Skolkovo Institute of Science and Technologies (Skoltech).

121205. Bolshoy boul. 30. Build. 1. Moscow. Russia. E-mail: a.zhigunov@bk.ru

А.С. Алексеев, Л.С. Ветров, А.А. Никифоров

**ЛЕСОКЛИМАТИЧЕСКИЙ ПРОЕКТ
«БОРЬБА С ЛЕСНЫМИ ПОЖАРАМИ»: ПРОБЛЕМЫ ОБОСНОВАНИЯ,
УГЛЕРОДНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ, РИСКИ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ
(НА ПРИМЕРЕ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ)**

Введение. Лесные пожары являются одним из наиболее важных негативных явлений, приводящих к полной потере или существенному повреждению лесных экосистем. При этом происходит как снижение их поглотительной способности, так и выбросы парниковых газов за счет сгорания органического вещества компонентов (полов) лесного биогеоценоза, особенно в случаях катастрофических пожаров [Алексеев и др., 2023а, б].

Лесные пожары являются крупной международной проблемой в области охраны природы, так как леса горят по всему земному шару. Например, по данным службы мониторинга атмосферы европейской системы Коперникус, в 2021 г. глобальные выбросы составили 6,45 млрд. тСО₂-экв. Эта величина на 148% больше, чем выбросы от сжигания ископаемого топлива всеми странами Европейского союза в 2020 г., которые составили 2,6 млрд. тСО₂-экв. [Wildfires..., 2024].

В Российской Федерации лесные пожары наряду со сплошными рубками являются основной причиной потери углерода сектором «Землепользование, изменения землепользования и лесное хозяйство» (ЗИЗЛХ). На рис. 1 показаны изменения выбросов парниковых газов в этом секторе за период с 1990 по 2023 гг. [Пыжев, 2023; Национальный доклад..., 2025].

Данные рис. 1 показывают наличие некоторого тренда на повышение в величинах выбросов парниковых газов во времени, однако этот тренд статистически недостоверен ($R^2 = 39,6\%$) и сопровождается взлетами и падениями величин выбросов. Считается, что такой тренд в выбросах парниковых газов вследствие лесных пожаров может быть следствием глобальных изменений климата [Wildfires..., 2024].

Данные о выбросах парниковых газов сильно отличаются у разных исследователей. Например, по данным исследований Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН в результате деструктивных лесных пожаров выбросы углерода в лесах Российской Федерации в период за

2002–2009 гг. оцениваются величиной $218 \pm 68 \cdot 10^6$ тС год $^{-1}$ [Замолодчиков и др., 2013], которая сильно превосходит величины, приведенные на рис. 1. Специалистами по проблематике лесных пожаров отмечается занижение их площадей в официальной статистике [Швиденко, Щепащенко, 2013]. Большие различия в оценках выбросов парниковых газов от лесных пожаров могут быть объяснены различиями в исходных данных: например, площади лесных пожаров сильно различаются по данным дистанционного зондирования Земли и данным официальной статистики. Кроме того, существуют различия в оценках массы органического вещества в пулах лесных экосистем и методиках расчетов выбросов парниковых газов от горения этих пулов вследствие лесных пожаров [Сорокина и др., 2023].

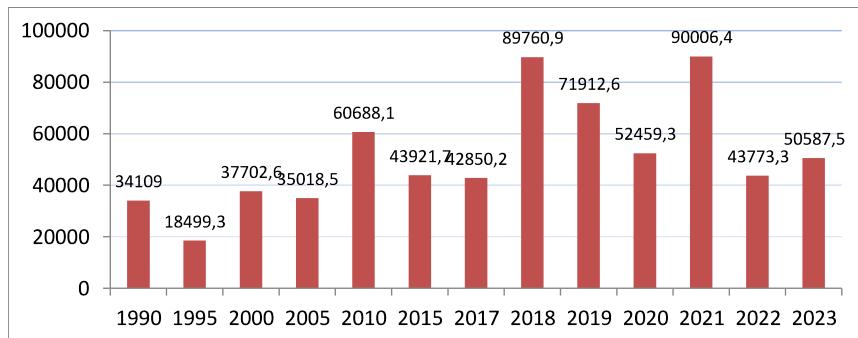


Рис. 1. Выбросы парниковых газов сектором «Землепользование, изменения землепользования и лесное хозяйство» в результате лесных пожаров, тыс. тCO₂-экв.

Fig. 1. Green house gases emissions from the sector «Land use, land use changes and forestry» as a result of forest fires, thousands of tCO₂-eq.

В связи с принятием Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года¹, которая предусматривает в своем целевом (интенсивном) сценарии увеличение поглощения парниковых газов с 535 млн тCO₂-экв. в 2019 г. до 1200 млн тCO₂-экв. к 2050 г., то есть в 2,24 раза, возрос интерес к природным климатическим проектам [Перспективы..., 2023; Птичников и др., 2023; Ветрова и др., 2025]. Борьба с лесными пожарами в связи с

¹ Распоряжение Правительства РФ от 29.10.2021 N 3052-р «Об утверждении стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года».

этим рассматривается как один из основных лесоклиматических проектов, способных содействовать достижению целей упомянутой стратегии [Фоменко и др., 2022; Птичников, Шварц, 2023; Романовская, 2023].

Несмотря на то, что борьба с лесными пожарами является привлекательным лесоклиматическим проектом, он относительно слабо разработан с точки зрения наличия отечественных или международных стандартов/методологий его обоснования. В наиболее распространенной системе стандартов/методологий Verra, которая обслуживает 80% рынка добровольных природных климатических проектов [Куричев и др., 2023], можно указать две методологии, которые применимы для разработки борьбы с лесными пожарами как лесоклиматического проекта – VM0029 и VM0015. Первая имеет узкую направленность и предназначена для применения на территории так называемых лесов Миомбо² – тропического и субтропического биомов лугов, саванн и кустарниковых, расположенных в центральной и южной Тропической Африке. Она была dezактивирована 11 сентября 2023 г. в связи с отсутствием проектов, разработанных по этой методологии в течение 5 лет после последней ревизии. Вторая имеет более универсальный характер и может быть применена для условий нашей страны. Среди известных отечественных подходов можно указать методологию, разработанную Институтом глобального климата и экологии РАН и Росгидромета «Улучшенное управление лесным хозяйством, в том числе охрана лесов от пожаров»³.

Целью настоящей статьи является анализ борьбы с лесными пожарами как лесоклиматического проекта с акцентом на необходимость при его обосновании учитывать риски, неопределенности, наличие обязательных мероприятий по борьбе с лесными пожарами со стороны органов государственного управления субъектами Российской Федерации и органов управления лесным хозяйством. Также будут представлены расчеты углеродной эффективности такого проекта по двум методологиям, отечественной и зарубежной, и сравнение полученных результатов. Концептуальный анализ борьбы с лесными пожарами как природного климатического проекта будет проведен на необходимых материалах и статистических данных Красноярского края.

² Миомбо – слово на языке суахили, обозначающее брахистегию, род деревьев, включающий большое количество видов.

³ Методология реализации климатического проекта № 0011 «Улучшенное управление лесным хозяйством, в том числе охрана лесов от пожаров» Разработчик: Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля. Версия 2.0. 24 августа 2023 г. URL: https://carbonreg.ru/pdf/methodology/accepted/CPM%20%E2%84%960011_rus.pdf (дата обращения: 10.06.2025).

Материалы и методика исследования. По данным государственного лесного реестра, на 01.01.2018 земли лесного фонда Красноярского края составляют 158743,2 тыс. га.

Согласно Лесному плану⁴ земли лесного фонда с точки зрения борьбы с лесными пожарами распределяются следующим образом: зона наземного обнаружения и тушения охватывает 7673,1 тыс. га (4,8%), зона лесоавиационных работ – 151070,11 тыс. га (95,2%). В последней выделяются: зона авиационного обнаружения и тушения – 30106,04 тыс. га –(19,0%) и зона, где используется исключительно космическое обнаружение и преимущественно авиационное тушение – 120964,07 тыс. га (76,2%).

Структура горимости лесов Красноярского края в течение календарного года следующая: в апреле возникает 2,0% от всех лесных пожаров, в мае – 35,0%, в июне – 22,0%, в июле – 26,0%, в августе – 15,0% и в сентябре – 1,0%; в октябре-ноябре возникают единичные случаи пожаров.

Статистические данные о площадях лесных пожаров за период с 2007 по 2022 гг. приведены на рис. 2. Данные получены от Центра лесной пирологии, развития технологий охраны лесных экосистем, защиты и воспроизведения лесов ВНИИЛМ. За анализируемый период пожарами пройдено 3 746 634,6 га.

Как видно из данных рис. 2, во временной динамике площадей лесных пожаров присутствует положительный тренд, т. е. в последние годы площадь лесных пожаров увеличивается, однако такое увеличение не является статистически значимым ($R^2 = 33,6\%$). Тем не менее перед использованием этих данных для обоснования базовой и проектной линий лесоклиматического проекта необходимо проверить временной ряд площадей лесных пожаров на случайность. В противном случае, если изменения площадей будут не случайными, тренд на их увеличение будет необходимо использовать при обосновании базовой и проектных линий в расчетах углеродной эффективности борьбы с лесными пожарами.

Временной ряд данных о площадях пожаров был проверен на случайность происходящих изменений с помощью медианного теста [Севастьянов, 1982]. Критерий случайности временного ряда, основанный на его медиане, проверяется следующим образом:

1. Временной ряд упорядочивается по возрастанию площадей пожаров от минимальной до максимальной: $x_1 > x_2 > \dots > x_N$;

⁴ Лесной план Красноярского края на 2019-2028 гг. (с изменениями и дополнениями). Утвержден губернатором Красноярского края 21.12.2018 г. указом № 332-ут.

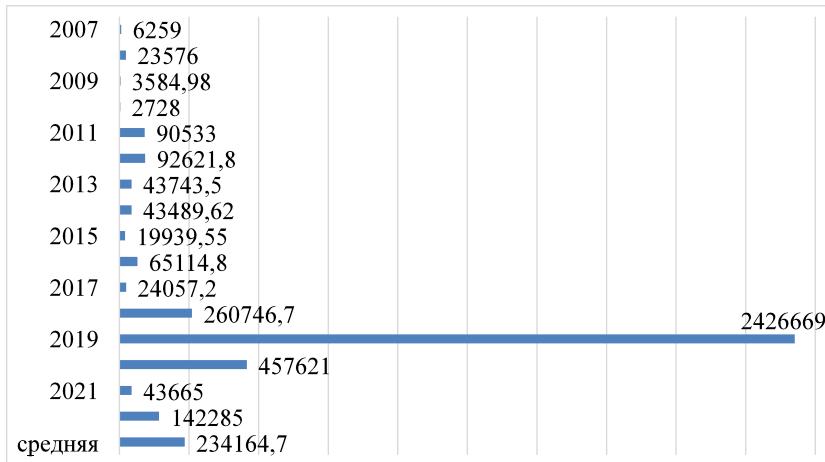


Рис. 2. Площади пожаров (га) в Красноярском крае за 2007–2022 гг.

Fig. 2. Areas of forest fires in the Krasnoyarsk region in 2007–2022

2. Определяется медиана: в случае нечетного числа членов ряда медиана равна:

$$x_{med} = X_{\frac{N+1}{2}}, \quad (1)$$

в случае четного числа:

$$x_{med} = \frac{1}{2}(x_{\frac{N}{2}} + x_{\frac{N}{2}+1}), \quad (2)$$

3. Сравнивая члены исходного ряда с медианой, строится ряд y_t по следующему правилу:

$$y_t = \begin{cases} +, & \text{если } x_t > x_{med}, \\ 0, & \text{если } x_t = x_{med}, \\ -, & \text{если } x_t < x_{med}, \end{cases} \quad (3)$$

Далее в этой последовательности нули не учитываются;

4. Вычисляется статистика для теста (тестовая статистика):

$$Z = \frac{R - \bar{R}}{s_R}, \quad (4)$$

здесь \bar{R} – ожидаемое число положительных n_1 (отрицательных n_2) членов в ряду y_t ; R – фактическое число положительных (отрицательных) членов в

ряду y_i ; S_R – стандартное отклонение числа положительных (отрицательных) членов в ряду y_i :

$$\bar{R} = \frac{2 * n_1 * n_2}{n_1 + n_2} + 1, \quad (5)$$

$$s_R^2 = \frac{2 * n_1 * n_2 (2 * n_1 * n_2 - n_1 - n_2)}{(n_1 + n_2)^2 * (n_1 + n_2 - 1)}. \quad (6)$$

5. Проверка на случайность. Если выполнено следующее неравенство, то ряд случайный:

$$|Z| < Z_{1-\alpha/2}. \quad (7)$$

При уровне значимости 5% и $n_1 > 10$, $n_2 > 10$, $Z_{1-\alpha/2} = 1,96$.

Медианный тест для анализируемого временного ряда проверялся с помощью пакета прикладных программ STATGRAPHICS 18.0. Медианный тест показал, что проанализированный временной ряд площадей пожаров оказался случайным, что необходимо принимать во внимание при обосновании борьбы с лесными пожарами как лесоклиматического проекта в области лесных отношений. Конкретно это означает, что средняя за период не менее 10 лет ежегодная площадь лесных пожаров может быть использована в качестве базовой линии проекта, как это рекомендуется в данном случае отечественной методологией [Коротков, 2022]⁵. В нашем случае временной ряд составляет 16 лет, средняя ежегодная площадь пожаров равна 234 164,7 га/год, ошибка среднего значения – 61,2%. Проектная деятельность должна обеспечивать снижение выбросов парниковых газов ниже этой величины, определяемой указанной площадью лесных пожаров. В условиях, когда анализ осуществляется для территории всего Красноярского края, а не его части, мы будем рассматривать два варианта снижения горимости лесов в результате проектной деятельности – на 30 и 50% ниже средней.

Расчет выбросов парниковых газов при лесных пожарах производился в двух вариантах, в соответствии с методикой МПР⁶, которая учтена в отечественной методологии⁷, и по международной методологии⁸.

⁵ Методология реализации климатического проекта № 0011 «Улучшенное управление лесным хозяйством, в том числе охрана лесов от пожаров» Разработчик: Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля. Версия 2.0. 24 августа 2023 г. URL: https://carbonreg.ru/pdf/methodology/accepted/CPM%20%E2%84%960011_rus.pdf (дата обращения: 10.06.2025)

⁶ Методика количественного определения выбросов парниковых газов и поглощения парниковых газов. Утверждена приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 371 от 27 мая 2022 г.

В соответствии с методикой МПР общие потери углерода для покрытых лесом земель при деструктивных лесных пожарах определяются как сумма потерь по четырем пулам (биомассы, мертвый древесины, подстилки и почвы) по следующей формуле (8):

$$B = S_F \left(\frac{CP_a + CD_a}{S_a} + \left(\frac{CL_a}{S_a} - MCL_{0a} \right) + \left(\frac{CS_a}{S_a} - MCS_{0a} \right) \right), \quad (8)$$

где B – общие потери углерода для покрытых лесом земель при деструктивных лесных пожарах, тонн С; S_F – годичная площадь деструктивных лесных пожаров, га год⁻¹; CP_a – суммарный запас углерода биомассы на покрытых лесом землях, тонн С; CD_a – суммарный запас углерода мертвой древесины на покрытых лесом землях, тонн С; CL_a – суммарный запас углерода подстилки на покрытых лесом землях, тонн С; MCL_{0a} – средний запас углерода подстилки для 0-возрастной группы (временно не покрытые лесом земли), рассчитанный с учетом соотношения площадей преобладающих пород на покрытых лесом землях, тонн С га⁻¹, составляет 4,2; CS_a – суммарный запас углерода почвы на покрытых лесом землях, тонн С; MCS_{0a} – средний запас углерода почвы для 0-возрастной группы (временно не покрытые лесом земли), рассчитанный с учетом соотношения площадей преобладающих пород на покрытых лесом землях, тонн С га⁻¹, составляет 98,9; S_a – суммарная площадь покрытых лесом земель, га.

Выбросы парниковых газов CO₂, CH₄, N₂O от низовых пожаров рассчитываются по формуле (9):

$$L_n = A * M * C_f * G_{ef} * 10^{-3}, \quad (9)$$

где L_n – количество выбросов от пожара, тонн каждого парникового газа; A – площадь, пройденная пожаром, га; M – масса доступного для горения топлива (биомасса, подстилка и мертвая древесина), тонн га⁻¹; C_f – коэффициент сгорания, безразмерный, могут быть использованы значения 0,43

⁷ Методология реализации климатического проекта № 0011 «Улучшенное управление лесным хозяйством, в том числе охрана лесов от пожаров» Разработчик: Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля. Версия 2.0. 24 августа 2023 г. URL: https://carbonreg.ru/pdf/methodology/accepted/CPM%20%E2%84%960011_rus.pdf (дата обращения: 10.06.2025).

⁸ VM0015 Methodology for Avoided Unplanned Deforestation. Approved VCS Methodology. Version 1.1 03 December 2012 Sectoral Scope 14. URL: <https://verra.org/wp-content/uploads/imported/methodologies/VM0015-Methodology-for-Avoided-Unplanned-Deforestation-v1.1.pdf> (дата обращения: 16.07.2022).

для верхового пожара и 0,15 для низового пожара в boreальных лесах; G_{ef} – коэффициент выбросов, г кг^{-1} сжигаемого сухого вещества.

Согласно методологии VM0015 для оценки выбросов парниковых газов от лесных пожаров необходимо установить среднюю долю сгоревшей массы органического вещества в каждом пуле углерода (Pt_p) и среднюю эффективность сгорания каждого пула (CE_p) по формуле (10):

$$ECO2_t = F_t * \sum_{p=1}^P (Cp_t * Pt_p * CE_p), \quad (10)$$

где $ECO2_t$ – выбросы CO_2 на гектар от лесных пожаров в год t , т CO_2 -экв./га; F_t – доля площади лесных пожаров за исторический учетный период (т. к. рассматриваем только площади лесных пожаров, то $F_t=1$), безразмерный; Cp_t – средний запас углерода на гектар в пуле углерода p в год t , т CO_2 -экв./га; Pt_p – средняя доля сжигаемой массы в пуле углерода p , безразмерный; CE_p – средняя эффективность сгорания пула углерода p , безразмерный; p – пул углерода, который может гореть (надземная биомасса, валежная древесина, подстилка); $t = 1, 2, 3, \dots, T$, год предполагаемого периода проекта.

Эффективность сгорания может быть выбрана из Руководства по ЗИЗЛХ МГЭИК [Руководящие..., 2003]; если это невозможно сделать, следует использовать рекомендованное значение, равное 0,5. Отношение азота к углероду (NCR) приблизительно равно 0,01.

Лесные пожары являются источниками выбросов парниковых газов (ПГ) CH_4 и N_2O . На основе Руководства для национальных кадастров парниковых газов [2019..., 2024] их выбросы в результате лесных пожаров оцениваются по формуле (11):

$$Etot_t = EN2O_t + ECH4_t, \quad (11)$$

где $Etot_t$ – суммарные выбросы ПГ от лесных пожаров в году t , т CO_2 -экв. год $^{-1}$; $EN2O_t$ – выбросы N_2O от лесных пожаров в год t , т CO_2 -экв. год $^{-1}$; $ECH4_t$ – выбросы CH_4 от лесных пожаров в год t , т CO_2 -экв. год $^{-1}$.

$$EN2O_t = ECO2_t * 12/44 * NCR * ER_{N2O} * 44/28 * GWP_{N2O}, \quad (12)$$

$$ECH4_t = ECO2_t * 12/44 * ER_{CH4} * 16/12 * GWP_{CH4}, \quad (13)$$

где NCR – отношение азота к углероду, безразмерный; ER_{N2O} – коэффициент выбросов для N_2O , безразмерный; ER_{CH4} – коэффициент выбросов для CH_4 , безразмерный; GWP_{N2O} – потенциал глобального потепления для N_2O , безразмерный, равен 298; GWP_{CH4} – потенциал глобального потепления для CH_4 , безразмерный, равен 25.

Борьба с лесными пожарами как лесоклиматический проект имеет при своем осуществлении значительные риски, которые оценивались в соответствии с методикой *VCS AFOLU Non-Permanence Risk Tool* [VCS..., 2019]. Факторы риска классифицируются по трем категориям: внутренние, внешние и природные риски, – в свою очередь состоящим из подкатегорий, каждой из которой по специально разработанным шкалам присваивается балл. Общий рейтинг риска для каждой категории определяется путем суммирования рейтингов для каждой подкатегории, входящей в нее. Отдельные подкатегории могут иметь отрицательные значения баллов. Несмотря на это, общий рейтинг для любой категории не может быть меньше нуля.

Категория «внутренние риски» включает в себя четыре подкатегории: управление проектом; финансовая жизнеспособность; альтернативная стоимость; длительность проекта. Категория «внешние риски» включает в себя три подкатегории: права собственности и доступа / использования ресурсов; вовлечение местного сообщества; политический риск. Категория «природные риски» включает оценку по следующим группам природных рисков: пожары; вспышки болезней и вредителей; экстремальные погодные условия; геологический риск; другие природные риски. Оценка природных рисков должна проводиться на основании данных наблюдений, исторических данных, рецензируемой научной литературы или данных дистанционного зондирования Земли. Суммарное количество баллов определяется по всем трем категориям. В случае, если общий рейтинг риска превышает 60 баллов, риск проекта считается неприемлемо высоким.

Борьба с лесными пожарами имеет кроме рисков существенные неопределенности в определении объемов сокращения выбросов парниковых газов. В настоящем исследовании оценка неопределенности рассчитана по величине стандартной ошибки средней годовой площади лесного пожара в регионе, на основе которой вычисляются объемы выбросов и сокращений выбросов парниковых газов.

Результаты исследования и обсуждение. Средняя площадь лесных пожаров в Красноярском крае за изучаемый период составляет 234164,7 га/год, в том числе деструктивных пожаров – 18012,7 га/год, низовых – 216 152,0 га/год. Эти площади служат основанием расчета базовой линии лесоклиматического проекта.

Выбросы парниковых газов при пожарах на покрытых лесом землях, рассчитанные по методике МПР, при площади деструктивных пожаров 18012,7 га составляют 4 114 693,4 тCO₂-экв. год⁻¹ (рис. 3).



Рис. 3. Выбросы парниковых газов пулами лесных экосистем при деструктивных пожарах

Fig. 3. Carbon dioxide emissions in various pools during destructive forest fires

Объем выбросов парниковых газов при низовых пожарах на площади 216 152,0 га/год по методике МПР составляет 7 364 416,6 тонн CO₂-экв. год⁻¹ (рис. 4).

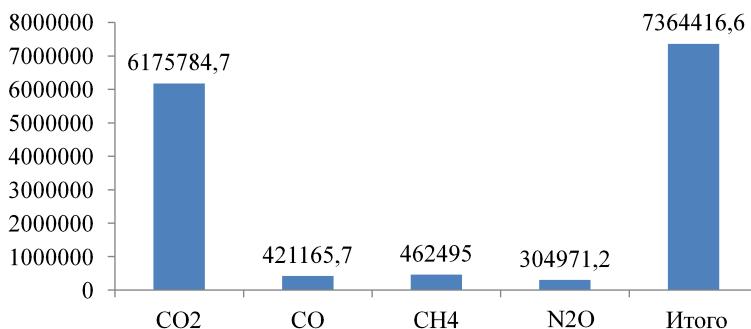


Рис. 4. Выбросы парниковых газов от низовых пожаров

Fig. 4. Greenhouse gas emissions from grassroots fires

Суммарные выбросы парниковых газов за год при пожарах на покрытых лесом землях при средней площади лесных пожаров 234 164,7 га/год в Красноярском крае составляют: по методике МПР – 11 479 110,0 тонн CO₂-экв. год⁻¹, по методологии VCS – 4 477 563,5 тонн CO₂-экв. год⁻¹, т. е. в 2,5 раза меньше.

При расчете сокращений выбросов парниковых газов в результате проектной деятельности учитываются, во-первых, требования Указа Президен-

та РФ, который требует от Правительства РФ и органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации обеспечить снижение площадей гарей на землях лесного фонда в 2022–2030 гг. минимум на 50% по сравнению с уровнем 2021 г. Во-вторых, сверх этих требований, для обеспечения дополнительности проекта предусматривается сокращение площади лесных пожаров в двух вариантах, на 30% и на 50% от сокращенной средней в соответствии с предписанием Указа Президента (табл. 1). В-третьих, достигнутые сокращения выбросов уменьшаются (редуцируются) на величину рисков и неопределенностей. Оценка неопределенности равна статистической ошибке в определении среднегодовой площади лесных пожаров и принята равной 61% (точное значение 61,2%). Неопределенность является следствием чисто случайных причин, вызывающих начало, распространение и прекращение пожаров, как это было установлено путем проверки годичных изменений площадей пожаров с помощью медианного теста.

Количество баллов по результатам оценки рисков проекта составляет 34. Для учета рисков и неопределенностей количество предотвращенных выбросов вследствие борьбы с лесными пожарами сокращается суммарно на 95%, что в конечном итоге позволяет оценить количество верифицированных углеродных единиц ($t\text{CO}_2\text{-экв. год}^{-1}$), получаемых в результате реализации ЛКП.

Результаты расчетов сокращения выбросов парниковых газов в результате реализации проекта в Красноярском крае без учета рисков и неопределенностей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели сокращения площади лесных пожаров и выбросов парниковых газов в результате борьбы с лесными пожарами (на примере Красноярского края)

Indicators for reducing the area of forest fires and greenhouse gas emissions in the Krasnoyarsk Region as a result of forest fires prevention

Средняя площадь пожаров, га	Выбросы $t\text{CO}_2\text{-экв.}$ при средней площади пожаров	Выбросы при сокращении площади пожаров на 50% в соответствии с Указом	Варианты проекта	
			Сокращение выбросов на 30%, $t\text{CO}_2\text{-экв.}$	Сокращение выбросов на 50%, $t\text{CO}_2\text{-экв.}$
Методика МПР				
234164,7	11479110,0	5739555,0	1721866,5	2869777,5
Методология VCS				
234164,7	4477563,52	2238781,76	671634,53	1119390,88

Результаты расчета углеродной эффективности борьбы с лесными пожарами с учетом рисков и неопределенностей приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Углеродная эффективность лесоклиматического проекта
«Борьба с лесными пожарами» (на примере Красноярского края)**

**Carbon efficiency of forest fires prevention as a climate project in forestry
(case study for Krasnoyarsk Region)**

Углеродная эффективность борьбы с лесными пожарами, т СО ₂ -экв./га год	
При сокращении площади пожаров на 30%	При сокращении площади пожаров на 50%
Методика МПР	
0,18	0,31
Методология VCS	
0,40	0,95

Из данных табл. 2 следует, что по методике МПР углеродная эффективность после вычета неопределенностей при 30% сокращении средней площади пожаров составит 0,18 т СО₂-экв./га год и 0,31 т СО₂-экв./га год – при 50% сокращении при условии, что ОИВ Красноярского края выполняют сокращение площади пожаров на 50%.

По методологии VCS VM0015 предполагаемая ежегодная редуцированная углеродная эффективность для первого сценария составляет 0,40 т СО₂-экв./га год, а для второго – 0,95 т СО₂-экв./га·год. Таким образом, из этого сравнения видно, что при расчетах по международной методологии углеродная эффективность борьбы с лесными пожарами как лесоклиматического проекта будет почти в 3 раза выше.

Мониторинг для оценки реальных изменений поглощения и выбросов парниковых газов в результате выполнения лесоклиматических проектов проводится 1 раз в 5 лет по методике МПР или 1 раз в 10 лет по международной методологии VCS VM0015, а также после завершения проекта. Для такого лесоклиматического проекта, как борьба с лесными пожарами, такой подход недостаточен в связи с наличием случайных рисков и неопределенностей, поэтому расчеты объемов предотвращенных выбросов и верифицированных углеродных единиц должны осуществляться ежегодно по итогам каждого пожарного сезона. При мониторинге необходимо проводить периодическую оценку запасов углерода в пулах лесных экосистем расчетным методом и методом выборочных полевых обследований. Кроме

этого необходимо учитывать возможность так называемых «утечек», которые в данном случае могут иметь место вследствие перехода лесного пожара с проектной территории на иную.

Заключение. Лесоклиматический проект борьбы с лесными пожарами обладает невысокой редуцированной углеродной эффективностью по двум причинам. Во-первых, борьба с лесными пожарами является обязательной деятельностью для органов исполнительной власти всех уровней, органов государственного управления лесами, арендаторов лесных участков. Во-вторых, этот проект имеет высокий уровень рисков и неопределенностей. Исходя из всех указанных выше обстоятельств редуцированная углеродная эффективность проекта, определенная по двум методикам, составляет от 0,18–0,31 до 0,40–0,95 т СО₂-экв./га·год в зависимости от интенсивности проекта, причем отечественная методика расчетов сокращения выбросов парниковых газов дает более низкий результат.

Представляет интерес сравнение полученных величин углеродной эффективности борьбы с лесными пожарами с данными, имеющимися в научной литературе. Результаты такого сравнения приведены в табл. 3.

Таблица 3

Углеродная эффективность лесоклиматического проекта борьба с лесными пожарами по данным разных авторов, т СО₂-экв./га год⁻¹

Carbon efficiency of forest fires prevention as presented by different authors, т СО₂-eq./ha year⁻¹

Авторы, литературный источник, методология			
Коротков, 2022	Фоменко и др., 2022	Настоящее исследование	
		МПР	VM 0015
0,1–0,4	0,87	0,18–0,31	0,40–0,95

Данные табл. 3 говорят о том, что оценки углеродной эффективности борьбы с лесными пожарами как лесоклиматического проекта различаются у разных авторов. Можно отметить, что близки результаты, полученные нами по методике МПР и представленные в [Коротков, 2022], а также полученные по методике VM 0015 и представленные в [Фоменко и др., 2022].

В результате проведенного анализа было установлено, что временной ряд площадей пожаров в Красноярском крае имеет случайный характер, что в значительной степени может определяться климатическими характеристи-

стиками конкретного года, особенно в пожароопасный период, и лесорастительными условиями проектной территории. Поэтому кроме учтенных в статье рисков и неопределенностей необходимо принимать во внимание классы пожарной опасности по условиям погоды в конкретный год и классы пожарной опасности по лесорастительным условиям на проектной территории [Энциклопедия..., 2006]. При их учете будет возможно избежать таких ситуаций, когда площадь пожаров снизилась ниже средней и появилось основание для начисления углеродных единиц, однако это снижение явилось следствием климатических условий и произошло бы без осуществления проектной деятельности. С другой стороны, есть лесорастительные условия, при которых пожары возможны только при особо неблагоприятных погодных условиях и их отсутствие также не зависит от проектной деятельности.

Как климатический проект в сфере лесных отношений, направленный на сокращение выбросов парниковых газов, борьба с лесными пожарами имеет степень рисков и неопределенностей намного выше, чем у других лесоклиматических проектов. Кроме того, проект требует создания эффективной системы ежегодного мониторинга площадей, пройденных пожарами, чтобы избежать неопределенностей и рисков при валидации проекта и верификации углеродных единиц.

Вместе с этим, учитывая особую актуальность борьбы с лесными пожарами, большие площади ежегодно повреждаемых пожарами лесов, дополнительные эффекты проекта, заключающиеся в сохранении многочисленных экологических функций и полезностей лесов, например, биологического разнообразия, этот проект является привлекательным и при правильной организации может быть эффективным.

Вклад авторов. Алексеев А.С. – постановка проблемы, выбор и обоснование применяемых методов исследований, описание результатов, сравнительный анализ и формирование заключения и выводов; Ветров Л.С. – оценка потерь запасов углерода в соответствии с «Методикой количественного определения выбросов парниковых газов и поглощения парниковых газов», утвержденной приказом МПР № 371 от 27.05.2022 г.; Никифоров А.А. – количественная оценка выбросов парниковых газов по международной методологии VCS VM0015 Версии 1.1 «Методология предотвращения незапланированного обезлесения».

Сведения о финансировании исследования. Настоящее исследование выполнено в рамках соглашения о сотрудничестве и при финансовой поддержке ПАО «НК «Роснефть».

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской

ской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Алексеев А.С., Ветров Л.С., Никифоров А.А. Борьба с лесными пожарами как климатический проект в области лесных отношений (на примере Красноярского края) // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: мат. VIII Всерос. науч.-тех. конф. СПб., 2023а. С. 115–117.

Алексеев А.С., Черниховский Д.М., Ветров Л.С., Гурьянов М.О., Михайлова А.А., Никифоров А. А. Лесоклиматические проекты: глоссарий основных понятий, терминов и определений: учеб. пособ. СПб.: СПбГЛТУ, 2023б. 52 с.

Ветрова М.А., Пахомова Н.В., Львова Н.А., Лемешко Н.А. Климатические проекты российского бизнеса: методология обоснования и рамочные условия успешной реализации // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. 2025. Вып. 41 (1). С. 66–92. DOI: 10.21638/spbu05.2025.104

Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Шуляк П.П., Честных О.В. Влияние пожаров и заготовок древесины на углеродный баланс // Лесоведение. 2013. № 5. С. 36–49.

Коротков В.Н. Лесные климатические проекты в России: ограничения и возможности // Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2022. Vol. 7 (4). DOI: 10.21685/2500-0578-2022-4-3.

Куричев Н.К., Птичников А.В., Шварц А.В., Кренке А.Н. Природно-климатические проекты в России: ключевые проблемы и условия успеха // Известия РАН: серия географическая. 2023. Т. 87, № 4. С. 619–636. DOI: 10.31857/S2587556623040040.

Национальный доклад о кадастре выбросов антропогенных парниковых газов из источников и их абсорбции поглотителями за 1990–2023 гг. Ч. 1. М., 2025. 422 с.

Перспективы реализации лесоклиматических проектов: потенциал регионов Енисейской Сибири: флагманский аналитический доклад. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2023. 160 с.

Птичников А.В., Шварц Е.А., Попова Г.А., Байбар А.С. Стратегия низкоуглеродного развития России и роль лесов в её реализации // Вестник РАН. 2023. Т. 93, № 1. С. 48–61. DOI: 10.31857/S0869587323010073.

Птичников А.В., Шварц Е.А. Декарбонизация с помощью природных решений: национальная политика и международная практика // Известия РАН: серия географическая. 2023. Т. 87, № 4. С. 479–496. DOI: 10.31857/S2587556623040088.

Пыжев А.И. Экономические и природные факторы пространственной неоднородности выбросов углерода в лесах России в 2010-х годах // Известия РАН: серия географическая. 2023. Т. 87, № 4. С. 637–648. DOI: 10.31857/S258755662304009X.

Романовская А.А. Подходы к реализации экосистемных климатических проектов в России // Известия РАН: серия географическая. 2023. Т. 87, № 4. С. 463–478. DOI: 10.31857/S2587556623040118.

Руководящие указания МГЭИК по эффективной практике для ЗИЗЛХ. 2003. 649 с.

Севастьянов Б.А. Курс теории вероятностей и математической статистики. М.: Наука, 1982. 256 с.

Сорокина Д.Д., Птичников А.В., Романовская А.А. Сравнительный анализ и оценка методик расчета поглощения парниковых газов лесными экосистемами, применяемых в Российской Федерации // Известия РАН: серия географическая. 2023. Т. 87, № 4. С. 1–15. DOI: 10.31857/S2587556623040131.

Фоменко Г.А., Романовская А.А., Фоменко М.А., Лошадкин К.А., Климов Е.В., Липка О.Н., Коротков В.Н., Алдошина А.С. Лесные климатические проекты: возможности и проблемы реализации ESG -подхода. Часть 2 // Проблемы региональной экологии. 2022. № 3. С. 65–74. DOI: 10.24412/1728-323X-2022-3-65-74.

Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г. Климатические изменения и лесные пожары в России // Лесоведение. 2013. № 5. С. 50–61.

Энциклопедия лесного хозяйства. Т. 1. М., 2006. 424 с.

2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html> (дата обращения: 23.10.2024).

VCS AFOLU Non-Permanence Risk Tool v.4.0. 2019. 22 p. URL: https://fundacionglobalnature.org/wp-content/uploads/2024/09/Anexo-3_-AFOLU_Non-Permanence_Risk-Tool_v4.0-1.pdf (дата обращения: 16.06.2025).

Wildfires wreaked havoc in 2021, CAMS tracked their impact URL: <https://atmosphere.copernicus.eu/wildfires-wreaked-havoc-2021-cams-tracked-their-impact> (дата обращения: 09.04.2024).

References

2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html> (accessed: 23.10.2024).

Alekseev A.S., Vetrov L.S., Nikiforov A.A. Fighting forest fires as a climate project in the field of forest relations (on the example of Krasnoyarsk Region). *Forests of Russia: policy, industry, science, education:* mat. of the VIII All-Russ. sci.-tech. conf. St. Petersburg, 2023a, pp. 115–117. (In Russ.)

Alekseev A.S., Chernikhovsky D.M., Vetrov L.S., Guryanov M.O., Mikhailova A.A., Nikiforov A.A. Forest climate projects: glossary of basic concepts, terms and definitions. St. Petersburg: SPbGLTU, 2023b. 52 p. (In Russ.)

Encyclopedia of Forestry. Vol. 1. Moscow, 2006. 424 p. (In Russ.)

Fomenko G.A., Romanovskaya A. A., Fomenko M. A., Loshadkin K. A., Klimov E. V., Lipka O. N., Korotkov V. N., Aldoshina A. S. Forest climate projects: opportunities and

challenges of implementing the ESG approach. Part 2. *Problems of regional ecology*, 2022, no. 3, pp. 65–74. DOI: 10.24412/1728-323X-2022-3-65-74. (In Russ.)

Korotkov V.N. Forest climate projects in Russia: limitations and opportunities. *Russian Journal of Ecosystem Ecology*, 2022, vol. 7 (4). DOI: 10.21685/2500-0578-2022-4-3. (In Russ.)

Kurichev N.K., Ptichnikov A.V., Shvarts E.A., Krenke A.N. Nature-Based Offsets in Russia: Key Challenges and Conditions for Success. *Izvestiya RAS. Geographical series*, 2023, vol. 87, no. 4, pp. 619–636. DOI: 10.31857/S2587556623040040. (In Russ.)

National report on the inventory of anthropogenic greenhouse gases emissions from sources and their absorption by sinks in 1990–2023. Part 1. Moscow, 2025. 422 p. (In Russ.)

Prospects for the implementation of forest-climatic projects: the potential of the regions of Yensei Siberia: a flagship analytical report. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2023. 160 p. (In Russ.)

Ptichnikov A.V., Shvarts E.A. Decarbonization through natural solutions: national policy and international practice. *Izvestiya RAS. Geographical series*, 2023, vol. 87, no. 4, pp. 479–496. DOI: 10.31857/S2587556623040088. (In Russ.)

Ptichnikov A.V., Shvarts E.A., Popova G.A., Baibar A.S. The strategy of low-carbon development of Russia and the role of forests in its implementation // Bulletin of the RAS, 2023, vol. 93, no. 1, pp. 48–61. DOI: 10.31857/S0869587323010073. (In Russ.)

Pyzhev A.I. Economic and natural factors of spatial heterogeneity of carbon emissions in Russian forests in the 2010s. *Izvestiya RAS. Geographical series*, 2023, vol. 87, no. 4, pp. 637–648. DOI: 10.31857/S258755662304009X. (In Russ.)

Romanovskaya A.A. Approaches to the implementation of ecosystem climate projects in Russia. *Izvestiya RAS. Geographical series*, 2023, vol. 87, no. 4, pp. 463–478. DOI: 10.31857/S2587556623040118. (In Russ.)

Sevastyanov B.A. Course in probability theory and mathematical statistics. Moscow: Nauka, 1982. 256 p. (In Russ.)

Shvidenko A.Z., Shchepachenko D.G. Climatic changes and forest fires in Russia. *Lesovedenie*, 2013, no. 5, pp. 50–61. (In Russ.)

Sorokina D.D., Ptichnikov A.V., Romanovskaya A.A. Comparative analysis and evaluation of methods for calculating greenhouse gas uptake by forest ecosystems used in the Russian Federation. *Izvestiya RAS. Geographical series*, 2023, vol. 87, no. 4, pp. 1–15. DOI: 10.31857/S2587556623040131. (In Russ.)

VCS AFOLU Non-Permanence Risk Tool v.4.0. 2019. 22 p. URL: https://fundacionglobalnature.org/wp-content/uploads/2024/09/Anexo-3_-AFOLU_Non-Permanence_Risk-Tool_v4.0-1.pdf (accessed: 16.06.2025).

Vetrova M.A., Pakhomova N.V., Lvova N.A., Lemeshko N.A. Climate projects of Russian business: Justification methodology and framework conditions for successful implementation. *St. Petersburg University Journal. Economic Studies*, 2025, vol. 41 (1), pp. 66–92. DOI: 10.21638/spbu05.2025.104 (In Russ.)

Wildfires wreaked havoc in 2021, CAMS tracked their impact. URL: <https://atmosphere.copernicus.eu/wildfires-wreaked-havoc-2021-cams-tracked-their-impact> (accessed: 09.04.2024).

Zamolodchikov D.G., Grabovsky V.I., Shulyak P.P., Chestnykh O.V. The influence of fires and timber harvesting on the coal balance. *Lesovedenie*, 2013, no. 5, pp. 36–49. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 10.12.2024

Алексеев А.С., Ветров Л.С., Никифоров А.А. Лесоклиматический проект «Борьба с лесными пожарами»: проблемы обоснования, углеродная эффективность, риски и неопределенности (на примере Красноярского края) // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 142–161. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.142-161

Лесные пожары относятся к одним из основных процессов, как природного, так и антропогенного происхождения, приводящих к большим объемам выбросов парниковых газов в атмосферу. Лесные пожары приводят к полному или частичному разрушению лесных экосистем. При этом происходит как снижение их поглотительной способности, так и выбросы парниковых газов за счет сгорания органического вещества в основных пушах лесных экосистем. Деятельность по охране лесов от пожаров может являться одним из видов лесоклиматических проектов (ЛКП) в рамках лесных отношений. В процессе реализации ЛКП проводится комплекс мероприятий, направленных на предупреждение возникновения пожаров в лесах, ограничение их распространения, снижение пожарной опасности, повышение пожарной устойчивости лесов, своевременное обнаружение и тушение лесных пожаров. В статье рассмотрены вопросы определения базовой и проектной линий при обосновании ЛКП, две методики по количественному определению объема сокращения выбросов парниковых газов при борьбе с лесными пожарами. Первая методика представлена в методических указаниях, утвержденных распоряжением МПР № 371 от 27.05.2022 г., и в методологии реализации климатического проекта № 0011 «Улучшенное управление лесным хозяйством, в том числе охрана лесов от пожаров». Вторая методика представлена в международном стандарте *VCS VM0015* «Методология предотвращения незапланированного обезлесения». Обоснование базовой линии выполнено по методу исторических средних изменений. Для этого были использованы статистические данные о площадях лесных пожаров за период с 2007 по 2022 гг. В лесоклиматическом проекте рассмотрено два сценария сокращения площади лесных пожаров, на 30% и на 50% от средней ежегодной площади. Также в сценариях учтена необходимость сокращения площади лесных пожаров в соответствии с Указом Президента РФ от

15 июня 2022 г. Проведена оценка неопределенностей и рисков ЛКП. В результатах исследования представлены количественные оценки объемов возможного снижения выбросов парниковых газов в результате борьбы с лесными пожарами по двум методикам, которые дали различные результаты. Оценена углеродная эффективность ЛКП и проведено сравнение полученных результатов с другими оценками, имеющимися в научной литературе.

Ключевые слова: лесные пожары, лесоклиматический проект, парниковые газы, базовая линия, проектная линия, неопределенностии, риски, консервативный подход.

Alekseev A.S., Vetrov L.S., Nikiforov A.A. Forest-climatic project on forest fire control: problems of justification, carbon efficiency, risks and uncertainties (on the example of the Krasnoyarsk region). *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 142–161 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.142-161

Forest fires are one of the main processes, both natural and anthropogenic, leading to large amounts of greenhouse gas emissions into the atmosphere. Forest fires lead to the complete or partial destruction of forest ecosystems. At the same time, there is a decrease in their absorption capacity, as well as greenhouse gas emissions due to the combustion of organic matter in the main pools of forest ecosystems. Forest fire protection activities can be one of the types of forest-climatic projects (FCP) within the framework of forest relations. In the process of implementing the FCP, a set of measures is being carried out aimed at preventing the occurrence of fires in forests, limiting their spread, reducing fire danger, increasing forest fire resistance and timely detection and extinguishing of forest fires. The article discusses the issues of determining the basic and design lines in the justification of the paintwork, two methods for quantifying the amount of greenhouse gas emissions reduction in the fight against forest fires. The first method is presented in the methodological guidelines approved by the decree of the Ministry of Natural resources and ecology of Russian Federation No. 371 dated 05/27/2022 and presented in the methodology for the implementation of climate project No. 0011 «Improved forestry management, including protection of forests from fires.» The second method is presented in the international standard VCS VM0015 «Methodology for preventing unplanned deforestation». The baseline was justified using the method of historical average changes. For this purpose, statistical data on the area of forest fires for the period from 2007 to 2022 were used. The forest climate project considers two scenarios for reducing the area of forest fires, by 30% and by 50% of the average annual area. The scenarios also take into account the need to reduce the area of forest fires in accordance with the Decree of the President of the Russian Federation on June 15, 2022. An assessment of the uncertainties and risks of the FCP was carried out. The results of the study provide quantitative estimates of the amount of possible reduction in greenhouse gas emissions as a result of forest fire control using two methods that have yielded different results. The

carbon efficiency of the project was evaluated and the results obtained were compared with other estimates available in the scientific literature.

К e y w o r d s: forest fires, forest climate project, greenhouse gases, baseline, project line, uncertainties, risks, conservative approach.

АЛЕКСЕЕВ Александр Сергеевич – профессор, заведующий кафедрой лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, 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 (Geography), 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

ВЕТРОВ Леонид Степанович – доцент кафедры лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 9135-1710. ORCID: 0009-0000-2524-8617

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

VETROV Leonid S. – PhD (Agriculture), Associate Professor of the department of forest inventory, management and GIS, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-код: 9135-1710. ORCID: 0009-0000-2524-8617

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

НИКИФОРОВ Александр Александрович – доцент кафедры лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 5284-7143. ORCID: 0000-0001-7048-1135.

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

NIKIFOROV Aleksandr A. – PhD (Agriculture), Associate Professor of the department of forest inventory, management and GIS, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 5284-7143. ORCID: 0000-0001-7048-1135.

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

**Ю.П. Демаков, Е.С. Шарапов, В.Г. Краснов, А.С. Королев,
Т.В. Нуриева**

**ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ СОЗДАНИЯ
ПЛАНТАЦИЙ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ
НА СУГЛИНИСТЫХ ПОЧВАХ РЕСПУБЛИКИ МАРИЙ ЭЛ**

Введение. Актуальность темы исследований обусловлена необходимостью совершенствования комплекса различных мероприятий по воспроизведству и повышению эколого-ресурсного потенциала лесов [Романов и др., 2007; Романов, 2021], предусматривающих оптимизацию их породного состава [Демаков и др., 2018], технологий создания и режимов выращивания насаждений [Калиниченко и др., 1973; Шинкаренко, Дзедзюля, 1983; Юодвалькис, Озолинчус, 1987; Писаренко и др., 1992; Демаков, 2022], а также отбора генетически ценных деревьев для их последующего размножения [Потылев, 1997; Царёв и др., 2002; Царёв, Лаур, 2006; Ефимов, 2008; Видякин, 2008, 2010; Рогозин, 2013; Бессчётнова, 2016]. В настоящее время требуется не просто воспроизводить леса, а выращивать их для конкретного потребителя [Лесные..., 1984; Плантационное..., 2007; Демаков и др., 2021], ускоренно получая большое количество древесины нужного качества. Ведение лесного хозяйства предусматривает, кроме того, оптимизацию трудовых и материальных затрат, направленных на получение наивысшего экономического эффекта [Демаков и др., 2018].

Цель работы – обоснование целесообразности создания плантаций сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в дубравных и судубравных лесорастительных условиях Республики Марий Эл, позволяющих сократить сроки выращивания насаждений, повысить количество и качество получаемой продукции, на основе изучения развития древостоев естественного и искусственного происхождения, а также формирования у деревьев плотности древесины.

Материалы и методика исследования. Для написания статьи использовали сведения о таксационных параметрах древостоев, содержащиеся в электронной базе данных по Республике Марий Эл (более 45 тыс. выделов в ТЛУ D2 и C2), а также материалы натурной оценки на 15 научных объектах в древостоях естественного происхождения и в плантационных

культурах сосны обыкновенной, произрастающих на дерново-подзолистых и серых лесных суглинистых почвах. Деревья при учете разделяли по ступеням толщины и состоянию, отмечая наличие у них различных пороков. Для оценки внутреннего состояния и косвенного определения технических свойств древесины использовали метод измерения сопротивления сверлению устройством IML-RESI PowerDrill 400 (IML System GmbH, Вислох, Германия). Оценку проводили в каждом биотопе у 25 деревьев разного диаметра на высоте 1,3 м с северной стороны в радиальном направлении. С помощью бурава Прессслера (Haglöf Sweden AB, Лонгсле, Швеция) отбирали цилиндрические керны длиной 50 мм, которые сразу же помещали в индивидуальные пластиковые замаркированные контейнеры. Лабораторные измерения базисной плотности древесины проводили по ГОСТ 16483.1-84 в течение того же дня. Для этого определяли на весах VibraALE-623 (Shinko Denshi Co., Ltd., Токио, Япония) массу сырого керна с погрешностью 10^{-6} кг, измеряли с помощью штангенциркуля его длину, а также диаметр вдоль и поперек волокон с погрешностью $\pm 0,01$ мм и вычисляли его объем. После этого керны высушивали при температуре 103 °C до постоянной массы и вновь взвешивали на этих же весах. В каждом биотопе у 10–15 господствующих деревьев также брали керны древесины для анализа динамики их радиального годичного прироста, который проводили по общепринятым методикам [Битвинская, 1974; Методы..., 2000]. Измерение ширины годичных колец проводили на микроскопе МБС-10 с точностью $\pm 0,05$ мм. Цифровой эмпирический материал обработан стандартными методами математической статистики [Зайцев, 1991; Гринин и др., 2003] на ПК с использованием пакетов прикладных программ Microsoft Excel® 2016 и Statistica 10 (Dell, Раунд-Рок, TX, США).

Результаты исследования. Лесные плантации будут иметь наиболее высокую производительность, как можно предположить, на богатых суглинистых почвах. Здесь, однако, очень часто формируются лиственные или же сложные многопородные древостоя. Так, в дубравах и раменях Республик Среднего Поволжья (Татарстан, Чувашия и Марий Эл) довольно много малоценных березняков и осинников [Пуряев, Демаков, 2014; Демаков и др., 2018; Демаков, Краснов, 2018], что свидетельствует о необходимости коренного изменения структуры лесов за счет создания плантаций хвойных пород деревьев, особенно сосны обыкновенной.

Основным показателем фактической производительности древостоя является запас стволовой древесины (M , $m^3 \times ga^{-1}$), который, как было уста-

новлено нами ранее [Демаков и др., 2018], увеличивается с возрастом (A, лет) лишь до определенного момента, а затем неуклонно снижается, что с высокой точностью аппроксимируют уравнения оптимума (1) и (2):

в ТЛУ D₂

$$M = \frac{100 \cdot A}{30,01 \cdot 10^{-4} \cdot A^2 - 30,75 \cdot 10^{-2} \cdot A + 23,11}; R^2 = 0,959; \quad (1)$$

в ТЛУ C₂

$$M = \frac{100 \cdot A}{41,73 \cdot 10^{-4} \cdot A^2 - 36,42 \cdot 10^{-2} \cdot A + 29,23}; R^2 = 0,924. \quad (2)$$

Расчеты, проведенные по данным уравнениям, показали, что кульминация запаса стволовой древесины наступает в сосновках в возрасте 85–90 лет, составляя в свежих дубравах 456 м³×га⁻¹, а в свежих раменях – всего лишь 300 м³×га⁻¹, что связано с большой долей участия в их составе лиственных пород деревьев. Кульминация же среднего годичного прироста запаса, определяющего возраст количественной спелости древостоя, наступает в свежих дубравах в возрасте 55 лет, а в раменях – в 45 лет, составляя соответственно 6,55 и 4,70 м³×га⁻¹, свидетельствуя о целесообразности выращивания древостоев в этих условиях с коротким оборотом рубки. Производительность насаждений, состоящих из других пород деревьев, здесь значительно ниже [Пуряев, Демаков, 2014; Демаков и др., 2016, 2018; Демаков, Краснов, 2018].

Ярким примером высокой производительности древостоев в ТЛУ C₂ являются чистые культуры сосны обыкновенной, созданные на приовражных землях Советского, Куженерского и Сернурского районов Республики Марий Эл (табл. 1, рис. 1), запас стволовой древесины которых в возрасте 45 лет достигает 624 м³×га⁻¹, в том числе крупной и средней – 57,2%. Высока также производительность в сходных условиях кулисных сосново-лиственничных культур (рис. 2). Создавать же на богатых суглинистых дерново-подзолистых почвах смешанные сосново-елово-березовые культуры, как показали наши исследования [Демаков и др., 2017; Демаков, 2022; Демаков и др., 2022], не целесообразно, так как это снижает производительность и устойчивость насаждений. Береза в смешанных древостоях обгоняет хвойные деревья не только в росте, но и в развитии: в возрасте 45 лет она уже полностью достигает спелости, и промедление с ее вырубкой ведет лишь к потере товарных качеств древесины. Деревья же сосны и ели еще требуют дозривания.

Таблица 1

Производительность 45-летних культур сосны, созданных на приовражных землях Марийского Заволжья в ТЛУ С₂

Variability of the basis density values of sapwood in Scots pine trees at the research sites in the oakeries and ramens in Mari Zavolzhye

Параметр древостоя	Значения статистических показателей (N = 12)*				
	M ± m	min	max	S _x	CV
Густота, экз.×га ⁻¹	1374 ± 116	776	2108	402	29,3
Средний диаметр ствола, см	21,1 ± 0,6	17,7	25,3	1,99	9,4
Средняя высота деревьев, м	22,5 ± 0,7	18,2	25,5	2,48	11,0
Площадь сечения стволов, м ² ×га ⁻¹	48,77 ± 2,10	40,43	67,63	7,27	14,9
Относительная полнота	1,19 ± 0,06	0,94	1,77	0,22	18,5
Запас стволовой древесины, м ³ ×га ⁻¹	493 ± 15	450	624	51,0	10,3
Доля крупной и средней древесины, %	57,2 ± 2,1	42,6	70,0	7,1	12,4

Примечание: M ± m – среднее значение параметра и его ошибки; min, max – минимальное и максимальное значения параметра; S_x – стандартное отклонение значений параметра; CV – коэффициент вариации значений, %

Каждый из таксационных показателей древостоя на объектах исследования, как следует из приведенных данных, варьирует по-разному. Наиболее сильно изменяется объем крупной древесины (CV=65,2%), во многом зависящий от густоты насаждений, которая в свою очередь очень сильно влияет на величину среднего диаметра деревьев. Значения коэффициента вариации большинства показателей изменяются от 11 до 25%, что свидетельствует о высокой однородности условий произрастания древостоев и технологий создания плантаций. В культурах сосны пока не отмечено значительных патологий деревьев, о чем свидетельствует небольшое количество сухостоя, который отмечается в основном среди деревьев низших ступеней толщины, и очагов корневой губки. Основную долю в культурах занимают здоровые деревья (рис. 3), а доля деревьев с кривизной ствола, многовершинностью и сильной сучковатостью, слабым очищением его от отмерших ветвей, которые должны быть удалены при рубках ухода, варьирует от 13,2 до 23,9%.

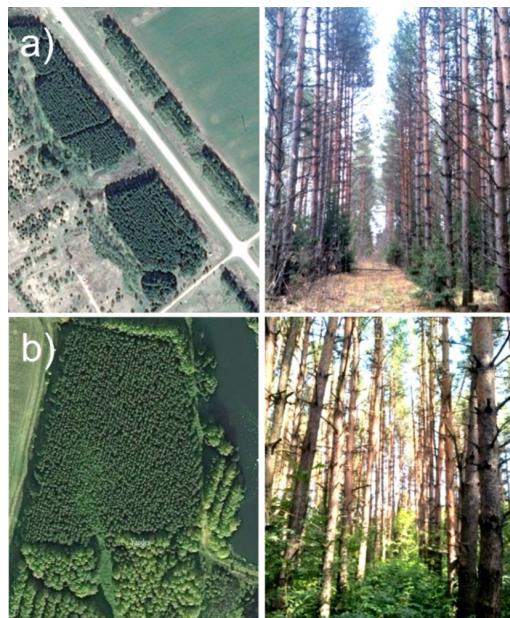


Рис. 1. Спутниковые и наземные снимки высокопроизводительных противоэрозионных 45-летних (а) и 55-летних (б) сосновых насаждений на суглинках в ТЛУ С₂

Fig. 1. Satellite and ground images of highly-productive erosion-preventing 45-year-old (a) and 55-year-old (b) pine plantations on the clay-loam soils in the С₂ type forest growth conditions



Рис. 2. Пятирядно-кулисные 50-летние сосново-лиственничные культуры, созданные на суглинистых почвах в пригороде г. Ижевска по схеме 4×2 м с исходной густотой 1250 экз.×га⁻¹

Fig. 2. Five-row strip 50-year-old pine and larch plantations established on the clay-loam soils in the Izhevsk suburb according to the 4×2 m pattern with an original thickness of 1250 trees×ha⁻¹

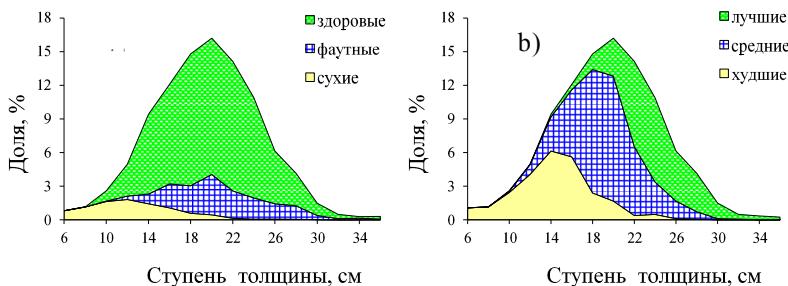


Рис. 3. Закономерности распределения деревьев сосны разных категорий санитарного состояния (а) и роста по ступеням их толщины (б) в противоэрозионных насаждениях на суглинистых почвах

Fig. 3. Distribution patterns of pine trees of different categories in terms of their sanitary state (a) and growth in relation of their thickness degrees (b) in the erosion-preventive plantations on the clay-loam soils

Насаждения, создаваемые в богатых лесорастительных условиях Республики Марий Эл и смежных субъектах Приволжского Федерального округа России, способны производить не только древесину, но и выполнять важные экологические функции. Так, абсолютно сухая фитомасса древостоя в чистых 45-летних культурах сосны составляет в среднем $316,8 \text{ т} \times \text{га}^{-1}$ [Демаков и др., 2017; Демаков, 2018]. Один гектар такой лесной плантации ежегодно поглощает 12,9 т углекислоты и выделяет 9,3 т кислорода. Эти насаждения украшают ландшафт и значительно повышают его рекреационный потенциал, который можно использовать не только для нужд местного населения, но и для организации спортивных мероприятий, туризма и экологического просвещения, а также в качестве воспроизводственных участков охотничье-промышленных видов животных.

Повысить производительность и качество сортиментной структуры лесных плантаций можно путем оптимизации их исходной густоты, достигаемой в основном за счет изменения ширины между рядами, а также режимов дальнейшего выращивания [Калиниченко и др., 1973; Шинкаренко, Дзедзюля, 1983; Юодвалькис, Озолинчус, 1987; Писаренко и др., 1992; Демаков, 2022]. Так, по данным [Штейнбок, Киселев, 1980], максимум товарной продукции к моменту рубки сосновых древостоев может быть обеспечен при их полноте в возрасте 30 лет всего 0,4 единицы. Относительная величина текущего прироста запаса древесины в сосняках, как показали некоторые исследователи [Загреев, 1962; Севко, 1994], возрастает по мере снижения их полноты. Нами было установлено, что при изменении расстояния между рядами деревьев на плантациях с 1,5 до 4 м величина их среднего диаметра в 45-летнем возрасте

увеличится с 15,3 до 24,9 см, а объем крупной и средней древесины – с 227 до 363 $\text{м}^3 \times \text{га}^{-1}$ [Демаков и др., 2017; Демаков, 2022].

Выращиванию сосны в дубравах и раменях нашей республики и смежных субъектов Приволжского Федерального округа России, а особенно со зданию культур этой древесной породы, мешает ложное убеждение лесоводов о якобы формировании у деревьев в этих условиях так называемой «мяндовской», т. е. рыхлой древесины, имеющей низкие технические качества и сильно поражающейся стволовыми гнилями. Проведенные нами исследования полностью опровергают его. Так, базисная плотность сосновой древесины закономерно возрастает с возрастом, достигая максимума в 90–120 лет, а затем вновь снижается (табл. 2). Деревья же сосны, как свидетельствуют результаты измерения сопротивления древесины сверлению в радиальном направлении устройством PowerDrill 400, проведенные в смешанных естественных насаждениях Марийского Заволжья, не поражаются стволовыми гнилями в большинстве случаев до 180–200 лет.

Таблица 2

Вариабельность значений базисной плотности заболонной древесины у деревьев сосны обыкновенной на объектах исследования в дубравах и раменях Марийского Заволжья

Variability of the basis density values of sapwood in Scots pine trees at the research sites in the oakeries and ramens in Mari Zavolzhye

Объект исследования	ТЛУ	Возраст, лет	Статистика значений показателя, $\text{кг} \times \text{м}^{-3}$				
			$M \pm m$	min	max	S	CV, %
Плантация в Сернурском лесничестве	C ₂₋₃	30	357,6 ± 1,7	290,7	446,4	27,8	7,8
Культуры в Куженерском лесничестве	C ₂	45	456,5 ± 5,1	408,2	508,0	25,4	5,6
Культуры на р. Манага	C ₂	55	428,6 ± 3,7	368,9	491,2	28,7	6,7
Культуры в Сосновой роще	D ₂	70	475,6 ± 7,9	393,8	559,1	39,3	8,3
Естественный древостой в п. Горняк	C ₂	120	469,2 ± 5,8	414,6	520,3	28,5	6,1
Естественный древостой в Сосновой роще	D ₂	200	408,2 ± 8,0	329,7	478,2	39,8	9,8

Большую роль в повышении производительности и качества сортиментной структуры древостоя может сыграть селекция по улучшению потомства деревьев за счет отбора особей по целевым признакам, одним из которых является, в частности, плотность древесины [Полубояринов, 1976; Рябоконь, Литаш, 1981; Мелехов и др., 2003; Тюкавина и др., 2017; Усольцев, Цепордей, 2020; Sharapov et al., 2024]. Ее величина в каждой ценопопу-

ляции, как следует из приведенных данных, изменяется в довольно больших пределах и практически не связана с диаметром деревьев ($r = -0,208 \dots 0,427$). Другим наследуемым признаком, во многом связанным с особенностями гормональной системы деревьев [Меняйло, 1987; Гормоны..., 2007; Haffner et al., 1991; Groover, Robischon, 2006], является скорость их старения, проявляющаяся в особенностях роста особей [Демаков, Нуриева, 2019], а также неодинаковой способности к резервированию и распределению питательных веществ между разными органами [Романовский, Щекалев, 2016; Наргер, 1977; Keddy, 1990; Wedin, Tilman, 1993]: быстрорастущие особи основную часть аккумулированной солнечной энергии вкладывают в прирост древесной массы и не создают долговременных запасов питательных веществ, а медленнорастущие оставляют их в резерве.

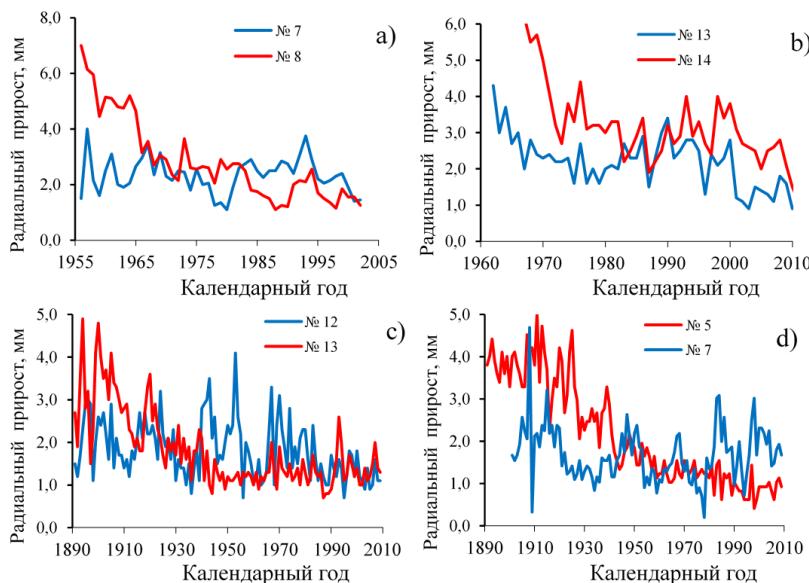


Рис. 4. Особенности динамики радиального прироста деревьев сосны: а) – культуры в Учебно-опытном лесничестве; б) – культуры в лесопарке «Сосновая роща»; в) – естественные древостои в лесопарке «Сосновая роща»; г) – естественные древостои в заповеднике «Большая Кокшага»; № 5, 7, 8, 12, 13, 14 – порядковый номер дерева в выборке

Fig. 4. Characteristics of radial growth dynamics of pine trees: a) plantations in the training and experimental forest district; b) plantations in the Pine Grove urban forest; c) natural stands in the Pine Grove urban forest; d) natural stands in the Bolshaya Kokshaga nature reserve; № 5, 7, 8, 12, 13, 14 – ordinal number of the tree in the sample

Анализ динамики радиального прироста деревьев на объектах исследования показал большие различия в степени выраженности у них возрастного тренда (рис. 4), описываемого в большинстве случаев уравнением

$$Y = K \times \exp(-a \times 10^{-2} \times X) + b. \quad (3)$$

Каждый из параметров уравнения, имеющий конкретный биофизический смысл, изменяется в больших пределах (табл. 3). Так, параметр K численно связан с величиной годичного прироста деревьев в первые 1-2 года их жизни. Параметр a , варьирующий наиболее значительно, отражает скорость его снижения во времени, обусловленную процессом их старения. Параметр b , также изменяющийся весьма значительно, характеризует нижний предел величины годичного прироста деревьев, к которому они постепенно приближаются в процессе своего развития.

Таблица 3

Вариабельность значений параметров уравнения возрастного тренда радиального годичного прироста деревьев сосны обыкновенной в дубравах и раменях Республики Марий Эл

Variability of the parameter values in the equation of the age trend of radial annual growth of Scots pine trees in the oakeries and ramens in the Mari El Republic

Статистический показатель	Значения параметров уравнения $Y = K \times \exp(-a \times 10^{-2} \times X) + b$			
	K	a	b	R^2
Смешанные древостои естественного происхождения возрастом от 100 до 200 лет (n = 89)				
M ± m	4,97 ± 0,22	4,36 ± 0,60	0,61 ± 0,09	0,63 ± 0,02
Лимит	1,68–13,80	0,00–30,56	0,00–3,80	0,02–0,95
S	2,12	5,68	0,81	0,22
CV, %	42,7	130,3	131,8	35,1
Лесные культуры возрастом от 40 до 100 лет (n = 81)				
M ± m	6,34 ± 0,35	15,95 ± 1,55	1,20 ± 0,08	0,76 ± 0,02
Лимит	2,25–18,70	0,16–87,40	0,00–3,27	0,01–0,98
S	3,16	13,93	0,76	0,19
CV, %	49,8	87,3	63,4	25,1

Заключение. Результаты проведенного нами исследования показали, что породная структура лесов в дубравах и раменях Республики Среднего Поволжья нуждается в коренном изменении, поскольку она далеко не в полной мере соответствует лесоводственным и экологическим требованиям, а также социальным запросам местного населения. Установлено, что наиболее высокую производительность в данных лесорастительных условиях имеют древостои естественного происхождения с преобладанием в их составе сосны обыкновенной. Кульминация среднего годичного прироста их запаса, определяющего возраст количественной спелости древостоя, наступает в ТЛУ D₂ в возрасте 55 лет, а в ТЛУ C₂ – в 45 лет, составляя, соответственно, 6,55 и 4,70 $\text{м}^3 \times \text{га}^{-1}$, что свидетельствует о целесообразности выращивания насаждений с коротким оборотом рубки.

Для повышения эколого-ресурсного потенциала лесов в богатых лесорастительных условиях целесообразно создавать чистые культуры сосны обыкновенной, запас стволовой древесины в которых к 45 годам может достичь при оптимальном режиме их выращивания более 500 $\text{м}^3 \times \text{га}^{-1}$. По базисной плотности она не уступает древесине, выращенной в боровых условиях, составляя в этом возрасте около 460 $\text{кг} \times \text{м}^{-3}$, достигая максимума в 90–120 лет. Многие деревья сосны способны дожить в богатых лесорастительных условиях до 200 лет и не поражаться при этом стволовыми гнилями.

Надежной основой для получения новых знаний о закономерностях изменения производительности древостоев на плантациях сосны является созданная нами сеть стационарных объектов.

Плантации сосны обыкновенной, позволяющие получать большое количество качественной древесины в короткие сроки, целесообразно создавать в богатых лесорастительных условиях не только Республики Марий Эл, но и других регионов зоны хвойно-широколиственных лесов европейской части России.

Сведения о финансировании исследования. Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 23-16-00220, <https://rscf.ru/project/23-16-00220/> с использованием оборудования ЦКП «Экология, биотехнологии и процессы получения экологически чистых энергоносителей» Поволжского государственного технологического университета, г. Йошкар-Ола.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Бессчётнова Н.Н. Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.). Эффективность отбора плюсовых деревьев. Нижний Новгород: Нижегородская Государственная Сельскохозяйственная академия, 2016. 464 с.

- Битвинская Т.Т. Дендроклиматические исследования. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 172 с.
- Видякин А.И. Плюсовая селекция сосны и ели: итоги и перспективы развития // Лесохозяйственная информация. 2008. № 3–4. С. 33–35.
- Видякин А.И. Эффективность плюсовой селекции древесных растений // Хвойные бореальной зоны. 2010. Т. XXVII, № 1–2. С. 18–24.
- Гормоны растений: регуляция концентрации, связь с ростом и водным обменом / Ин-т биол. УНЦ РАН. М.: Наука, 2007. 158 с.
- Гринин А.С., Орехов Н.А., Новиков В.Н. Математическое моделирование в экологии. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. 269 с.
- Демаков Ю.П. Структура и закономерности развития лесов Республики Марий Эл. Йошкар-Ола: Поволжский Государственный Технологический Университет, 2018. 432 с.
- Демаков Ю.П. Результаты многолетних опытов по созданию и выращиванию культур сосны обыкновенной в Республике Марий Эл. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2022. 242 с.
- Демаков Ю.П., Пуряев А.С., Мифтахов Т.Ф. Экономический подход к выбору целевой древесной породы для лесовыращивания в Предкамье Республики Татарстан // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2016. № 4 (42). С. 20–27.
- Демаков Ю.П., Нуреева Т.В., Краснов В.Г., Рыжков А.А. Эколого-ресурсный потенциал лесных насаждений на приовражно-балочных землях Среднего Поволжья // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2017. № 3 (35). С. 73–87.
- Демаков Ю.П., Краснов В.Г. Изменение структуры и ресурсного потенциала лесов Чувашии за период с 1942 по 2014 годы // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2018. № 1 (37). С. 19–32.
- Демаков Ю.П., Нуреева Т.В., Пуряев А.С., Краснов В.Г. Экономические основы и опыт плантационного лесовыращивания в Среднем Поволжье // Сибирский лесной журнал. 2018. № 2. С. 3–14.
- Демаков Ю.П., Нуреева Т.В. Закономерности изменения рангового положения деревьев по их размерам в ценопопуляциях сосны обыкновенной // Лесоведение. 2019. № 4. С. 274–285.
- Демаков Ю.П., Романов Е.М., Краснов В.Г., Нуреева Т.В. Опыт искусственно-го восстановления лесов в Среднем Поволжье и дальнейшая стратегия действий по его совершенствованию // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2021. № 1 (49). С. 23–46.
- Демаков Ю.П., Исаев А.В., Нуреева Т.В. Опыт создания смешанных лесных культур в Марийском Заволжье // Сибирский лесной журнал. 2022. № 2. С. 41–47.

- Ефимов Ю.П.* Современные проблемы и перспективы улучшения лесов селекционно-генетическими методами // Лесохозяйственная информация. 2008. № 3–4. С. 30–32.
- Загреев В.В.* Влияние полноты на текущий прирост сосновых насаждений // Лесное хозяйство. 1962. № 9. С. 42–47.
- Зайцев Г.Н.* Математический анализ биологических данных. М.: Высшая школа, 1991. 182 с.
- Калиниченко Н.П., Писаренко А.И., Смирнов Н.А.* Лесовосстановление на вырубках. М.: Лесная промышленность, 1973. 328 с.
- Лесные плантации (ускоренное выращивание ели и сосны). М.: Лесная промышленность, 1984. 248 с.
- Мелехов В.И., Бабич Н.А., Корчагов С.А.* Качество древесины сосны в культурах. Архангельск: Издательство АГТУ, 2003. 110 с.
- Меняйло Л.Н.* Гормональная регуляция ксилогенеза хвойных. Новосибирск: Наука, 1987. 184 с.
- Методы дендрохронологии. Красноярск: КрасГУ, 2000. 80 с.
- Писаренко А.И., Редько Г.И., Мерзленко М.Д.* Искусственные леса. Ч. 2. М.: Всероссийский научно-исследовательский информационный центр Лесресурс, 1992. 240 с.
- Плантационное лесоводство / под общ. ред. Шутова И.В. СПб.: СПбПУ, 2007. 366 с.
- Полубояринов О.И.* Плотность древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 160 с.
- Потылев В.Г.* Проблемы лесного селекционного семеноводства // Лесохозяйственная информация. 1997. № 3. С. 14–30.
- Пуряев А.С., Демаков Ю.П.* Структура лесов Предкамья Республики Татарстан // Научный журнал Кубанского аграрного университета. 2014. № 104 (10). С. 1–13.
- Рогозин М.В.* Селекция сосны обыкновенной для плантационного выращивания. Пермь: ПГНИУ, 2013. 200 с.
- Романов Е.М.* Воспроизводство лесов в новой стратегии перехода к устойчивому развитию лесного сектора России // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2021. № 1 (49). С. 5–22.
- Романов Е.М., Еремин Н.В., Нуриева Т.В.* Состояние и проблемы воспроизводства лесов России // Вестник Поволжского государственного технического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2007. № 1. С. 5–14.
- Романовский М.Г., Щекалев Р.В.* Продукционный бюджет кроны дерева: гиганты и карлики в древостое // Лесоведение. 2016. № 6. С. 438–444.
- Рябоконь А.П., Литаш Н.П.* Физико-механические свойства древесины сосны в культурах разной густоты // Лесоведение. 1981. № 1. С. 39–45.
- Севко О.А.* Моделирование оптимальной производительности сосновых древостоев по классам бонитета // Труды БГТУ. Сер.: Лесное хозяйство. 1994. Вып. 2. С. 88–91.

Тюкавина О.Н., Клевцов Д.Н., Дроздов И.И., Мелехов В.И. Плотность древесины сосны обыкновенной в различных условиях произрастания // ИВУЗ. Лесной журнал. 2017. № 6. С. 56–64.

Усольцев В.А., Цепордэй И.С. Квадиметрия фитомассы лесных деревьев: плотность и содержание сухого вещества. Екатеринбург: УГЛТУ, 2020. 178 с.

Царёв А.П., Лаур Н.В. Вопросы и проблемы плюсовой селекции // Лесной вестник. 2006. № 5. С. 118–123.

Царёв А.П., Погиба С.П., Тренин В.В. Селекция и репродукция лесных древесных пород. М.: Логос, 2002. 497 с.

Шинкаренко И.Б., Дзедзюля А.А. Оптимизация режимов густоты при целевом выращивании сосновых культур // Лесоведение и лесоводство: Обзорная информация ЦБНТИлесхоз. 1983. № 3. С. 1–40.

Штейнбок А.Г., Киселев В.В. Динамика полнот изреженных древостоев и целесообразность их реконструкции // Лесоведение и лесное хозяйство: республиканский межведомственный сборник. 1980. Вып. 15. С. 66–70.

Юодвалькис А.И., Озолинчус Р.В. Лесоводственно-биологические аспекты оптимизации первоначальной густоты сосновых насаждений // Лесное хозяйство. 1987. № 9. С. 20–22.

Groover A., Robischon M. Developmental mechanisms regulating secondary growth in woody plants // Current Opinion in Plant Biology. 2006. Vol. 9. P. 55–58.

Haffner V., Enjalric F., Lardet L., Carron M.P. Maturation of woody plants: a review of metabolic and genomic aspects // Annals of Forest Science. 1991. Vol. 48. P. 615–630.

Harper J.L. The effects of neighbors // Population Biology of Plants. L., 1977. P. 151–347.

Keddy P.A. Competitive hierarchies and centrifugal organization in plant communities // Perspectives on Plant Competition. San Diego, CA, 1990. P. 266–290.

Sharapov E., Demakov Y., Korolev A. Effect of Plantation Density on Some Physical and Technological Parameters of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) // Forests. 2024. Vol. 15, no. 2. Art. no. 233. DOI: 10.3390/f15020233.

Wedin D., Tilman D. Competition among grasses along a nitrogen gradient: initial conditions and mechanisms of competition // Ecological Monographs. 1993. Vol. 63. P. 199–229.

References

Besschetnova N.N. Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). Efficiency of selection of plus trees. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, 2016. 464 p. (In Russ.)

Bitvinskas T.T. Dendroclimatic studies. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1974. 172 p. (In Russ.)

Demakov Yu.P. Structure and patterns of forest development in the Mari El Republic. Yoshkar-Ola: Volga State University of Technology, 2018. 432 p. (In Russ.)

Demakov Yu.P. Results of long-term experiments on the creation and cultivation of Scots pine crops in the Mari El Republic. Yoshkar-Ola: Volga State University of Technology, 2022. 242 p. (In Russ.)

Demakov Yu. P., Puryaev A. S., Miftakhov T. F. Economic approach to the selection of target tree species for forest cultivation in the Kama region of the Republic of Tatarstan. *Bulletin of the Kazan State Agrarian University*, 2016, no. 4 (42), pp. 20–27. (In Russ.)

Demakov Yu.P., Nureeva T.V., Krasnov V.G., Ryzhkov A.A. Ecological and resource potential of forest plantations on ravine-gully lands of the Middle Volga region. *Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Forest. Ecology. Nature management*, 2017, no. 3 (35), pp. 73–87. (In Russ.)

Demakov Yu.P., Krasnov V.G. Changes in the structure and resource potential of forests in Chuvashia for the period from 1942 to 2014. *Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Forest. Ecology. Nature Management*, 2018, no. 1 (37), pp. 19–32. (In Russ.)

Demakov Yu.P., Nureeva T.V., Puryaev A.S., Krasnov V.G. Economic foundations and experience of plantation forest cultivation in the Middle Volga region. *Siberian Forestry Journal*, 2018, no. 2, pp. 3–14. (In Russ.)

Demakov Yu.P., Nureeva T.V. Patterns of change in the rank position of trees by their size in Scots pine cenopopulations. *Forest Science*, 2019, no. 4, pp. 274–285. (In Russ.)

Demakov Yu.P., Isaev A.V., Nureeva T.V. Experience of creating mixed forest crops in the Mari Trans-Volga region. *Siberian Forestry Journal*, 2022, no. 2, pp. 41–47. (In Russ.)

Demakov Yu.P., Romanov E.M., Krasnov V.G., Nureeva T.V. Experience of artificial forest restoration in the Middle Volga region and further strategy of actions to improve it. *Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Forest. Ecology. Nature Management*, 2021, no. 1 (49), pp. 23–46. (In Russ.)

Efimov Yu.P. Current problems and prospects for improving forests using selection and genetic methods. *Forestry information*, 2008, no. 3–4, pp. 30–32. (In Russ.)

Forest plantations (accelerated cultivation of spruce and pine). Moscow: Lesnaya promyshlennost, 1984. 248 p. (In Russ.)

Grinin A.S., Orekhov N.A., Novikov V.N. Mathematical modeling in ecology. Moscow: UNITY-DANA, 2003. 269 p. (In Russ.)

Groover A., Robischon M. Developmental mechanisms regulating secondary growth in woody plants. *Current Opinion in Plant Biology*, 2006, vol. 9, pp. 55–58.

Haffner V., Enjalric F., Lardet L. Carron M.P. Maturation of woody plants: a review of metabolic and genomic aspects. *Annals of Forest Science*. 1991, vol. 48, pp. 615–630.

Harper J.L. The effects of neighbors. *Population Biology of Plants*. London, 1977, pp. 151–347.

Juodvalkis A.I., Ozolinchus R.V. Silvicultural and biological aspects of optimizing the initial density of pine plantations. *Lesnoye khozyaystvo*, 1987, no. 9, pp. 20–22. (In Russ.)

- Kalinichenko N.P., Pisarenko A.I., Smirnov N.A. Reforestation in clearings. Moscow: Lesnaya promyshlennost, 1973. 328 p. (In Russ.)
- Keddy P.A. Competitive hierarchies and centrifugal organization in plant communities. *Perspectives on Plant Competition*. San Diego, CA, 1990, pp. 266–290.
- Melekhov V.I., Babich N.A., Korchagov S.A. Quality of pine wood in crops. Arkhangelsk: Arkhangelsk State Technical University, 2003. 110 p. (In Russ.)
- Menyailo L.N. Hormonal regulation of xylogenesis in conifers. Novosibirsk: Nauka, 1987. 184 p. (In Russ.)
- Methods of dendrochronology. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State University, 2000. 80 p. (In Russ.)
- Pisarenko A.I., Redko G.I., Merzlenko M.D. Artificial forests. Part 2. Moscow: All-Russian Research Information Center Lesresurs, 1992. 240 p. (In Russ.)
- Plantation forestry / under gen. ed. of I.V. Shutov. St. Petersburg: St. Petersburg State Polytechnical University, 2007. 366 p. (In Russ.)
- Plant hormones: regulation of concentration, relationship with growth and water exchange / Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Moscow: Nauka, 2007. 158 p. (In Russ.)
- Poluboyarinov O.I. Wood density. Moscow: Lesn. prom-st', 1976. 160 p. (In Russ.)
- Potylev V.G. Problems of forest selection seed production. *Forestry information*, 1997, no. 3, pp. 14–30. (In Russ.)
- Puryaev A.S., Demakov Yu.P. Structure of forests of the Pre-Kama region of the Republic of Tatarstan. *Scientific journal of the Kuban Agrarian University*, 2014, no. 104 (10), pp. 1–13. (In Russ.)
- Rogozin M.V. Selection of Scots pine for plantation cultivation. Perm: Perm State National Research University, 2013. 200 p. (In Russ.)
- Romanov E.M. Forest reproduction in the new strategy of transition to sustainable development of the forest sector of Russia. *Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Forest. Ecology. Nature Management*, 2021, no. 1 (49), pp. 5–22. (In Russ.)
- Romanov E.M., Eremin N.V., Nureeva T.V. State and problems of reproduction of Russian forests. *Bulletin of the Volga State Technical University. Series: Forest. Ecology. Nature management*, 2007, no. 1, pp. 5–14. (In Russ.)
- Romanovsky M.G., Shchekalev R.V. Production budget of a tree crown: giants and dwarfs in a tree stand. *Russian Journal of Forest Science*, 2016, no. 6, pp. 438–444. (In Russ.)
- Ryabokon A.P., Litash N.P. Physical and mechanical properties of pine wood in crops of different densities. *Russian Journal of Forest Science*, 1981, no. 1, pp. 39–45. (In Russ.)
- Sevko O.A. Modeling of optimal productivity of pine stands by quality classes. *Proceedings of the Belarusian State Technological University. Series: Forestry*, 1994, iss. 2, pp. 88–91. (In Russ.)
- Sharapov E., Demakov Y., Korolev A. Effect of Plantation Density on Some Physical and Technological Parameters of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). *Forests*, 2024, vol. 15, no. 2, art. no. 233. DOI: 10.3390/f15020233.

Shinkarenko I.B., Dzedzyulya A.A. Optimization of forest density regimes for targeted cultivation of pine crops. *Forestry and silviculture: Review information of the Central Scientific and Technical Institute of Forestry*, 1983, no. 3, pp. 1–40. (In Russ.)

Shteynbock A.G., Kiselev V.V. Dynamics of the density of thinned forest stands and the feasibility of their reconstruction. *Forestry and forestry: republican interdepartmental collection*, 1980, iss. 15, pp. 66–70. (In Russ.)

Tsarev A.P., Laur N.V. Issues and problems of plus selection. *Forestry Bulletin*, 2006, no. 5, pp. 118–123. (In Russ.)

Tsarev A.P., Pogiba S.P., Trenin V.V. Selection and reproduction of forest tree species. Moscow: Logos, 2002. 497 p. (In Russ.)

Tyukavina O.N., Klevtsov D.N., Drozdov I.I., Melekhov V.I. Wood density of Scots pine under different growing conditions. *Russian Forestry Journal*, 2017, no. 6, pp. 56–64. (In Russ.)

Usoltsev V.A., Tseporday I.S. Qualimetry of forest tree phytomass: density and dry matter content. Ekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2020. 178 p. (In Russ.)

Vidyakin A.I. Plus selection of pine and spruce: results and development prospects. *Forestry information*, 2008, no. 3–4, pp. 33–35. (In Russ.)

Vidyakin A.I. Efficiency of plus selection of woody plants. *Conifers of the boreal area*, 2010, vol. XXVII, no. 1–2, pp. 18–24. (In Russ.)

Wedin D., Tilman D. Competition among grasses along a nitrogen gradient: initial conditions and mechanisms of competition. *Ecological Monographs*, 1993, vol. 63, pp. 199–229.

Zagreev V.V. Effect of density on the current growth of pine stands. *Lesnoye khozyaystvo*, 1962, no. 9, pp. 42–47. (In Russ.)

Zaitsev G.N. Mathematical analysis of biological data. Moscow: Vysshaya shkola, 1991. 182 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 18.11.2024

Демаков Ю.П., Шарапов Е.С., Краснов В.Г., Королев А.С., Нуреева Т.В.

Обоснование целесообразности создания плантаций сосны обыкновенной на суглинистых почвах республики Марий Эл // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 162–180. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.162-180

Актуальность работы обусловлена необходимостью совершенствования комплекса мероприятий по воспроизводству и повышению эколого-ресурсного потенциала лесов. Цель работы – обоснование целесообразности создания плантаций сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в дубравных и судубравных лесорастительных условиях Республики Марий Эл, позволяющих сократить сроки выращивания насаждений, повысить количество и качество получаемой продукции.

Для написания статьи использованы лесоустроительные материалы, содержащие информацию о таксационных параметрах древостоев (более 45 тыс. выделов), а также данные натурной оценки, проведенной на 15 научных объектах в древостоях естественного происхождения и в культурах сосны обыкновенной, произрастающих в свежих дубравах и раменях Республики Марий Эл. Установлено, что породная структура лесов в дубравах и раменях Республики Марий Эл далека от оптимума и нуждается в коренном изменении. Наиболее высокую производительность имеют сосновые древостои, кульминация среднего годичного прироста запаса которых наступает в возрасте 45–55 лет, свидетельствуя об их хозяйственной спелости. Для повышения эколого-ресурсного потенциала лесов в данных лесорастительных условиях целесообразно создавать чистые по составу плантации сосны обыкновенной, запас стволовой древесины в которых к 45 годам может достичь при оптимальном режиме их выращивания более $500 \text{ м}^3 \times \text{га}^{-1}$. По базисной плотности их древесина не уступает древесине, выращенной в боровых условиях, составляя в этом возрасте около $460 \text{ кг} \times \text{м}^{-3}$ и достигая максимума в 90–120 лет. Многие деревья сосны способны дожить в богатых лесорастительных условиях до 200 лет и не поражаться при этом стволовыми гнилями.

Ключевые слова: Республика Марий Эл, дубравные и судубравные лесорастительные условия, деревья и древостои сосны обыкновенной, таксационные параметры, плотность древесины, динамика, математические модели.

Demakov Yu.P., Sharapov E.S., Krasnov V.G., Korolev A.S., Nureeva T.V.
Justification of the feasibility of creating Scots pine plantations on loamy soils of the Mari El Republic. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 162–180 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.162-180

The relevance of the paper is defined by the need of improving activities in the sphere of forest regeneration and increasing the forest potential from the ecological and resource point of view. The goal of this study is to summarize experience in establishing Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) plantations in the nemoral and subnemoral forest growth conditions of the Mari El Republic. Such plantations can provide a great amount of qualified wood in a shorter time than forest stands of the natural origin. For this paper, we used forest management documents containing the data on the taxation parameters of stands (over 45 thousands of strata) as well as the data of full-scale assessment performed at 15 research sites in the natural stands and Scots pine plantations growing in the fresh oakeries and ramens of the Mari El Republic. It is established that the forest species structure of oakeries and ramens in the Mari El Republic is far from optimal and needs to be radically changed. The highest productivity here is demonstrated by pine stands with the high point of the average annual increase in their stock occurring at the age of 45 to 55 years old and indicating their economic maturity. In order to increase the

ecological and resource potential of forests in these forest growth conditions, it is appropriate to establish pure Scots pine plantations that can give the stock of stem wood more than $500 \text{ m}^3 \times \text{ha}^{-1}$ by the age of 45 years old under the optimal conditions of their cultivation. In terms of basic density, their wood is as good as the wood grown in the pine forest conditions and amounts to about $460 \text{ kg} \times \text{m}^{-3}$ at this age and achieves the maximum at the age of 90 to 120 years old. In the rich forest growth conditions, many pine trees are capable to live up to 200 years old and avoid any damage by trunk rots.

Keywords: the Mari El Republic, nemoral and subnemoral forest growth conditions, Scots pine trees and stands, taxation parameters, wood density, dynamics, mathematical models.

ДЕМАКОВ Юрий Петрович – профессор кафедры лесных культур, селекции и биотехнологии Поволжского государственного технологического университета, профессор, доктор биологических наук, лауреат Государственной премии Республики Марий Эл. SPIN-код: 1270-0945. ORCID: 0009-0006-1084-4700.

424000, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия. E-mail: DemakovYP@volgattech.net

DEMAKOV Yuri P. – DSc (Biological), Associate Professor, Department of Forest Crops, Breeding and Biotechnology, Volga State University of Technology, Laureate of the State Prize of the Republic of Mari El. SPIN-code: 1270-0945. ORCID: 0009-0006-1084-4700.

424000. Lenin sq. 3. Yoshkar-Ola. Russia. E-mail: DemakovYP@volgattech.net

ШАРАПОВ Евгений Сергеевич – профессор кафедры строительных конструкций и водоснабжения Поволжского государственного технологического университета, доцент, доктор технических наук. ORCID: 0000-0002-6500-5377. SPIN-код: 9119-8261. ResearcherID: D-7953-2015

424000, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия. E-mail: SharapovES@volgattech.net

SHARAPOV Evgenii S. – DSc (Technical), Professor, Department of Building Structures and Water Supply, Volga State University of Technology. ORCID: 0000-0002-6500-5377. SPIN-code: 9119-8261. ResearcherID: D-7953-2015

424000. Lenin sq. 3. Yoshkar-Ola. Russia. E-mail: SharapovES@volgattech.net

КРАСНОВ Виталий Геннадьевич – профессор кафедры лесных культур, селекции и биотехнологии Поволжского государственного технологического университета, доктор сельскохозяйственных наук. ORCID: 0000-0003-0742-0393. SPIN-код: 3179-8907.

424000, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия. E-mail: KrasnovVG@volgattech.net

KRASNOV Vitaly G. – DSc (Agricultural), Professor, Department of Forest Crops, Breeding and Biotechnology, Volga State University of Technology. ORCID: 0000-0003-0742-0393. SPIN-code: 3179-8907

424000. Lenin sq. 3. Yoshkar-Ola. Russia. E-mail: KrasnovVG@volgatech.net

КОРОЛЕВ Александр Сергеевич – старший научный сотрудник департамента научной и международной деятельности, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности Поволжского государственного технологического университета, кандидат технических наук. ORCID: 0009-0000-1370-1285. SPIN-код: 8836-4618.

424000, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия. E-mail: KorolevAS@volgatech.net

KOROLEV Alexander S. – PhD (Technical), Senior Researcher Department of scientific and international activities, Associate Professor Department of Emergency Management, Volga State University of Technology. ORCID: 0009-0000-1370-1285. SPIN-code: 8836-4618.

424000. Lenin sq. 3. Yoshkar-Ola. Russia. E-mail: KorolevAS@volgatech.net

НУРЕЕВА Татьяна Владимировна – доцент кафедры лесных культур, селекции и биотехнологии Поволжского государственного технологического университета, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 8769-5779. AuthorID: 398116.

424000, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия. E-mail: NureevaTV@volgatech.net

NUREEVA Tatyana V. – PhD (Agricultural), Associate Professor, Department of Forest Crops, Breeding and Biotechnology, Volga State University of Technology. SPIN-code: 8769-5779. AuthorID: 398116.

424000. Lenin sq. 3. Yoshkar-Ola. Russia. E-mail: NureevaTV@volgatech.net

Р.В. Котельников, Е.А. Шварц

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОХРАНЫ ЛЕСОВ ОТ ПОЖАРОВ
В СВЕТЕ ПОСЛЕДНИХ ИЗМЕНЕНИЙ, ВНЕСЕННЫХ
В ЛЕСНОЙ КОДЕКС РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Введение. Охрана лесов от пожаров – наиболее важная и организационно самая сложная составляющая не только мер по сохранению лесов, но и всего лесного хозяйства в целом. Именно меры обеспечения пожарной безопасности в лесах являются актуальным направлением повышения эффективности управления в сфере природопользования [Коршунов и др., 2019b; Харьков, 2023]. Специфика государственного устройства Российской Федерации определяет необходимость существования целой системы взаимоувязанных нормативных правовых актов, регулирующих лесопожарные вопросы на всех уровнях [Мартынюк, 2020; Котельников, 2022].

Особенности конституционно-правового статуса Российской Федерации, принцип разграничения предметов ведения и полномочий между региональным и федеральным уровнем власти и так называемая «асимметрия федерализма» [Арлашкин и др., 2015; Чеботарев, 2020], серьезно повлияли на организационную систему охраны лесов от пожаров. Важным фактором также стал механизм делегирования полномочий, когда они могут передаваться (например, с федерального на региональный уровень) с одновременной передачей финансирования.

Серьезные отличия природно-климатических, лесопирологических и социально-экономических условий территорий не дают возможности создать однородную типовую систему охраны лесов [Коршунов и др., 2019a]. Изначально Лесной кодекс Российской Федерации от 04.12.2006 № 200-ФЗ предполагал весьма либеральный подход к лесным отношениям. Ведение лесного хозяйства на землях лесного фонда (большая часть лесов, за исключением федеральных особо охраняемых природных территорий, земель обороны и безопасности и некоторых других), являясь федеральным полномочием, передано субъектам Российской Федерации (с передачей финансирования на эти цели) [Шпаковский, 2018; Горбунова, Кулагина, 2020]. Регионам предоставлялось право самим выбирать

стратегию организации охраны лесов, виды и объемы сил и средств пожаротушения. При этом федеральный орган оставлял за собой право контроля эффективности и качества осуществления переданных полномочий, причем по вполне конкретным обобщенным критериям (например, доля площади погибших от огня лесных насаждений). Существующие правила (например, Правила тушения лесных пожаров, утвержденные приказом Минприроды России от 01.04.2022 № 244) давали лишь общие организационные ограничения (например, по времени прибытия подразделений к месту тушения). Но подобный подход на практике не принес положительного эффекта, в первую очередь из-за серьезного недофинансирования. Минимум требований, практически полное отсутствие нормативов и регламентов выполнения работ дали возможность главам регионов перераспределять финансовые ресурсы с лесопожарной тематики на более насущные, с их точки зрения, задачи. При этом причинами проблем с лесными пожарами намеренно считались только природные факторы [Жаринов и др., 2020].

Кроме того, с целью оптимизации использования ресурсов пожаротушения, на отдельных территориях (зонах контроля лесных пожаров) в случае, если прогнозируемые затраты на тушение существенно превышают возможный вред от лесного пожара (при этом нет угрозы перехода огня на населенные пункты и объекты экономики), Комиссией по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций и обеспечению пожарной безопасности субъекта Российской Федерации может быть принято решение о прекращении (приостановке) работ по его тушению. В условиях сложной финансовой ситуации также имеются случаи злоупотребления таким правом (например, когда в зоне контроля полностью отказываются от тушения пожаров) [Жаринов и др., 2020].

В целях снижения рисков подобных нарушений, по инициативе Рослесхоза (а иногда и по инициативе Государственной думы) в Лесной кодекс постепенно вносились изменения, направленные на ужесточение требований к организации охраны лесов от пожаров. Федеральным законом от 29.12.2010 № 442-ФЗ были выведены требования по разработке и согласованию Планов тушения лесных пожаров, нормативов обеспеченности субъектов Российской Федерации лесопожарными формированиями и средствами пожаротушения и т. д. Структура нормативного правового обеспечения в области охраны лесов от пожаров сильно усложнилась [Шпаковский, 2018; Абсалямова, Кохно, 2021; Котельников, 2022]. В лесном законодательстве появился ряд пробелов и противоречий,

в том числе со смежным законодательством. К некоторым из них можно отнести:

- отсутствие требований к лесопожарному зонированию;
- отсутствие увязки между лесным и воздушным законодательством в части лесоавиационных работ;
- отсутствие увязки между лесным законодательством и законодательством в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций;
- отсутствие требований к плану межрегионального маневрирования ресурсами;
- пересечение полномочий федерального и регионального уровня по тушению на землях лесного фонда;
- и ряд других.

Среди специалистов даже возникали предложения о полной замене Лесного кодекса [Мартынук, 2020], но пока Рослесхозом и Минприроды России за основу дальнейшего совершенствования лесного законодательства взята концепция точечных изменений отдельных норм.

Ключевой принцип организации тушения лесных пожаров (как в России, так и практически во всем мире) основывается на привлечении к тушению специализированных учреждений, ресурсы которых рассчитаны на среднее число возникающих лесных пожаров (см., например, Нормативы обеспеченности субъекта Российской Федерации лесопожарными формированиями, пожарной техникой и оборудованием, противопожарным снаряжением и инвентарем, иными средствами предупреждения и тушения лесных пожаров, утвержденные Распоряжением Правительства Российской Федерации от 19.07.2019 № 1605 р). Так как повышенное число лесных пожаров возникает по территории неравномерно (ЧС в лесах в среднем ежегодно объявляется в 17–20 регионах), для их тушения рациональным видится перераспределение ресурсов из других (не горимых) регионов. Так как из-за региональной подчиненности и разделения бюджетов имеются существенные сложности с маневрированием региональных лесопожарных формирований, основная ставка делается на специально сформированный федеральный резерв парашютно-пожарной службы ФБУ «Авиалесоохрана» (далее – федеральный резерв), что не совсем вписывается в концепцию разделения лесных полномочий и ставит под сомнение правомерность сформировавшейся схемы финансирования [Жаринов и др., 2020; Краскова, Антипин, 2022]. Это связано в первую

очередь с тем, что полномочия по тушению пожаров на землях лесного фонда (и соответствующее финансирование) переданы субъектам Российской Федерации.

Постановка проблемы. Масштабы негативных последствий лесных пожаров по нашему мнению могут в значительной степени характеризовать эффективность государственного управления в сфере охраны окружающей среды и ставить под сомнение возможность реализации перспективных планов достижения «углеродной нейтральности» российской экономики, где центральное место фактически отведено естественному поглощению углерода лесами, площадь которых из года в год фатально сокращается вследствие природных и антропогенных пожаров [Харьков, 2023].

В конце июля 2023 г. в Лесной кодекс Российской Федерации внесены существенные изменения, которые серьезно затронут всю систему охраны лесов от пожаров (Федеральный закон от 24.07.2023 № 343-ФЗ «О внесении изменений в Лесной кодекс Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации»). На фоне сложной внешнеполитической обстановки общественное обсуждение законопроекта осталось незамеченным среди независимых экспертов, и утверждение столь значимых правок было стремительным, документ принят во втором чтении. Несмотря на то, что изменения бесспорно правильные и своевременные, отдельные положения все-таки содержат ряд спорных моментов, которые целесообразно либо скорректировать, либо нивелировать на уровне подзаконных актов, что будет показано ниже.

Обсуждение. Наиболее серьезными правками можно назвать новеллы, связанные с применением федерального резерва. Несмотря на то, что в соответствии с пунктом 4 части 1 статьи 53, а также пунктом 9 части 2 статьи 53.1 Лесного кодекса у Правительства Российской Федерации и раньше были полномочия устанавливать требования к созданию резервов, а также вводить любые иные меры пожарной безопасности в лесах, создание и применение федерального резерва и ранее противоречило концепции Лесного кодекса, связанной с разделением полномочий по охране лесов между различными уровнями власти.

Охрана лесов от пожаров, включая тушение пожаров, на землях лесного фонда (а это основная часть лесов) передана субъектам Российской Федерации. Вместе с тем непостоянный характер высокой горимости обуславливает активное маневрирование ресурсов пожаротушения по

всей стране, что очень затрудняет разделение финансирования между регионами. С технологической точки зрения эту проблему частично решил созданный и активно развивающийся (после тяжелых по своим последствиям пожаров 2010 г.) федеральный резерв парашютно-десантной пожарной службы ФБУ «Авиалесоохрана» [Ковалев, 2021; Краскова, Антипин, 2022]. Но с точки зрения финансирования, такой подход никак не вписывался в концепцию разделения лесных полномочий. Приходилось оформлять его применение заключением коммерческих договоров с регионами, что вызывало много вопросов со стороны проверяющих органов (это отражено, например, в отчетах о проверках Счетной палаты Российской Федерации на официальном сайте). Выделение из мероприятий по тушению и передача на федеральный уровень тушения пожаров взрывчаткой и искусственным вызыванием осадков частично решило проблему федерального финансирования подразделений федерального резерва, но все так же требовало заключения коммерческих договоров на прочие работы по тушению.

В наше время существует несколько альтернативных способов решения проблемы применения резерва. Одним из таких вариантов могла бы быть реорганизация федерального резерва путем создания его из числа наиболее подготовленных региональных команд (с федеральными полномочиями по его переброске и применению к тушению пожаров). При этом резерв бы финансировался из региональных средств, а в свободное от межрегионального маневрирования время команды бы работали в своем регионе. Для того, чтобы такая схема «работала», потребовалось бы разработать и закрепить в нормативных актах порядок компенсации расходов регионам на тот период, когда часть их подразделений работает в другом субъекте Российской Федерации. Пока бюджетное законодательство такой механизм не предусматривает.

Но в законодательстве был выбран вариант введения нового понятия, такого, как «меры экстренного реагирования», эффективность которого еще предстоит оценить. Особо следует отметить, что заключение коммерческих договоров с регионами уже будет запрещено. Финансирование на содержание и применение резерва будет перераспределено из лесных субвенций, предназначавшихся регионам.

Решение о применении федерального резерва принималось Федеральным штабом тушения на основании запросов регионов, и после такого решения резерв переходил в подчинение региона (так как полномочия по тушению были именно у него). Теперь тушение в рамках реализации

мер экстренного реагирования и тушение в рамках охраны лесов от пожаров – юридически разные мероприятия с разными источниками финансирования.

Сейчас привлечение резерва будет на основании конкретных критерий (приказ Рослесхоза от 26.12.2023 № 1168), и применять его будет именно ФБУ «Авиалесоохрана». Таким образом, ответственность за тушение лесных пожаров с применением резерва будет возложена на Рослесхоз. Это не коррелирует с концепцией переданных полномочий (при которой ответственным за тушение пожаров является высшее должностное лицо субъекта – губернатор) и вызовет ряд сложностей, в том числе при оценке эффективности работы. На этом фоне еще большую актуальность получают вопросы, связанные с координацией сил и средств пожаротушения (особенно если они работают на одном пожаре).

Вероятно, как и ранее, сотрудники резерва ФБУ «Авиалесоохрана» будут подключаться к тушению уже на этапе особо крупных пожаров, что не всегда эффективно. К сожалению, классическая концепция авиалесоохраны по раннему началу тушения малыми, но хорошо оснащенными мобильными силами к такой ситуации не применима. Несмотря на то, что выбор способов, стратегии и тактики тушения существенно влияет на затраты, технологическая и экономическая оправданность принимаемых решений пока никак не контролируется.

С точки зрения логики, кто несет ответственность за снижение негативных последствий природных пожаров на конкретной территории, тот и должен обладать ресурсами на их тушение. Учитывая, что ресурсы всегда ограничены, именно тот, кто отвечает за пожары, и должен принимать решения, каким способом тушить (например, тушение наземным способом, экономя средства на ликвидацию возможных будущих пожаров, или вызвать самолеты-танкеры и потратить весь годовой лимит за пару дней).

Смешение полномочий косвенно приводит и к смешению («размыванию») ответственности, что снижает эффективность их исполнения. В случае пожаров, могут приниматься решения, основанные на политических целях отдельных руководителей, в ущерб производственной рациональности и экономической эффективности.

Таким образом, насколько новые изменения решили проблемы с федеральным резервом, покажет правоприменительная практика.

Другим важным изменением, которое затронет предотвращение лесных пожаров, является выделение из комплексного лесного планирова-

ния в отдельные документы планов противопожарного обустройства территорий.

В соответствии с действующей редакцией Лесоустроительной инструкции проектирование мероприятий по сохранению лесов является составной частью лесоустройства. На данный момент уже существуют соответствующие разделы в Лесном плане субъекта Российской Федерации и в Лесохозяйственном регламенте лесничеств, но они утверждались раз в 10 лет, и их содержание часто критиковалось специалистами. Изменениями предполагается выделить Планы по противопожарному обустройству в отдельный документ (разработка раз в 5 лет), причем как План противопожарного обустройства региона в целом, так и соответствующие планы по лесничествам. План противопожарного обустройства лесов на территории субъекта Российской Федерации будет утверждаться губернатором.

Насколько такое решение будет эффективным, покажет правоприменительная практика. В отличие от Планов тушений, которые утверждаются ежегодно и являются только организационными документами, для полноценного планирования противопожарных мероприятий требуется разработка соответствующего проекта. Так как план придется реализовывать, например, создавать противопожарные барьеры, осуществлять рубку насаждений и т. д., в том числе с привлечением техники, для оценки объемов и затрат нужно не только производить более сложные расчеты, но и проводить полевые работы, включая инженерные изыскания. В советские годы существовала практика разработки Проектов противопожарного обустройства территорий. Вероятно, именно такая цель была у авторов этой законодательной инициативы. Но в существующем виде, это всего лишь документ лесного планирования.

Возникает много вопросов и по переходному периоду. Можно ли продолжать плановые работы по противопожарному обустройству в рамках существующих лесохозяйственных регламентов или нужно ждать утверждения планов? Также не решен вопрос с финансированием работ по разработке указанных документов.

У этой проблемы есть два аспекта. На момент написания статьи ещё ни один подобный план полностью не реализован и сохраняются сомнения по поводу целесообразной глубины их проработки. Если считать План аналогом Проектов противопожарного обустройства¹, которые существо-

¹ Указания по проектированию противопожарных мероприятий в лесах СССР. Одобрены Госкомлесхозом СССР 29.01.1982.

вали во второй половине XX века, то для его разработки нужны полевые работы, инженерные изыскания и т. д., что потребует колоссальных финансовых вложений уже на этапе проектирования. Если рассматривать его просто как план работ, то он практически не будет отличаться от уже существующих обобщенных планов, входящих в состав Лесного плана. Причем в отличие от Планов тушения (чисто организационных документов), для реализации плана обустройства нужно реально выделять технику и ресурсы. Таким образом, все равно придется дополнительно разрабатывать технические Проекты на выполнение указанных работ, и шансы, что реальные затраты совпадут с указанными в плане, будут минимальными.

Есть и второй аспект проблемы. Учитывая определенную размытость существующих нормативов, ряд регионов может по максимально возможным значениям запланировать все возможные мероприятия (включая наиболее затратные лесные дороги), а в условиях распределительной системы расчета субвенций средств на их выполнение будет выделено на порядок меньше. Может сложиться ситуация, когда по сводным планам и паспортам готовности большинство регионов будут не готовы (или ограниченно готовы) к лесным пожарам.

Интересным можно считать изменения, связанные с лесопожарным зонированием. Принятый в России (как и во многих развитых странах) дифференцированный подход к организации охраны позволяет оптимизировать затраты, увеличив уровень охраны на тех территориях, где это необходимо, за счет снижения его там, где меньше пожаров и их влияние на экономику минимально.

К сожалению, в России есть только три основные градации, и отличаются они только способом охраны (авиационный, наземный и там, где нет планового авиапатрулирования, а тушение производится с применением авиации). Такая концепция является устаревшей. На практике в каждой из зон приходится применять как авиацию, так и наземные силы, не говоря про космические методы мониторинга, которые упоминаются в Лесном кодексе как один из способов охраны и применяются повсеместно.

Центр лесной пирологии (г. Красноярск) давно выступает за внесение изменений, которые бы позволили выделять зоны не по способам, а по уровням охраны. Это позволило бы более рационально распределять ресурсы пожаротушения (в том числе устанавливать разную периодичность проведения авиационного патрулирования, а также разные нормативы оснащенности лесопожарных формирований). При этом фигурирующее в упомянутых Правилах тушения лесных пожаров технологическое понятие

«зон контроля лесных пожаров», правомочность которого вызывала сомнение у некоторых специалистов и недовольство природоохранных организаций и общественности, официально включили в состав лесопожарного зонирования.

Зоны контроля лесных пожаров – это выделенные в установленном порядке (регионами) части удаленных и труднодоступных территорий, на которых может быть принято решение о прекращении или приостановке работ по тушению, когда прогнозируемые затраты на тушение лесного пожара превышают прогнозируемый вред, который может быть им причинен.

Упомянутые изменения Лесного кодекса предусматривают, что зоны контроля становятся частью лесопожарного зонирования (федеральное полномочие), но зоны контроля все также будут выделяться регионами, хотя и по согласованию с Рослесхозом. Фактически это можно рассматривать как еще одно «переданное» полномочие. Критерии выделения зон контроля на данный момент уже установлены приказом Минприроды России (нормативным актом), а с учетом новой редакции Лесного кодекса установлены приказом Рослесхоза (распорядительным актом). Наблюдается определенная несогласованность правовых норм, которую, вероятно, придется исправлять, внося необходимые разъяснения нормативными правовыми актами.

К спорным можно отнести изменения, связанные с основой лесопожарного зонирования. Действовавшее до 2023 г. зонирование, как и предписывал Лесной кодекс, было выполнено исходя из экономического и экологического значения лесов, а также социально-экономического развития территорий и природной пожарной опасности лесов. В новой редакции оно должно зависеть только от природной пожарной опасности лесов, что абсолютно неосуществимо (из-за фрагментарного распределения таких участков).

Вместе с тем никаких требований к процедуре проведения зонирования, а также формату его утверждения нет. Несмотря на то, что от лесопожарного зонирования существенно зависят затраты на охрану территорий, на момент написания статьи методика расчета субвенций на реализацию переданных регионам полномочий, куда входит и тушение, эти значения не учитывает, как не учитывает и реализацию на территории региона мер экстренного реагирования.

Безусловно положительным моментом является легализация такого мероприятия, как противопожарная пропаганда. Это важный фактор сни-

жения лесопожарных рисков [Бердникова, 2021]. Теперь данное мероприятие будет финансироваться в плановом порядке, а не выполняться по остаточному принципу за счет экономии средств.

Полезным изменением в Лесном кодексе можно считать разрешение создавать в защитных лесах лесные дороги. Это позволит улучшить транспортную доступность лесов, что также скажется на эффективности мер по охране лесов от пожаров.

Заключение. Несмотря на ряд появившихся противоречий и неопределенностей, в целом изменения можно считать положительными. Вместе с тем необходимо дальнейшее совершенствование законодательных и управлеченческих механизмов в целях эффективного предотвращения лесных пожаров и борьбы с ними, которые прежде всего должны быть направлены на:

1. корректировку подходов к лесопожарному зонированию, в том числе увязку его с регламентацией работы лесопожарных формирований в каждой зоне, нормативами обеспеченности регионов силами и средствами пожаротушения, а также соответствующими изменениями методики выделения средств на выполнение регионами переданных федеральных полномочий в области лесного хозяйства;
2. внедрение механизмов оценки качества (адекватности и целесообразности) управлеченческих решений в области охраны лесов, включая выбор тактики и способов тушения;
3. повышение качества документов стратегического планирования, в том числе в части дублирования их между собой;
4. обеспечение координации между различными элементами лесного планирования, включая Лесные планы, Планы противопожарного обустройства, а также бюджетные проектировки.

Особо хочется отметить, что качество подзаконных актов прямо пропорционально сроку, выделенному на их разработку. Все документы должны быть разработаны с учетом мнения научного сообщества, а часть из них – только по результатам соответствующей научно-исследовательской работы. Также открытым остается вопрос переходного периода, связанного с изменением планирования мер по противопожарному обустройству территорий.

Сведения о финансировании исследования. Исследование выполнено при поддержке гранта Минобрнауки РФ (Соглашение № 075-15-2024-554 от 24.04.2024).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Абсалямова Д.Э., Кохно О.А.* Проблемы правового регулирования охраны лесов от пожаров // Аллея Науки. 2021. Т. 2, № 5 (56). С. 700–705.
- Арлашкін И.Ю., Дерюгин А.Н., Прока К.А.* Разграничение полномочий между уровнями власти в Российской Федерации: Бюджетные аспекты // Финансовый Журнал. 2015. Т. 4, № 26. С. 85–93.
- Бердникова Л.Н.* Работа с населением по предупреждению пожаров в лесу // Лесной Вестник. 2021. Т. 25, № 4. С. 59–68. DOI: 2542-1468-2021-4-59-68.
- Горбунова О.И., Кулагина А.Н.* О совершенствовании системы управления лесами: Проблемы и направления развития // Азимут Научных Исследований: Экономика и Управление. 2020. Т. 9, № 1 (30). С. 184–187. DOI: 10.26140/anie-2020-0901-0045.
- Жаринов С.Н., Голубева Е.И., Зимин М.В.* Концептуальные основы организации охраны лесов от пожаров // Вопросы лесной науки. 2020. Т. 3, № 3. С. 1–8. DOI: 10.31509/2658-607x-2020-3-3-1-8
- Ковалев Н.А.* Авиационной охране лесов России–90 лет! // Лесохозяйственная информация. 2021. № 2. С. 5–19. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2021.2.01
- Коршунов Н.А., Мартынюк А.А., Савченкова В.А., Калинин М.С.* Оценка состояния средств тушения лесных пожаров и экономической эффективности их применения // Лесохозяйственная информация. 2019а. № 1. С. 77–88. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2019.1.07.
- Коршунов Н.А., Савченкова В.А., Перминов А.В., Калинин М.С.* Оценка состояния лесопожарной системы страны // Лесохозяйственная информация. 2019б. № 3. С. 82–93. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2019.3.07.
- Котельников Р.В.* Нормативная правовая база охраны лесов от пожаров: метод. пособ. Пушкино: ВНИИЛМ, 2022. 52 с.
- Краскова А.Н., Антипин А.В.* Совершенствование системы авиационной охраны лесов от пожаров // Baikal Research Journal. 2022. Т. 13, № 4. С. 4. DOI: 10.17150/2411-6262.2022.13(4).4.
- Мартынюк А.А.* О концептуальных подходах к новой редакции Лесного кодекса Российской Федерации // Лесохозяйственная информация. 2020. № 2. С. 5–24. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2020.2.01.
- Харьков В.Н.* Экологически эффективное природопользование как фактор устойчивого развития Российской Федерации // Государственная власть и местное самоуправление. 2023. № 3. С. 8–11. DOI: 10.18572/1813-1247-2023-3-8-11.
- Чеботарев Г.Н.* Конституционно-правовые механизмы формирования единой системы публичной власти в Российской Федерации // Российский Юридический Журнал. 2020. Т. 6, № 135. С. 9–17. DOI: 10.34076/2071-3797-2020-6-9-17.
- Шпаковский Ю.Г.* Современные проблемы правового регулирования охраны лесов от пожаров // Lex Russica (Русский Закон). 2018. Т. 1, № 134. С. 43–56. DOI: 10.17803/1729-5920.2018.134.1.043-056.

References

- Absalyamova D.E., Kokhno O.A.* Problems of legal regulation of forest protection against fire. *Alley of Science*, 2021, vol. 2, no. 5 (56), pp. 700–705. (In Russ.)
- Arlashkin I.Y., Deryugin A.N., Proka K.A.* Delimitation of powers between the levels of power in the Russian Federation: Budgetary aspects. *Financial Journal*, 2015, vol. 4, no. 26, pp. 85–93. (In Russ.)
- Berdnikova L.N.* Work with citizens on preventing forest fires. *Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 4, pp. 59–68. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-4-59-68 (In Russ.)
- Chebotarev G.N.* Constitutional and legal mechanisms of formation of a unified system of public power in the Russian Federation. *Russian Law Journal*, 2020, vol. 6, no. 135, pp. 9–17. DOI: 10.34076/2071-3797-2020-6-9-17 (In Russ.)
- Gorbunova O.I., Kulagina A.N.* The improvement of forest management system: problems and development directions. *Azimuth of Scientific Research: Economics and Administration*, 2020, vol. 9, no. 1 (30), pp. 184–187. DOI: 10.26140/anie-2020-0901-0045 (In Russ.)
- Kharkov V.N.* Environmentally effective nature management as a factor of sustainable development of the Russian Federation. *State Power and Local Self-government*, 2023, no. 3, pp. 8–11. DOI: 10.18572/1813-1247-2023-3-8-11. (In Russ.)
- Korshunov N.A., Martynyuk A.A., Savchenkova V.A., Kalinin M.S.* Condition assessment of the means of fighting forest fires and economic efficiency of their application. *Forestry Information*, 2019a, no. 1, pp. 77–88. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2019.1.07. (In Russ.)
- Korshunov N.A., Savchenkova V.A., Perminov A.V., Kalinin M.S.* Assessment of forest fire system of the country. *Forestry Information*, 2019b, no. 3, pp. 82–93. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2019.3.07. (In Russ.)
- Kotelnikov R.V.* Normative legal base of forest protection from fires: methodical manual. Pushkino: VNIILM, 2022. 52 p. (In Russ.)
- Kovalev N.A.* Aviation protection of Russian forests – 90 years! *Forestry information*, 2021, no. 2, pp. 5–19. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2021.2.01. (In Russ.)
- Kraskova A.N., Antipin A.V.* System improvement of aviation protection of forests from fires. *Baikal Research Journal*, 2022, vol. 13, no. 4, pp. 4. DOI: 10.17150/2411-6262.2022.13(4).4. (In Russ.)
- Martynyuk A.A.* Concept Approaches to the Russian Federation Forest Code New Version. *Forestry Information*, 2020, no. 2, pp. 5–24. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2020.2.01. (In Russ.)
- Shpakovsky Y.G.* Contemporary problems of legal regulation of forest fire protection. *Lex Russica (Russian Law)*, 2018, vol. 1, no. 134, pp. 43–56. DOI: 10.17803/1729-5920.2018.134.1.043-056. (In Russ.)
- Zharinov S.N., Golubeva E.I., Zimin M.V.* Conceptual bases of the organization of forest fire protection. *Voprosy lesnoj nauki*, 2020, vol. 3, no. 3, pp. 1–8. DOI: 10.31509/2658-607x-2020-3-3-1-8. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 24.11.2024

Котельников Р.В., Шварц Е.А. Совершенствование охраны лесов от пожаров в свете последних изменений, внесенных в Лесной кодекс Российской Федерации // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 181–195. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.181-195

Охрана лесов от пожаров – наиболее важная функция лесного хозяйства. Особенности конституционно-правового статуса Российской Федерации, основанные на принципах разделения полномочий, серьезно повлияли на организационную систему охраны лесов от пожаров. Лесной кодекс Российской Федерации 2006 г., в части охраны лесов от пожаров, изначально был достаточно либеральным, но впоследствии в него вносились изменения, связанные с установлением требований ограничений и нормативов. Серьезные отличия природно-климатических, лесопирологических и социально-экономических условий регионов обуславливают необходимость введения лесопожарного зонирования, а также маневрирования ресурсами пожаротушения, в том числе специально созданным федеральным резервом. Внесение в конце июля 2023 г. изменений в Лесной кодекс Российской Федерации явилось очередным серьезным шагом в процессе практически непрерывного совершенствования лесного законодательства. К ключевым изменениям можно отнести нормы, связанные с введением понятия мер экстренного реагирования, новый подход к планированию мероприятий по противопожарному обустройству лесов и ряд других. Анализ изменений позволил выявить новые противоречия и потенциальные организационно-финансовые проблемы. Распределение полномочий по тушению лесных пожаров между федеральным и региональным уровнем упрощает вопросы маневрирования ресурсами, но порождает ряд неопределенностей, включая вопрос ответственности за тушение лесных пожаров со стороны федеральных и региональных органов власти. Авторами предложены ряд направлений совершенствования законодательных и управлеченческих механизмов в целях эффективного предотвращения лесных пожаров и борьбы с ними, ключевыми из которых являются корректировка концепции лесопожарного зонирования, а также внедрение механизмов оценки качества (адекватности и целесообразности) управлеченческих решений в области охраны лесов, включая выбор тактики и способов тушения лесных пожаров.

Ключевые слова: охрана лесов от пожаров, изменения в лесном законодательстве, лесопожарное зонирование.

Kotelnikov R.V., Shvarts E.A. Improving forest fire protection in the light of recent amendments to the Forest code of the Russian Federation. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 181–195 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.181-195

Protection of forests from fires is the most important function of forestry. The peculiarities of the constitutional and legal status of the Russian Federation, based on the principles of separation of powers, have seriously affected the organizational system of forest fire protection. The 2006 Forest Code of the Russian Federation, in terms of protecting forests from fires, was initially quite liberal, but subsequently it was amended to establish requirements for restrictions and standards. Serious differences in the climatic, forest-ecological and socio-economic conditions of the regions necessitate the introduction of forest fire zoning, as well as maneuvering of fire extinguishing resources, including a specially created federal reserve. The introduction of amendments to the Forest Code of the Russian Federation at the end of July 2023 was another serious step in the process of almost continuous improvement of forest legislation. The key changes include the norms related to the introduction of the concept of emergency response measures, a new approach to planning measures for fire protection of forests, and a number of others. The analysis of the changes revealed new contradictions and potential organizational and financial problems. The distribution of powers to extinguish forest fires between the federal and regional levels simplifies the issues of maneuvering resources, but generates a number of uncertainties, including the issue of responsibility for extinguishing forest fires on the part of federal and regional authorities. The authors propose a number of ways to improve legislative and managerial mechanisms for the effective prevention and control of forest fires, the key of which are the adjustment of the concept of forest fire zoning, as well as the introduction of mechanisms for assessing the quality (adequacy and expediency) of management decisions in the field of forest protection, including the choice of tactics and methods of extinguishing forest fires.

Keywords: forest fire protection, changes in forest legislation, forest fire zoning.

КОТЕЛЬНИКОВ Роман Владимирович – директор филиала ФБУ ВНИИЛМ «Центр лесной пирологии» (г. Красноярск), ведущий научный сотрудник лаборатории глобальных климатических вызовов Института географии РАН (Москва), кандидат технических наук. SPIN-код: 6718-0620. ORCID: 0000-0002-9984-5913.

660062, ул. Крупской, д. 42, г. Красноярск, Россия. E-mail: kotelnikovrv@firescience.ru

KOTELNIKOV Roman V. – PhD (Technical), Director of the branch of FBU VNIILM «Forest Pyrology Centre» (Krasnoyarsk), Leading Researcher of the Laboratory of Global Climate Challenges, Institute of Geography, Russian Academy of Sciences (Moscow). SPIN-code: 6718-0620. ORCID: 0000-0002-9984-5913.

660062. Krupskaya str. 42. Krasnoyarsk. Russia. E-mail: kotelnikovrv@firescience.ru

ШВАРЦ Евгений Аркадьевич – руководитель Центра ответственного природопользования ИГ РАН, профессор факультета географии и геоинформационных технологий ВШЭ, доктор географических наук, заслуженный эколог РФ. SPIN-код: 8347-3102. ORCID: 0000-0002-6828-4367.

119017, Старомонетный пер., д. 29, стр. 4, каб. 10, г. Москва, Россия. E-mail: e.a.shvarts@igras.ru

SHVARTS Evgeny A. – DSc (Geography), Head of Center for responsible use of natural resources, Institute of Geography, Russian Academy of Sciences; Professor, Faculty of Geography and Geoinformation Technologies, HSE; Honored Ecologist of Russian Federation. SPIN-code: 8347-3102, ORCID: 0000-0002-6828-4367

119017. Staromonetny lane 29. Build. 4. Room. 10. Moscow. Russia. E-mail: e.a.shvarts@igras.ru

Т.П. Новикова, С.В. Ребко, Е.П. Петрищев, А.И. Новиков

**РАННИЙ РОСТ КУЛЬТУР
(*PINUS SYLVESTRIS* L. VAR. *NEGORELSKAYA*),
ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ СЕМЯН
С ИЗВЕСТНЫМИ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИМИ
И МОРФОМЕТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ**

Введение. Для лесных вегетирующих растений, в частности, культур сосны обыкновенной сорта «Негорельская» [Поплавская и др., 2021], наиболее информативным этапом развития, на котором прослеживается отклик количественных [Новиков, 2019b] и качественных [Новиков, 2019a; Новикова, 2024] свойств лесных семян [Новиков, 2017], считается ювенильный этап, традиционно исчисляющийся от момента прорастания индивидуального семени [Новиков и др., 2023b] до момента первого цветения и характеризующийся образованием надземной части – листьев (игл, хвои), стеблей – и развитием ризосферы, оцениваемой, например, индексами качества Диксона DQI или качества корней RQI [Новиков и др., 2023a]. В научно-периодической литературе данный этап онтогенеза культуры [Дурова, Жигунов, 2017] достаточно часто терминологизируют как «ранний рост» («*early growth*»), оценивая уровень восприимчивости сеянца (саженца) к внешним физическим стрессорам биометрическим отношением В/Д (*Height-Diameter Ratio*) – высоты к диаметру стволика у корневой шейки [Петрищев, 2021; Новиков и др., 2023a; Egbäck et al., 2015; Nigul et al., 2021; Rodríguez de Prado et al., 2022; Novikova, 2023; Novikova et al., 2023; Santos et al., 2023]. В контексте данной статьи рассматривали ранний рост культур в стадии приживления – первом вегетационном периоде после пересадки на постоянное место.

Спектрометрические данные лесных семян в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн электромагнитного излучения, как подтверждают предыдущие исследования авторов для вида *Pinus sylvestris* L. [Новиков, 2018, 2021; Новиков и др., 2022; Novikov, Ivetic, 2019; Novikov et al., 2019, 2021; Novikova et al., 2023] и отмечают научно-исследовательские группы, достаточно эффективно могут дифференцировать провеиенции [Farhadi et al., 2015, 2017; Bacherikov et al., 2022], жизнеспособность и (или) хозяйственную пригодность [Прияткин, 2023; Tigabu, 2003; Daneshvar et al.,

2015;], виды семян [Farhadi et al., 2016], их зараженность вредителями [Tigabu et al., 2004] и болезнями [Bernardes et al., 2022], способность впитывать и терять воду [Gomes et al., 2024].

В связи с этим исследование предполагает установить некоторые закономерности раннего роста по показателю биометрического В/Д отношения трех групп (по времени пересадки) контейнерных саженцев относительно спектральных характеристик (VIS-регион | RGB-пространство) яркости индивидуальных семян сорта *Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya, зафиксированных в технологическом паспорте «семя – культура» [Новиков и др., 2023c; Новикова, 2024].

Материалы и методы.

Сбор и подготовка лесосеменного материала. *Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya является зарегистрированным сортом (свидетельство на сорт № 0003707, приоритет 28.03.2008, Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь), происхождение которого подробно представлено в работе [Ребко и др., 2024b]. Шишки собирали в декабре 2022 года с 18-летних клонов, произрастающих на гибридно-семенной плантации второго поколения (53°63' с.ш., 28°55' в.д., Негорельский учебно-опытный лесхоз – филиал Белорусского государственного технологического университета, Республика Беларусь; высота н.у.м. – 180 м). После сбора шишки подсушивали при нормальных условиях – температуре 20 градусов Цельсия и влажности не более 60% до момента раскрытия. Высыпавшиеся из шишек семена обескрыливали сухим способом, затем подсушивали до влажности 5,8%. Пустые (легкие) семена аспирационно из партии не извлекали. Далее из подготовленной исходной лесосеменной партии (в табл. 1 приведены посевные качества), базируясь на методике квартования [Бачериков, 2017], случайным образом отбирали три группы (образца) семян в количестве 400 штук каждая для последующего морфометрического анализа. Более подробно процедура сбора и подготовки лесосеменного материала для исследования приведена в основной части статьи [Ребко и др., 2024a].

Морфометрия лесосеменного материала. Случайным образом отбирали семена по одному, присваивая каждому индивидуальный номер от 1 до 400. После присвоения порядкового номера каждое семя взвешивали с помощью аналитических весов (точность 0,0001 г) и измеряли длину, ширину и толщину с помощью цифрового штангенциркуля (точность 0,1 мм), фиксируя данные в наборе [Петрищев и др., 2023b]. Затем данное семя помещали в индивидуальный пронумерованный кармашек прозрачного 88-карманного

перфорированного листа для транспортировки к месту высеваания. Далее для второго и третьего образцов повторяли вышеуказанные действия. Более подробно методика данного анализа рассмотрена в основной части работы [Ребко и др., 2024а], а в табл. 2 справочно приведены некоторые морфометрические параметры и средняя масса семени в каждой из групп.

Таблица 1

**Посевные качества исходной партии семян
Pinus sylvestris L. var. Negorelskaya, отобранный для исследования**

**Sowing qualities of the initial seedlot of *Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya
selected for this research**

Посевные качества					
масса 1000 семян, г		чистота семян, %	энергия прорастания, %	техническая всхожесть, %	средний семен-ной покой, дней
ГОСТ	ISTA				
6,39	6,45	96,0	80,0	88,0	5,5

Примечание: данные адаптированы из работы [Ребко и др., 2024а] и приведены справочно.

Таблица 2

**Морфометрические параметры и масса семян в трех группах
Pinus sylvestris L. var. Negorelskaya, участвующих в исследовании**

**Morphometric parameters and weight in three groups
of *Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya seeds used in this study**

Параметры (среднее ± ошибка среднего)	Группы		
	1	2	3
Длина семени, мм	$4,50 \pm 0,022$	$4,42 \pm 0,022$	$4,27 \pm 0,024$
Ширина семени, мм	$2,56 \pm 0,013$	$2,52 \pm 0,012$	$2,45 \pm 0,013$
Толщина семени, мм	$1,42 \pm 0,008$	$1,45 \pm 0,010$	$1,36 \pm 0,009$
Площадь поверхности семени, мм^2	$36,40 \pm 0,31$	$35,15 \pm 0,30$	$32,99 \pm 0,32$
Объем семени, приведенный к эллипсоиду, мм^3	$8,66 \pm 0,10$	$8,57 \pm 0,11$	$7,57 \pm 0,11$
Масса семени, г	$0,0062 \pm 0,000085$	$0,0059 \pm 0,000091$	$0,0059 \pm 0,000085$

Примечание: данные адаптированы из работ [Новиков и др., 2023б; Ребко и др., 2024а] и приведены справочно.

Оптометрия семенного материала. Получали с помощью планшетного сканера, например, как у [Bernardes et al., 2023], спектральное изображение семян в видимом (VIS) диапазоне длин волн, RGB-пространстве в количестве, равном высеиваемому в один контейнер (40 штук) и рандомизированном в соответствующем высеву порядке. Сегментировали изображение с помощью специально разработанной компьютерной программы для получения индивидуального изображения каждого семени. Более подробно методика получения спектральных показателей семян в RGB-пространстве рассмотрена у Т.П. Новиковой [2024]. Рассчитывали следующие оптометрические показатели [Монич, Старовойтов, 2011; Голуб, 2022]:

1. R – яркость красного канала (8 бит) сегментированного изображения единичного семени, ед. яркости;
2. G – яркость зеленого канала (8 бит) сегментированного изображения единичного семени, ед. яркости;
3. B – яркость синего канала (8 бит) сегментированного изображения единичного семени, ед. яркости;
4. Средняя яркость $Я_{cp}$ сегментированного изображения единичного семени

$$Я_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{Ч_{pix}} Я_{pix}}{Ч_{pix}}, \quad (1)$$

где $Я_{pix}$ – яркость одного пикселя в сегментированном изображении единичного семени, ед. яркости; $Ч_{pix}$ – число пикселей в сегментированном изображении единичного семени;

5. Резкость по яркости $Rзк_я$, характеризующая локальную степень размытости деталей сегментированного изображения единичного семени:

$$Rзк_я = \frac{1}{Ч_{pix}} \sum_{j=0}^{h-1} \sum_{i=0}^{w-1} \frac{[(Я_{pix(i,j)} - Я_{pix(i-1,j)})] + [(Я_{pix(i,j)} - Я_{pix(i,j-1)})]}{2}, \quad (2)$$

где $Я_{pix(i,j)}$ – яркость пикселя с координатами (i,j) в сегментированном изображении единичного семени, ед. яркости;

6. Контраст по яркости Кнтр_я, относительная величина, характеризующая долю различия между максимальными и минимальными значениями яркости пикселей сегментированного изображения единичного семени:

$$Кнтр_я = \frac{Я_{pix(MAX)} - Я_{pix(MIN)}}{Я_{pix(MAX)} + Я_{pix(MIN)}}, \quad (3)$$

где $\mathbf{Y}_{pix(MAX)}$ – максимальная яркость пикселей в сегментированном изображении единичного семени, ед. яркости; $\mathbf{Y}_{pix(MIN)}$ – минимальная яркость пикселей в сегментированном изображении единичного семени, ед. яркости.

Получение контейнерных саженцев. Семена всех трех групп были высеяны 23 июня 2023 года в порядке, соответствующем порядку раскладки семян при получении их изображения, с использованием 40-ячеистых сайд-слит контейнеров Hico (BCC AB). На семенное ложе, образованное торфом кислой реакции, количество и плотность которого устанавливались автоматически с помощью устройства для заполнения контейнеров, вручную, в центр ячейки, на глубину 1 см помещали одно семя, после чего мульчировали перлитом бровень с бортиками ячейки. 30 контейнеров были размещены в теплице с контролируемой температурой, влажностью и автоматическим поливом с помощью рампы. Грунтовую всхожесть индивидуальных семян контролировали, как рекомендовано в работах [Пименов, 2015; Mañas et al., 2009], на 30 и 50 дней с момента высеява [Новиков и др., 2023b]. Далее, 31.10.2023, первая группа была пересажена из контейнеров на постоянное место экспериментального участка, вторая – переставлена в контейнерах на площадку для закаливания и пересажена весной, 29.03.2024; третья –переставлена в контейнерах на площадку для закаливания и пересажена осенью, 01.11.2024.

Характеристика постоянного экспериментального участка. Экспериментальный объект культур сосны обыкновенной сорта «Негорельская» создавали пересадкой выращенных в контейнерах лесного питомника индивидуальных деревьев из семян с известными оптометрическими (RGB), морфометрическими показателями, включенными в технологический паспорт «семя – культура» [Новикова, 2024]. Пересадку культур с закрытой корневой системой из сайд-слит контейнеров (40 ячеек по 120 см³) производили в борозду под меч Колесова на территории Левобережного лесничества Учебно-опытного лесхоза Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова (394050, г. Воронеж, Железнодорожный район, кордон Боровской, координаты начала посадочного ряда – 51°46'34,2" с.ш. 39°18'57,6"в.д.). Создание объекта закрешили актом от 31 октября 2023 года о внедрении научно-исследовательской работы между ВГЛТУ и Учебно-опытным лесхозом ВГЛТУ.

Временные вехи пересадки и биометрической оценки в первый вегетационный период каждой из трех групп саженцев, участвующих в эксперименте, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Даты и возраст на момент пересадки и биометрического контроля трех групп саженцев *Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya, участвующих в исследовании

Dates and ages at the time of outplanting and biometric control of three groups of *Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya seedlings for this study

Показатели	Группы саженцев		
	1	2	3
Количество высеванных в контейнеры семян (диапазон), шт.	400 (1–400)	400 (401–800)	400 (801–1200)
Диапазон контейнеров	1–10	11–20	21–30
Дата высева семян в контейнеры	23.06.2023	23.06.2023	23.06.2023
Количество взошедших в ячейках контейнеров семян на 50-й день, шт.	315	322	301
Дата пересадки культур на постоянное место (время года)	31.10.2023 (осень)	29.03.2024 (весна)	01.11.2024 (осень)
Возраст при пересадке с момента высевания, дней	131	281	497
Количество культур с ненулевым виталиитетом на момент пересадки, шт.	302	308	222**
Дата биометрических измерений	29.10.2024	29.10.2024	01.11.2024*
Возраст саженцев с момента пересадки, дней	364	214	0*
Количество культур с ненулевым виталиитетом на момент измерения, шт.	181	195	222**

Примечание: * перед пересадкой осуществляли биометрическую оценку культур, находившихся с 31.10.2023 на площадке для закаливания автоматизированного лесного питомника; ** один контейнер с культурами (из семян с 1161 по 1200) изъяли для оценки индекса качества саженцев Диксона [Новиков и др., 2023а].

Характер накопления градусо-дней [Новикова и др., 2022] и осадков на экспериментальном участке в оцениваемый период (с 29.10.2024 по 01.11.2024) приведен на рис. 1.

Анализ данных. Для оценки применимости тех или иных критериев дисперсионного анализа оценивали нормальность распределения В/Д отношения, осуществляя построение графика квантиль-квантиль (рис. 2) на основе платформы для статистики.

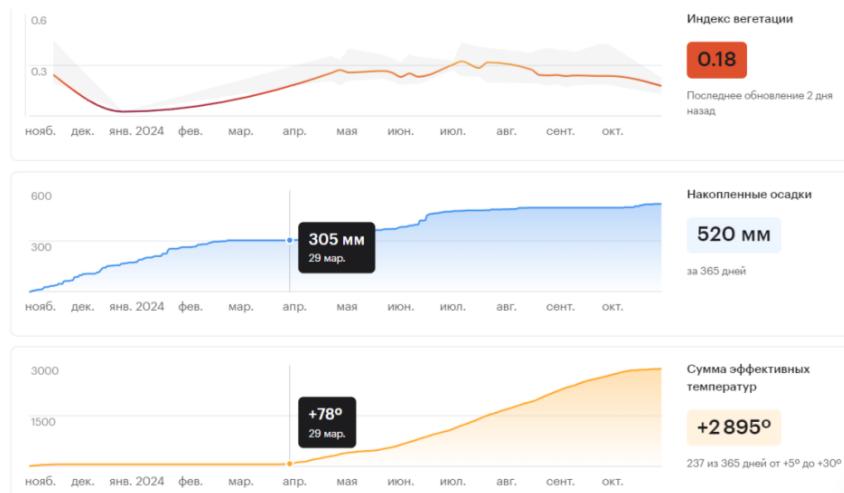


Рис. 1. Индекс вегетации, накопленные осадки и сумма эффективных температур в оцениваемом периоде онтогенеза культур сосны обыкновенной сорта «Негорельская» с 29.10.2023 по 01.11.2024 (белым шрифтом на черном фоне показаны показатели на момент пересадки второй группы саженцев 29.03.2024)

Fig. 1. Vegetation index, accumulated precipitation and the sum of effective temperatures in the estimated period of ontogenesis of Scots pine Negorelskaya variety from 10/29/2023 to 11/01/2024 (white font on a black background shows the indicators at the time of transplantation of the second group of seedlings on 03/29/2024)

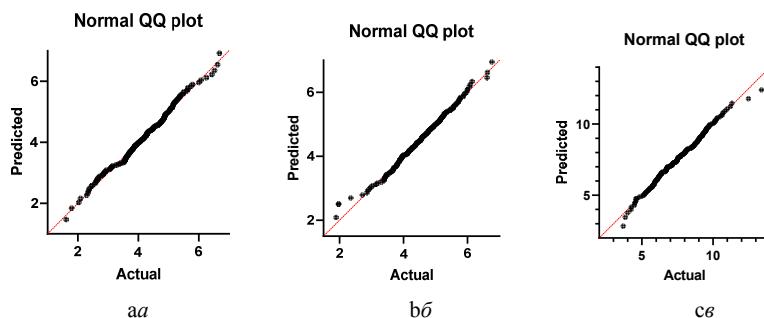


Рис. 2. Проверка на Гауссово распределение отношения высоты к диаметру корневой шейки саженцев первой (а), второй (б) и третьей (с) групп, участвующих в исследовании

Fig. 2. Checking for the Gaussian distribution of the ratio of height to diameter of the root neck of seedlings of the first (a), second (b) and third (c) groups using in the study

Во всех трех группах саженцев распределение вариант В/Д отношения максимально возможно приближено к распределению Гаусса, за исключением краев, поэтому для проведения дисперсионного анализа использовали параметрический критерий. Проверку нуль-гипотезы производили по аналогии с [Novikov, Ivetic, 2018] в предположении, что средние варианты независимой переменной В/Д отношения статистически не дифференцированы в группах саженцев с разным временем пересадки. Для уточнения степени различия (или отсутствия различия) использовали множественное сравнение на основании пост-хок теста Тьюки, например как у [Kerkez et al., 2018]. Закономерности изменения биометрического отношения высоты саженца к диаметру корневой шейки (В/Д отношения) в зависимости от шести оптометрических показателей семенной кожуры, приведенных в разделе «Материалы и методы», оценивающие разброс значений, визуализировали с помощью скаттерплота и аппроксимирующей линии регрессии второй степени.

Результаты исследования и их обсуждение. Табл. 4 представляет численные значения описательных статистик биометрического В/Д отношения в трех группах саженцев (табл. 3) *P. sylvestris* var. *Negorelskaya* из соответствующих индивидуальных семян (табл. 2) с известными оптометрическими показателями. В табл. 5 рассчитаны дисперсионные (ANOVA) показатели для проверки нуль-гипотезы путем множественного сравнения средних статистик для трех групп саженцев, участвующих в исследовании, а на рис. 3 – размах (разница между максимальным и минимальным значениями В/Д отношения) и точечное распределение значений В/Д отношения в соответствующих группах саженцев с отображением меры центральной тенденции (среднего) и уровня значимости *p* при апостериорной проверке нуль-гипотезы по методике Тьюки.

На рис. 4 (первая группа), 5 (вторая группа) и 6 (третья группа) представлены регрессионные зависимости изменения биометрического В/Д отношения раннего роста саженцев на конец первого вегетационного периода от шести оптометрических показателей внешней естественной оболочки соответствующих семян.

Результаты расчетов статистических показателей в табл. 4 и 5 свидетельствуют о том, что нуль-гипотезу об отсутствии различий между средними вариантами В/Д отношения необходимо отвергнуть.

Поскольку различия между средними В/Д отношения для всех трех групп саженцев не случайны, а время высеяния в контейнеры одинаково, можно предположить, что наблюдаемая небольшая этиология саженцев третьей группы (среднее – 7,62; медиана – 7,52; размах – 5,88) может быть объяснена технологическими условиями нахождения сеянцев в контейнерах на откры-

той площадке для закаливания, увеличивающими рост в высоту и ингибирующими рост в диаметре [Santos et al., 2023]. Также достаточно высокие значения В/Д отношения могут являться индикатором вероятности затухания роста саженцев после пересадки [Sousa et al., 2022]. В/Д отношение, демонстрируемое на 494 день от момента высева в контейнер при осенней пересадке 131-дневных (1 группа) и весенней пересадке 281-дневных (2 группа) культур в поле, различается незначительно, но все же статистически значимо, и может быть соотнесено по значениям (mean $4,22 \pm SD 0,97$ и $4,54 \pm 0,87$ см mm^{-1} соответственно) с исследованиями [Santos et al., 2023] (*Alibertia edulis* (Rich.) $4,38 \pm 0,73$ см mm^{-1} | 0% тени, $5,32 \pm 0,80$ см mm^{-1} | 50% тени; 275 дней с момента высева; теплица).

Таблица 4

Биометрическое отношение высоты к диаметру корневой шейки трех групп саженцев *Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya по времени пересадки

Heights / Diameter ratio of the three seedlings groups (*Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya) according to the outplanting time

Статистический параметр	Группы саженцев		
	1	2	3
Количество саженцев (N)	185	195	223
Минимум	1,610	1,890	3,680
25-й процентиль	3,620	3,940	6,330
Медиана	4,220	4,540	7,520
75-й процентиль	4,870	5,130	8,880
Максимум	6,680	6,760	13,400
Межквартильный размах	5,070	4,870	9,720
Среднее	4,187	4,519	7,620
Стандартное отклонение	0,974	0,868	1,685
Стандартная ошибка среднего	0,072	0,062	0,113
Нижний предел 95% доверительного интервала	4,045	4,396	7,398
Верхний предел 95% доверительного интервала	4,328	4,641	7,843
Коэффициент вариации (КВ), %	23,41	19,20	22,12
Асимметрия	-0,111	-0,221	0,170
Эксцесс	-0,030	0,405	0,021

Примечание: Для расчета и оценки биометрических параметров использовали наборы данных для индивидуальных семян *Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya и полученных из них растений [Петрищев и др., 2023а, б, с].

Таблица 5

Дисперсионный анализ и множественное сравнение Тьюки для проверки нуль-гипотезы об отсутствии различий между средними В/Д отношения для трех групп саженцев *Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya по времени пересадки

Analysis of variance and multiple comparison of Tukey to test the null hypothesis that there are no differences between the average Heights / Diameter ratio for three seedlings groups of *Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya by outplanting time

Статистический параметр	Группы сравнения		
	1 vs. 2	1 vs. 3	2 vs. 3
Количество выборки для первого значения (n1)	185	185	195
Количество выборки для второго значения (n2)	195	223	223
Среднее первого значения (Mean 1)	4,187	4,187	4,519
Среднее второго значения (Mean 2)	4,519	7,620	7,620
Разница средних (Mean Diff.)	-0,3321	-3,434	-3,101
Ошибка разницы (SE of diff.)	0,1292	0,1252	0,1236
95% доверительный интервал разницы (95% CI of diff.)	От -0,6358 до -0,02849	От -3,728 до -3,139	От -3,391 до -2,811
q	3,635	38,78	35,53
DF	600	600	600
Уровень значимости (P-value)	0,0280	<0,0001	<0,0001

Рост из дифференцированных по оптическому и геометрическому признакам семян однолетних контейнерных сеянцев *P. sylvestris* в теплице и на площадке для закаливания автоматизированного лесного питомника [Novikov, Ivetic, 2018, 2019] обнаружил статистически значимые различия между биометрическими параметрами сеянцев (высотой, диаметром стволика у корневой шейки), произведенных из разных групп семян. Наряду с этим, по данным [Novikov et al., 2019], светлые семена сосны обыкновенной демонстрируют «лучшие результаты роста в высоту ЗКС-саженцев на постоянном месте в конце первого вегетационного периода по сравнению с другими цветными фракциями, при этом приживаемость саженцев средняя». Также для видов сосны существуют исследования взаимосвязи меж-

ду высотой и диаметром, обозначаемой в одних источниках как H/D ratio [Kerkez et al., 2018], в других – как SQ (Sturdiness Coefficient) [Devetaković et al., 2020], которые показывают, что данное биометрическое отношение является наиболее надежным признаком дерева для прогнозирования онтогенеза в полевых условиях.

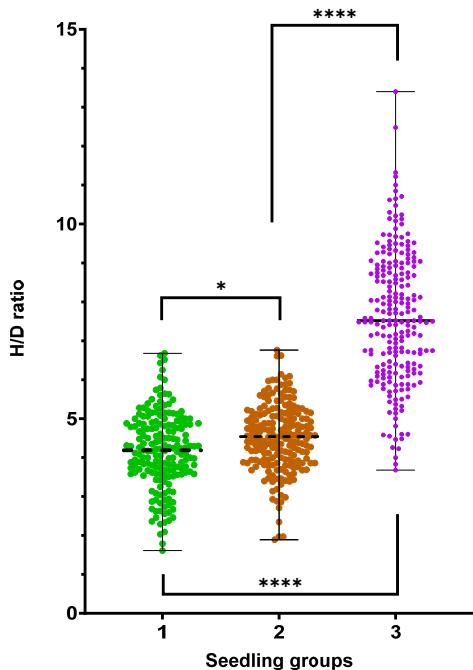


Рис. 3. Рассеяние и размах вариант биометрического В/Д отношения саженцев *Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya первой, второй и третьей групп, используемых в исследовании. Нуль-гипотеза отвергается на основании пост-хок теста Тьюки на уровне значимости * ($p = 0,0280$) ($p < 0,0001$)

Fig. 3. Scattering and span variant of the biometric H/D ratio of *Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya of the first, second and third seedlings groups used in the study. The null-hypothesis is rejected based on the post-hoc Tukey's test at the significance level * ($p = 0.0280$) ($p < 0.0001$)

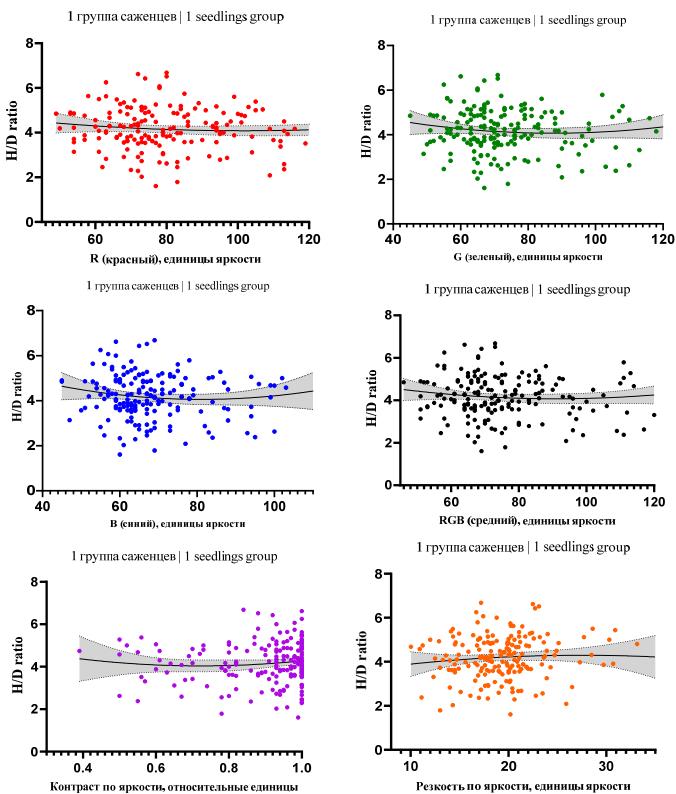


Рис. 4. Распределение влияния параметров яркости внешней оболочки индивидуальных семян 1 группы (номера 1–400) сосны обыкновенной сорта «Негорельская» на биометрическое отношение высоты (см) к диаметру корневой шейки (мм) полученных из них контейнерных саженцев (возраст на момент пересадки 31.10.2023 – 131 день, $0,36 + 0$; контейнерная всхожесть на 50-й день – 318 из 400, 78,8%; сохранность на момент пересадки в поле – 302 из 400, 75,5%; возраст на момент измерений – 494 дня; сохранность на момент измерений 29.10.2024 – 181 из 400, 45,3%)

Fig. 4. Distribution of the influence of the brightness parameters of the outer shell of individual seeds of group 1 (numbers 1–400) of the Scots pine variety «Negorelskaya» on the biometric ratio of height (cm) to the diameter of the root neck (mm) of container seedlings obtained from them (age at the time of outplanting 31.10.2023 – 131 days, $0,36 + 0$; container germination by 50th day – 318 out of 400, 78.8%; safety at the time of outplanting in the field – 302 out of 400, 75.5%; age at the time of measurements – 494 days; survival at the time of measurements on 10/29/2024 – 181 out of 400, 45.3%)

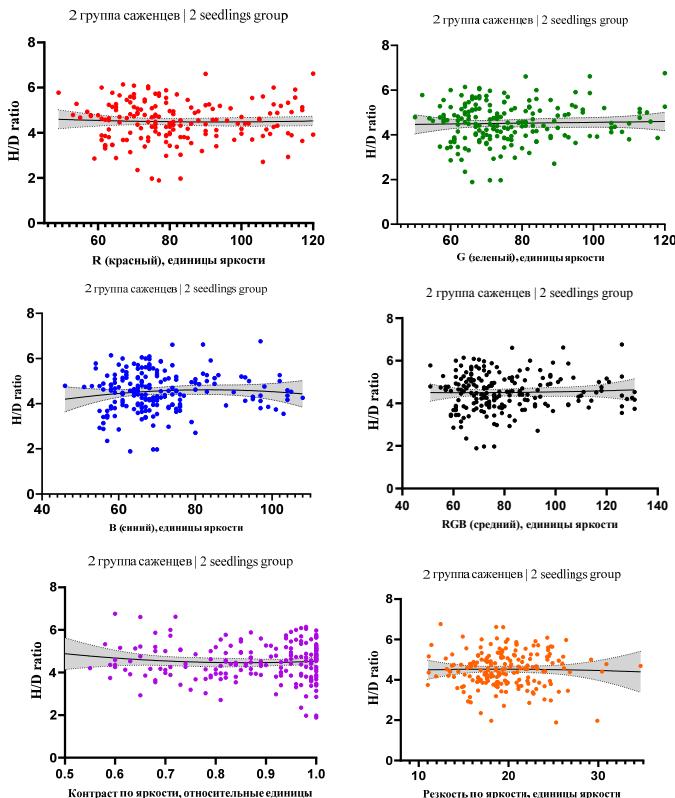


Рис. 5. Распределение влияния параметров яркости внешней оболочки индивидуальных семян 2 группы (номера 401–800) сосны обыкновенной сорта «Негорельская» на биометрическое отношение высоты (см) к диаметру корневой шейки (мм) полученных из них контейнерных саженцев (возраст на момент пересадки 29.03.2024 – 281 день, 0,77 + 0; контейнерная всхожесть на 50-й день – 322 из 400, 80,5%; сохранность на момент пересадки в поле 308 из 400, 77%; возраст на момент измерений – 494 дня; сохранность на момент измерений 29.10.2024 – 195 из 400, 48,8%)

Fig. 5. Distribution of the influence of the brightness parameters of the outer shell of individual seeds of group 2 (total numbers 401–800) of the Scots pine variety «Negorelskaya» on the biometric ratio of height (cm) to the diameter of the root neck (mm) of container seedlings obtained from them (age at the time of transplantation 03/29/2024 – 281 days, 0.77 + 0; container germination by 50th day – 322 out of 400, 80.5%; safety at the time of transplantation in the field – 308 out of 400, 77%; age at the time of measurements – 494 days; survival at the time of measurements on 10/29/2024 – 195 out of 400, 48.8%)

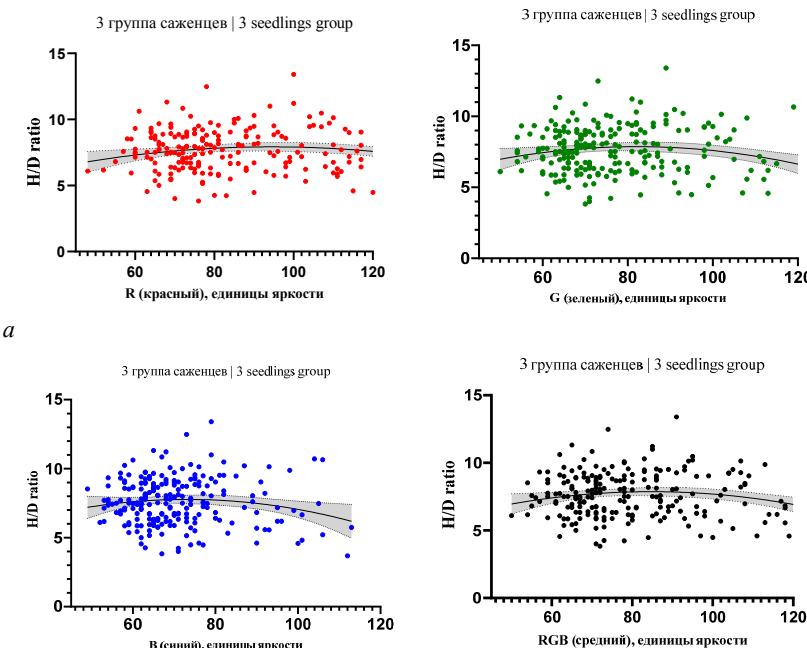
*a*

Рис. 6. Распределение влияния параметров яркости внешней оболочки индивидуальных семян 3 группы (номера 801–1160) сосны обыкновенной сорта «Негорельская» на биометрическое отношение высоты (см) к диаметру корневой шейки (мм) полученных из них контейнерных сеянцев (возраст 497 дней с момента высева; 1,36 + 0; контейнерная всхожесть на 50-й день – 267 из 360, 74,2%; сохранность на момент пересадки 01.11.2024 в поле – 222 из 360, 62%)

Fig. 6. Distribution of the influence of the brightness parameters of the outer shell of individual seeds of group 3 (numbers 801–1160) of the Scots pine variety «Negorelskaya» on the ratio of height (cm) to the diameter of the root neck (mm) of container seedlings obtained from them (age 497 days from the moment of sowing; 1,36 + 0; container germination on the 50th day – 267 out of 360, 74.2%; safety at the time of transfer in the field – 222 out of 360, 62%)

В будущем путем интеграции всех измеренных и рассчитанных параметров раннего роста культур сосны обыкновенной сорта «Негорельская» в справочную информационную систему «FRM-Library» [Новикова и др., 2023], будет уточнена методика [Novikova, 2022] выбора технологических операций и оборудования в технологии восстановления лесных ландшафтов, что было бы полезным для интенсификации процесса лесовыращива-

ния. Более того, тесная корреляция между показателями высоты и диаметра, как показано в исследованиях [Jiang et al., 2022; Novikova et al., 2023], может способствовать выбору лучших деревьев, в будущем, исключению операции измерения высоты саженца для прогнозирования роста и развития деревьев [Лебедев, 2022], и, возможно, использоваться для исследования закономерностей формирования надземной биомассы [Нагимов, 2000].

Более того, проследив прирост культур сосны обыкновенной сорта «Негорельская» по высоте и диаметру на втором и последующих вегетационных периодах ювенильного этапа на восстанавливаемом участке лесного ландшафта, возможно будет точнее установить степень интенсификации лесовосстановительного производства *P. sylvestris* L. var. Negorelskaya в зависимости от начальных свойств семени.

Заключение.

1. Биометрические параметры высоты саженца и диаметра стволика у корневой шейки возле корня позволяют прогнозировать качество саженца: В/Д отношение включено в знаменатель при расчете индекса качества Диксона, поэтому увеличение отношения приведет к уменьшению индекса качества;

2. Мера центральной тенденции биометрического показателя – В/Д отношения – ($M | 4,187$; $SD | 0,974$) в первой группе саженцев сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L. var. Negorelskaya) при $F (2,600) = 475,2$, степени свободы $DF = 602$ и уровне достоверности $p < 0,0001$ статистически значимо отличается от средних варианта В/Д отношения во второй ($M | 4,519$; $SD | 0,868$) и третьей ($M | 7,620$; $SD | 1,685$) группах саженцев, участвующих в исследовании.

3. Регрессионный анализ влияния оптометрических показателей внешней естественной оболочки семян на В/Д отношение, например, для первой группы саженцев, наблюдаемое на первом вегетационном периоде, показывает наличие характерных скоплений половины значений оптометрических показателей в следующих диапазонах: от 60 до 80 единиц яркости для R-, G-, B- и RGB параметров, от 0,9 до 1,0 относительных единиц для параметра контраста и от 15 до 23 единиц яркости для параметра резкости.

Вклад авторов: Новикова Т.П. – концепция статьи, методология, программное обеспечение, валидация данных, формальный анализ, ресурсы, подготовка первоначального варианта рукописи, редактирование и корректировка по замечаниям рецензентов, визуализация, управление проектом, привлечение грантового финансирования; Ребко С.В. – методология, формальный анализ, ресурсы, подготовка первоначального варианта рукописи, редактирование и корректировка по замечаниям рецензентов.

ниям рецензентов; Петрищев Е.П. – обработка и создание наборов данных, подготовка первоначального варианта рукописи, редактирование и корректировка по замечаниям рецензентов; Новиков А.И. – концепция статьи, методология, валидация данных, формальный анализ, ресурсы, подготовка первоначального варианта рукописи, редактирование и корректировка по замечаниям рецензентов, визуализация. Все авторы прочитали представляемую версию рукописи и согласились с ней.

Сведения о финансировании: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-26-0028.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Бачериков И.В. Совершенствование функционирования закрытых складов древесных сыпучих материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб.: СПбГЛТУ, 2017. 21 с.

Голуб Ю.И. Оценка качества цифровых изображений // Системный анализ и прикладная информатика. 2021. № 4. С. 4–15. DOI: 10.21122/2309-4923-2021-4-4-15.

Дурова А.С., Жигунов А.В. Влияние биоугля на всхожесть семян и рост сеянцев хвойных пород в условиях закрытого грунта // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2017. Вып. 219. С. 18–31. DOI: 10.21266/2079-4304.2017.219.18-31.

Лебедев А.В. Прогнозирование роста по средней высоте культур сосны с использованием обобщенного алгебраического разностного подхода // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 238. С. 49–66. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.238.49-66.

Монич Ю.И., Старовойтov B.B. Мера оценки резкости цифрового изображения // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2011. № 1. С. 80–84.

Нагимов З.Я. Закономерности роста и формирования надземной фитомассы сосновых древостоев: дис. ... д-ра с.-х. наук. Екатеринбург: УГЛТА, 2000. 409 с.

Новиков А.И. Дисковые сепараторы семян в лесохозяйственном производстве. Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2017. 159 с.

Новиков А.И. Экспресс-анализ лесных семян биофизическими методами. Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2018. 128 с.

Новиков А.И. Влияние сортирования семян сосны обыкновенной по цвету и размерам на их грунтовую всхожесть в контейнерах // Хвойные бореальной зоны. 2019а. Т. 37. № 5. С. 313–319.

Новиков А. И. Некоторые результаты апробации технологии сепарации по количественному признаку семян сосны обыкновенной // Известия Санкт-

Петербургской лесотехнической академии. 2019b. Вып. 227. С. 68–87. DOI: 10.21266/2079-4304.2019.227.68-87.

Новиков А.И. Совершенствование технологии получения высококачественного лесосеменного материала: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Воронеж, 2021. 32 с.

Новиков А.И., Драпалюк М.В., Соколов С.В., Новикова Т.П. Экспресс-анализ семян в лесохозяйственном производстве: теоретические и технологические аспекты. Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2022. 176 с.

Новиков А.И., Ребко С.В., Новикова Т.П., Петрищев Е.П. Индекс качества Диксона: связь с технологическим воздействием на лесные семена // Лесотехнический журнал. 2023а. Т. 13, № 1. С. 23–36. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.1/2.

Новиков А.И., Ребко С.В., Новикова Т.П., Петрищев Е.П. Влияние индивидуальной массы семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) сорта «Негорельская» на 30-дневное прорастание в 40-ячеистых SideSlit-контейнерах // Лесотехнический журнал. 2023б. Т. 13, № 2 (50). С. 59–86. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.2/4.

Новиков А.И., Ребко С.В., Новикова Т.П., Петрищев Е.П. Исследование спектрометрических показателей семян как основа интенсификации процесса лесовыращивания культур сосны обыкновенной сорта «Негорельская»: грант РНФ 23-26-00228. М. : Российский научный фонд, 2023с. URL: <https://elibrary.ru/jtuxih> (дата обращения: 01.10.2024)

Новикова Т.П. Технологический паспорт «семя – культура»: идентификация параметров RGB-яркости и цветности индивидуальных семян *Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya на основе авторской методики // Лесотехнический журнал. 2024. Т. 14, № 3(55). С. 37–60. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2024.3/3.

Новикова Т.П., Малышева В.И., Петрищев Е.П. Влияние климатического индекса градусо-дней на виталитет 3-летних сеянцев сосны обыкновенной из сортированных по спектрометрическим свойствам семян // Лесотехнический журнал. 2022. Т. 12, № 1(45). С. 110–118. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2022.1/9.

Новикова Т.П., Новиков А.И., Лисицын В.И., Петрищев Е.П. Справочная информационная система FLR-Library для адаптивного лесовосстановления: кластерный анализ дескрипторов // Лесотехнический журнал. 2023. Т. 13, № 3(51). С. 164–179. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.3/12.

Петрищев Е.П. Исследование взаимосвязи биометрических параметров ювенильных сеянцев сосны обыкновенной из кондиционных семян при оценке результатов лесовосстановления // Лесотехнический журнал. 2021. Т. 11, № 4(44). С. 161–169. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/14.

Петрищев Е.П., Новикова Т.П., Новиков А.И. Результаты исследований посевных качеств семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L., сорт Негорельская) и определения индекса качества Диксона 60-дневных сеянцев в контейнер-

ном питомнике. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023624604 РФ: № 2023624416; заявл. 01.12.2023; опубл. 13.12.2023а.

Петрищев Е.П., Новикова Т.П., Ребко С.В., Новиков А.И. Результаты морфометрических исследований семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L., сорт Негорельская). Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023624679 РФ: № 2023624380; заявл. 01.12.2023; опубл. 18.12.2023б.

Петрищев Е.П., Новикова Т.П., Новиков А.И. Результаты исследований спектрометрических показателей семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L., сорт Негорельская). Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023624752 РФ: № 2023624389; заявл. 01.12.2023; опубл. 19.12.2023с.

Пименов А.В. Биоразнообразие сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в контрастных экотопах Юга Сибири: дисс. ... д-ра биол. наук. Красноярск: Институт леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук, 2015. 406 с.

Поплавская Л.Ф., Ребко С.В., Тупик П.В. Результаты районирования сосны обыкновенной сорта Негорельская в Республике Беларусь // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2021. Т. 1, № 240. С. 58–67. DOI: 10.52065/2519-402x-2021-240-7-58-67.

Прияткин Н.С. Неинвазивная экспресс-оценка разнокачественности и хозяйственной пригодности семенного материала на основе использования инструментальных физических методов: дис. ... д-ра биол. наук. СПб.: АФИ, 2023. 253 с.

Ребко, С.В., Новиков А.И., Новикова Т.П., Петрищев Е.П. Взаимосвязи между геометрическими и гравиметрическими параметрами семян сосны обыкновенной // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2024а. Т. 276. С. 66–76. DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-8.

Ребко С.В., Новиков А.И., Новикова Т.П., Петрищев Е.П. Характеристика происхождения исходного материала сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) сорта «Негорельская» // Ботаника (исследования). 2024б. Т. 54. С. 213–225.

Bacherikov I.V., Raupova D.E., Durova A.S., Bragin V.D., Petrishchev E.P., Novikov A.I., Danilov D.A., Zhigunov A.V. Coat Colour Grading of the Scots Pine Seeds Collected from Faraway Provenances Reveals a Different Germination Effect // Seeds. 2022. Vol. 1, No. 1. P. 49–73. DOI: 10.3390/seeds1010006.

Bernardes R.C., De Medeiros A., Silva L. da, Cantoni L., Martins G.F., Mastrangelo T., Novikov A., Mastrangelo C.B. Deep-Learning Approach for *Fusarium* Head Blight Detection in Wheat Seeds Using Low-Cost Imaging Technology // Agriculture. 2022. Vol. 12, no. 11. Art. no. 1801. DOI: 10.3390/agriculture12111801.

Daneshvar A., Tigabu M., Karimidoost A., Oden P.C. Single seed Near Infrared Spectroscopy discriminates viable and non-viable seeds of *Juniperus polycarpos* // Silva Fennica. 2015. Vol. 49, no. 5. Art. no. 1334. DOI: 10.14214/sf.1334.

Devetaković J., Krinulović L., Jancović I.K. Effect of sowing pattern and density on the quality of one-year-old Austrian pine bareroot seedlings // Reforesta. 2020. № 10. P. 25–30. DOI: 10.21750/refor.10.03.86.

Egbäck S., Bullock B.P., Isik F., McKeand S.E. Height-Diameter Relationships for Different Genetic Planting Stock of Loblolly Pine at Age 6. // Forest Science. 2015. Vol. 61, no. 3. P. 424–428. DOI: 10.5849/forsci.14-015.

Farhadi M., Tigabu M., Oden P.C. Near Infrared Spectroscopy as non-destructive method for sorting viable, petrified and empty seeds of *Larix sibirica* // Silva Fennica. 2015. Vol. 49, no. 5. Art. no. 1340. DOI: 10.14214/sf.1340.

Farhadi M., Tigabu M., Stener L.-G., Oden P.C. Feasibility of visible + near infrared spectroscopy for non-destructive verification of European × Japanese larch hybrid seeds // New Forests. 2016. Vol. 47, no. 2. P. 271–285. DOI: 10.1007/s11056-015-9514-4.

Farhadi M., Tigabu M., Pietrzykowski M., Danusevičius D., Oden P.C. Application of near infrared spectroscopy for authentication of *Picea abies* seed provenance // New Forests. 2017. Vol. 48, no. 5. P. 629–642. DOI: 10.1007/s11056-017-9589-1.

Gomes, É.S., Foseca de Oliveira G.R., Rodrigues A.A., Corrêa C.G., Almeida E. de, Carvalho H.W.P. de, Arthur V., Silva E.A.A. da, Novikov A.I., Mastrangelo C.B. Ultrasound technology supplements zinc in soybean seeds and increases the photosynthetic efficiency of seedlings // Computers and Electronics in Agriculture. 2024. Vol. 227. Art. no. 109619. DOI: 10.1016/j.compag.2024.109619.

Ivetić V., Grossnickle S., Škorić M. Forecasting the field performance of Austrian pine seedlings using morphological attributes // IForest. 2017. Vol. 10, № 1. P. 99–107. DOI: 10.3832/ifor1722-009.

Jiang L., Xu X., Cai Q., Han R., Tigabu M., Jiang T., Zhao X. Variations in Growth and Photosynthetic Traits of Polyploid Poplar Hybrids and Clones in Northeast China // Genes. 2022. Vol. 13, no. 11. Art. no. 2161. DOI: 10.3390/genes13112161.

Kerkez I., Nonić M., Devetaković J., Šijacić-Nikolić M., Ivetić V. The effect of half-sib lines on morphological attributes of one-year old *Fraxinus angustifolia* seedlings // Reforesta. 2018. No. 5. P. 15–21. DOI: 10.21750/REFOR.5.03.49.

Mañas P., Castro E., Heras J. de las. Quality of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) seedlings using waste materials as nursery growing media // New Forest. 2009. Vol. 37, Iss. 3. P. 295–311.

Nigul K., Padari A., Kivistö A.Noe S.M., Korjus H., Laarmann D., Frelich L.E., Jõgiste K., Stanturf J.A., Paluots T., Põldveer E., Kängsepp V., Jürgenson H., Metslaid M., Kangur A. The Possibility of Using the Chapman–Richards and Näslund Functions to Model Height–Diameter Relationships in Hemiboreal Old-Growth Forest in Estonia // Forests. 2021. Vol. 12, no. 2. Art. no. 184. DOI: 10.3390/f12020184.

Novikov A.I., Ivetić V. The effect of seed size grading on seed use efficiency and height of one-year-old container-grown Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings // Reforesta. 2018. Vol. 6. P. 100–109. DOI: 10.21750/REFOR.6.08.61.

Novikov A.I., Ivetić V. The effect of seed coat color grading on height of one-year-old container-grown Scots pine seedlings planted on post-fire site // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Art. no. 012043. DOI 10.1088/1755-1315/226/1/012043.

Novikov A., Sokolov S., Drapalyuk M., Zelikov V., Ivetić V. Performance of Scots pine seedlings from seeds graded by colour // Forests. 2019. Vol. 10, no. 12. Art. no. 1064. DOI: 10.3390/F10121064.

Novikov A.I., Lisitsyn V.I., Tigabu M., Tylek P., Chuchupal S. Detection of Scots pine single seed in optoelectronic system of mobile grader: Mathematical modeling // Forests. 2021. Vol. 12, no. 2. P. 1–18. DOI: 10.3390/f12020240.

Novikova T.P. The choice of a set of operations for forest landscape restoration technology // Inventions. 2022. Vol. 7, no. 1. Art. no. 1. DOI: 10.3390/inventions7010001.

Novikova, T.P. Assessment of the forest seed material quality at the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) experimental site during adaptive restoration of forest landscapes // Forestry Engineering Journal. 2023. Vol. 13, no. 1. P. 112–128. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.1/8.

Novikova T.P., Tylek P., Mastrangelo C.B., Drapalyuk M.V., Kharin S.V., Novikov A.I. The Root Collar Diameter Growth Reveals a Strong Relationship with the Height Growth of Juvenile Scots Pine Trees from Seeds Differentiated by Spectrometric Feature // Forests. 2023. Vol. 14, no. 6. Art. no. 1164. DOI: 10.3390/f14061164.

Rodriguez de Prado D., Riofrío J., Aldea J., McDermott J., Bravo F., Aza C.H. de. Species Mixing Proportion and Aridity Influence in the Height–Diameter Relationship for Different Species Mixtures in Mediterranean Forests // Forests. 2022. Vol. 13. Art. no. 119. DOI: 10.3390/f13010119.

Santos C.C., Goelzer A., da Silva O.B., dos Santos F.H.M., Silverio J.M., Scalon S.P.Q., Vieira M.C., Zárate N.A.H. Morphophysiology and quality of *Alibertia edulis* seedlings grown under light contrast and organic residue // Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. 2023. Vol. 27, no. 5. P. 375–382. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v27n5p375-382.

Sousa D.J.P., Nogueira G.A.S., Teixeira K.B.S., Monteiro G.G.T.N., Brito A.E.A., Nascimento V.R., Albuquerque G.P.D., Oliveira T.J.M., Souza L.C., Freitas J.M.N., Oliveira Neto C.F., Okumura R.S. Mitigation of the effects of salt stress in cowpea bean through the exogenous application of brassinosteroid // Brazilian Journal of Biology. 2022. Vol. 82. P. 1–7. DOI: 10.1590/1519-6984.260818.

Tigabu M. Characterization of forest tree seed quality with near infrared spectroscopy and multivariate analysis: PhD Thesis. 2003. 56 p.

Tigabu M., Oden P.C., Shen D. Application of near-infrared spectroscopy for the detection of internal insect infestation in *Picea abies* seed lots // Canadian Journal of Forest Research. 2004. Vol. 34, no. 1. P. 76–84. DOI: 10.1139/x03-189.

References

- Bacherikov I.V. Sovershenstvovanie funktsionirovaniya zakrytykh skladov drevesnykh sypuchikh materialov: Abstr. Diss. ... Candidate of Technical Sciences. St. Petersburg: St. Petersburg State Forest Technical University, 2017. 21 p. (In Russ.)
- Bacherikov I.V., Raupova D.E., Durova A.S., Bragin V.D., Petrishchev E.P., Novikov A.I., Danilov D.A., Zhigunov A.V. Coat Colour Grading of the Scots Pine Seeds Collected from Faraway Provenances Reveals a Different Germination Effect. *Seeds*, 2022, vol. 1, no. 1, pp. 49–73. DOI: 10.3390/seeds1010006.
- Bernardes R.C., De Medeiros A., Silva L. da, Cantoni L., Martins G.F., Mastrangelo T., Novikov A., Mastrangelo C.B. Deep-Learning Approach for *Fusarium* Head Blight Detection in Wheat Seeds Using Low-Cost Imaging Technology. *Agriculture*, 2022, vol. 12, no. 11, art. no. 1801. DOI: 10.3390/agriculture12111801.
- Daneshvar A., Tigabu M., Karimidoost A., Oden P.C. Single seed Near Infrared Spectroscopy discriminates viable and non-viable seeds of *Juniperus polycarpos*. *Silva Fennica*, 2015, vol. 49, no. 5, art. no. 1334. DOI: 10.14214/sf.1334.
- Devetaković J., Krinulović L., Jancović I.K. Effect of sowing pattern and density on the quality of one-year-old Austrian pine bareroot seedlings. *Reforesta*, 2020, no. 10, pp. 25–30. DOI: 10.21750/refor.10.03.86.
- Durova A.S., Zhigunov A.V. Vliyanie biouglya na vskhozhest' semyan i rost seyantsev khvojnykh porod v usloviyakh zakrytogo grunta. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2017, iss. 219, pp. 18–31. DOI 10.21266/2079-4304.2017.219.18-31. (In Russ.)
- Egbäck S., Bullock B.P., Isik F., McKeand S.E. Height-Diameter Relationships for Different Genetic Planting Stock of Loblolly Pine at Age 6. *Forest Science*, 2015, vol. 61, no. 3, pp. 424–428. DOI: 10.5849/forsci.14-015.
- Farhadi M., Tigabu M., Oden P.C. Near Infrared Spectroscopy as non-destructive method for sorting viable, petrified and empty seeds of *Larix sibirica*. *Silva Fennica*, 2015, vol. 49, no. 5, art. no. 1340. DOI: 10.14214/sf.1340.
- Farhadi M., Tigabu M., Stener L.-G., Oden P.C. Feasibility of visible + near infrared spectroscopy for non-destructive verification of European × Japanese larch hybrid seeds. *New Forests*, 2016, vol. 47, no. 2, pp. 271–285. DOI: 10.1007/s11056-015-9514-4.
- Farhadi M., Tigabu M., Pietrzykowski M., Danusevičius D., Oden P.C. Application of near infrared spectroscopy for authentication of *Picea abies* seed provenance. *New Forests*, 2017, vol. 48, no. 5, pp. 629–642. DOI: 10.1007/s11056-017-9589-1.
- Golub Yu.I. Otsenka kachestva tsifrovых izobrazheniy. *Sistemnyy analiz i prikladnaya informatika*, 2021, no. 4, pp. 4–15. DOI 10.21122/2309-4923-2021-4-4-15. (In Russ.)

Gomes, É.S., Foseca de Oliveira G.R., Rodrigues A.A., Corrêa C.G., Almeida E. de, Carvalho H.W.P. de, Arthur V., Silva E.A.A. da, Novikov A.I., Mastrangelo C.B. Ultrasound technology supplements zinc in soybean seeds and increases the photosynthetic efficiency of seedlings. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, vol. 227, art. no. 109619. DOI: 10.1016/j.compag.2024.109619.

Ivetić V., Grossnickle S., Škorić M. Forecasting the field performance of Austrian pine seedlings using morphological attributes. *IForest*, 2017, vol. 10, no. 1, pp. 99–107. DOI: 10.3832/ifor1722-009.

Jiang L., Xu X., Cai Q., Han R., Tigabu M., Jiang T., Zhao X. Variations in Growth and Photosynthetic Traits of Polyploid Poplar Hybrids and Clones in Northeast China. *Genes*, 2022, vol. 13, no. 11, art. no. 2161. DOI: 10.3390/genes13112161.

Kerkez I., Nonić M., Devetaković J., Šijačić-Nikolić M., Ivetić V. The effect of half-sib lines on morphological attributes of one-year old *Fraxinus angustifolia* seedlings. *Reforesta*, 2018, no. 5, pp. 15–21. DOI: 10.21750/REFOR.5.03.49.

Lebedev A.V. Prognozirovanie rosta po sredney vysote kul'tur sosny s ispol'zovaniem obobshchennogo algebraicheskogo raznostnogo podkhoda. *Iz-vestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2022, iss. 238, pp. 49–66. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.238.49-66. (In Russ.)

Mañas P., Castro E., Heras J. de las. Quality of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) seedlings using waste materials as nursery growing media. *New Forest*, 2009, vol. 37, iss. 3, pp. 295–311.

Monich Yu.I., Starovojtov V.V. Mera otsenki rezkosti tsifrovogo izobrazheniya. *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki*, 2011, no. 1, pp. 80–84. (In Russ.)

Nagimov Z.Ya. Zakonomernosti rosta i formirovaniya nadzemnoy fitomassy sosnovykh drevostoev: Diss. ... Doctor of Agricultural Sciences. Ekaterinburg: UGLTA, 2000. 409 p. (In Russ.)

Nigul K., Padari A., Kivistö A., Noe S.M., Korjus H., Laarmann D., Frelich L.E., Jõgiste K., Stanturf J.A., Paluots T., Põldveer E., Kängsepp V., Jürgenson H., Metslaid M., Kangur A. The Possibility of Using the Chapman–Richards and Näslund Functions to Model Height–Diameter Relationships in Hemiboreal Old-Growth Forest in Estonia. *Forests*, 2021, vol. 12, no. 2, art. no. 184. DOI: 10.3390/f12020184.

Novikov A.I. Diskovye separatory semyan v lesokhozyajstvennom proizvodstve. Voronezh: Voronezhskij gosudarstvennyj lesotekhnicheskij universitet im. G.F. Morozova, 2017. 159 p. (In Russ.)

Novikov A.I. Ekspress-analiz lesnykh semyan biofizicheskimi metodami. Voronezh: Voronezhskij gosudarstvennyj lesotekhnicheskij universitet im. G.F. Morozova, 2018. 128 p. (In Russ.)

Novikov A.I. Vliyanie sortirovaniya semyan sosny obyknovennoj po tsvetu i razmeram na ikh gruntovuyu vskhozhest' v kontejnerakh. *Khvojnye boreal'noj zony*, 2019a, vol. 37, no. 5, pp. 313–319. (In Russ.)

Novikov A.I. Nekotorye rezul'taty aprobatsii tekhnologii separatsii po kolichestvennomu priznaku semyan sosny obyknovennoj. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2019b, vol. 227, pp. 68–87. DOI: 10.21266/2079-4304.2019.227.68-87. (In Russ.)

Novikov A.I. Sovershenstvovanie tekhnologii polucheniya vysokokachestvennogo lesosemennogo materiala: Abstr. Diss. ... Doctor of Technical Sciences. Voronezh, 2021. 32 p. (In Russ.)

Novikov A.I., Ivetić V. The effect of seed size grading on seed use efficiency and height of one-year-old container-grown Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings. *Reforesta*, 2018, vol. 6, pp. 100–109. DOI: 10.21750/REFOR.6.08.61.

Novikov, A. I., Ivetić V. The effect of seed coat color grading on height of one-year-old container-grown Scots pine seedlings planted on post-fire site. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, art. no. 012043. DOI: 10.1088/1755-1315/226/1/012043.

Novikov A., Sokolov S., Drapalyuk M., Zelikov V., Ivetić V. Performance of Scots pine seedlings from seeds graded by colour. *Forests*, 2019, vol. 10, no. 12, art. no. 1064. DOI: 10.3390/F10121064.

Novikov A.I., Lisitsyn V.I., Tigabu M., Tylek P., Chuchupal S. Detection of Scots pine single seed in optoelectronic system of mobile grader: Mathematical modeling. *Forests*, 2021, vol. 12, no. 2, pp. 1–18. DOI: 10.3390/f12020240.

Novikov A.I., Drapalyuk M.V., Sokolov S.V., Novikova T.P. Ekspress-analiz semyan v lesokhozyajstvennom proizvodstve: teoreticheskie i tekhnologicheskie aspekty. Voronezh: Voronezhskij gosudarstvennyj lesotekhnicheskij universitet im. G.F. Morozova, 2022. 176 p. (In Russ.)

Novikov A.I., Rebko S.V., Novikova T.P., Petrishchev E.P. Indeks kachestva Diksona: svyaz' s tekhnologicheskim vozdejstviem na lesnye semena. *Lesotekhnicheskiy zhurnal*, 2023a, vol. 13, no. 1, pp. 23–36. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.1/2. (In Russ.)

Novikov A.I., Rebko S.V., Novikova T.P., Petrishchev E.P. Vliyanie individual'noj massy semyan sosny obyknovennoj (*Pinus sylvestris* L.) sorta «Negorelskaya» na 30-dnevnoe prorastanie v 40-yacheistykh SideSlit-kontejnerakh. *Lesotekhnicheskiy zhurnal*, 2023b, vol. 13, no. 2 (50), pp. 59–86. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.2/4. (In Russ.)

Novikov A.I., Rebko S.V., Novikova T.P., Petrishchev E.P. Issledovanie spektrometricheskikh pokazatelej semyan kak osnova intensifikatsii protsessa lesovyrashchivaniya kul'tur sosny obyknovennoj sorta “Negorelskaya”: grant RNF 23-26-00228. Moscow: Rossijskij nauchnyj fond, 2023c. URL: <https://elibrary.ru/jtyxux> (accessed: 01.10.2024) (In Russ.)

Novikova T.P. The choice of a set of operations for forest landscape restoration technology. *Inventions*, 2022, vol. 7, no. 1, art. no. 1. DOI: 10.3390/inventions7010001.

Novikova, T.P. Assessment of the forest seed material quality at the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) experimental site during adaptive restoration of forest landscapes. *Forestry Engineering Journal*, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 112–128. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.1/8.

Novikova T.P. Tekhnologicheskij passport «semya – kul'tura»: identifikatsiya parametrov RGB-yarkosti i tsvetnosti individual'nykh semyan *Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya na osnove avtorskoj metodiki. *Lesotekhnicheskiy zhurnal*, 2024, vol. 14, no. 3(55), pp. 37–60. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2024.3/3. (In Russ.)

Novikova T.P., Malysheva V.I., Petrishchev E.P. Vliyanie klimaticheskogo indeksa graduso-dnej na vitalitet 3-letnikh seyantsev sosny obyknovennoj iz sortirovannykh po spektrometriceskim svojstvam semyan. *Lesotekhnicheskiy zhurnal*, 2022, vol. 12, no. 1(45), pp. 110–118. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2022.1/9. (In Russ.)

Novikova T.P., Lisitsyn V.I., Petrishchev E.P. Spravochnaya informatsionnaya sistema FLR-Library dlya adaptivnogo lesovosstanovleniya: klasternyj analiz deskriptorov. *Lesotekhnicheskiy zhurnal*, 2023, vol. 13, no. 3(51), pp. 164–179. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.3/12. (In Russ.)

Novikova T.P., Tylek P., Mastrangelo C.B., Drapalyuk M.V., Kharin S.V., Novikov A.I. The Root Collar Diameter Growth Reveals a Strong Relationship with the Height Growth of Juvenile Scots Pine Trees from Seeds Differentiated by Spectrometric Feature. *Forests*, 2023, vol. 14, no. 6, art. no. 1164. DOI: 10.3390/f14061164.

Petrishchev E.P. Issledovanie vzaimosvyazi biometricheskikh parametrov yuvenil'nykh seyantsev sosny obyknovennoj iz konditsionnykh semyan pri otsenke rezul'tatov lesovosstanovleniya. *Lesotekhnicheskiy zhurnal*, 2021, vol. 11, no. 4(44), pp. 161–169. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/14. (In Russ.)

Petrichchev E.P., Novikova T.P., Novikov A.I. Rezul'taty issledovanij posevnykh kachestv semyan sosny obyknovennoj (*Pinus sylvestris* L., sort Negorelskaya) i opredeleniya indeksa kachestva Diksona 60-dnevnykh seyantsev v kontejnernom pitomnike. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registratsii bazy dannykh no. 2023624604 RF: no. 2023624416; decl. 01.12.2023; publ. 13.12.2023a. (In Russ.)

Petrichchev E.P., Novikova T.P., Rebko S.V., Novikov A.I. Rezul'taty morfometricheskikh issledovanij semyan sosny obyknovennoj (*Pinus sylvestris* L., sort Negorelskaya). Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registratsii bazy dannykh no. 2023624679 RFno. 2023624380; decl. 01.12.2023; publ. 18.12.2023b. (In Russ.)

Petrichchev E.P., Novikova T.P., Novikov A.I. Rezul'taty issledovanij spektrometriceskikh pokazatelej semyan sosny obyknovennoj (*Pinus sylvestris* L., sort Nego-rel'skaya). Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registratsii bazy dannykh no. 2023624752 RF: no. 2023624389; decl. 01.12.2023; publ. 19.12.2023c. (In Russ.)

Pimenov A.V. Bioraznoobrazie sosny obyknovennoj (*Pinus sylvestris* L.) v kontrastnykh ekotopakh Yuga Sibiri: Diss. ... Doctor of Biological Sciences.

Krasnoyarsk: Institut lesa im. V.N. Sukacheva Sibirskogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk, 2015. 406 p. (In Russ.)

Poplavskaya L.F., Rebko S.V., Tupik P.V. Rezul'taty rajonirovaniya sosny obyknovennoj sorta Negorelskaya v Respublike Belarus'. *Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe khozyajstvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyaemykh resursov*, 2021, vol. 1, no. 240, pp. 58–67. DOI: 10.52065/2519-402x-2021-240-7-58-67. (In Russ.)

Priyatkin N.S. Neinvazivnaya ekspress-otsenka raznokachestvennosti i khozyajstvennoj prigodnosti semennogo materiala na osnove ispol'zovaniya instrumental'nykh fizicheskikh metodov: Diss. ... Doctor of Biological Sciences. St. Petersburg: AFI, 2023. 253 p. (In Russ.)

Rabko S.U., Novikov A.I., Novikova T.P., Petrishchev E.P. Vzaimosvyazi mezhdu geometricheskimi i gravimetricheskimi parametrami semyan sosny obyknovennoj. *Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe khozyajstvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyaemykh resursov*, 2024a, vol. 276, pp. 66–76. DOI: 10.52065/2519-402H-2024-276-8. (In Russ.)

Rabko S.U., Novikov A.I., Novikova T.P., Petrishchev E.P. Kharakteristika proiskhozhdeniya iskhodnogo materiala sosny obyknovennoj (*Pinus sylvestris* L.) sorta «Negorelskaya». *Botanika (issledovaniya)*, 2024b, vol. 54, pp. 213–225. (In Russ.)

Rodriguez de Prado D., Riofrío J., Aldea J., McDermott J., Bravo F., Aza C.H. de. Species Mixing Proportion and Aridity Influence in the Height–Diameter Relationship for Different Species Mixtures in Mediterranean Forests. *Forests*, 2022, vol. 13, art. no. 119. DOI: 10.3390/f13010119.

Santos C.C., Goelzer A., da Silva O.B., dos Santos F.H.M., Silverio J.M., Scalon S.P.Q., Vieira M.C., Zárate N.A.H. Morphophysiology and quality of *Alibertia edulis* seedlings grown under light contrast and organic residue. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2023, vol. 27, no. 5, pp. 375–382. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v27n5p375-382.

Sousa D.J.P., Nogueira G.A.S., Teixeira K.B.S., Monteiro G.G.T.N., Brito A.E.A., Nascimento V.R., Albuquerque G.P.D., Oliveira T.J.M., Souza L.C., Freitas J.M.N., Oliveira Neto C.F., Okumura R.S. Mitigation of the effects of salt stress in cowpea bean through the exogenous application of brassinosteroid. *Brazilian Journal of Biology*, 2022, vol. 82, pp. 1–7. DOI: 10.1590/1519-6984.260818.

Tigabu M. Characterization of forest tree seed quality with near infrared spectroscopy and multivariate analysis: PhD Thesis. 2003. 56 p.

Tigabu M., Oden P.C., Shen D. Application of near-infrared spectroscopy for the detection of internal insect infestation in *Picea abies* seed lots. *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, vol. 34, no. 1, pp. 76–84. DOI: 10.1139/x03-189.

Материал поступил в редакцию 27.11.2024

Новикова Т.П., Ребко С.В., Петрищев Е.П., Новиков А.И. Ранний рост культур (*Pinus sylvestris* L. var. *Negorelskaya*), полученных из семян с известными спектрометрическими и морфометрическими параметрами // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 196–224. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.196-224

Цель исследования – пронаблюдать, оценить и проанализировать весь цикл получения лесного репродуктивного материала на примере сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) сорта «Негорельская», набирая банк данных, начиная от систематического изучения научного ландшафта по влиянию спектральных и морфометрических показателей индивидуальных семян на показатели полученных из них культур до наблюдения биометрических параметров онтогенетического развития сеянца/саженца на ювенильном этапе с учетом природно-производственных условий произрастания и времени/возраста пересадки. Исследований, содержащих сведения о раннем росте индивидуальных саженцев *Pinus sylvestris* L. сорта «Негорельская» по биометрическому показателю отношения высоты к диаметру корневой шейки из семян с известными оптометрическими параметрами яркости достаточно мало. Объектом исследования выступили 494-дневные саженцы, выращенные в контейнерах лесного питомника, пересаженные на восстанавливаемый лесной ландшафт осенью без закаливания (первая группа: возраст от момента пересадки – 364 дня) и весной после 150-дневного закаливания (вторая группа: возраст – 214 дней), а также 497-дневные контейнерные сеянцы после 367-дневного закаливания, измеренные перед пересадкой. Проверку нуль-гипотезы производили в предположении, что средние варианты независимой переменной В/Д отношения статистически не дифференцированы в группах саженцев с разным временем пересадки. Для уточнения степени различия (или отсутствия различия) использовали множественное сравнение на основании пост-хок теста Тьюки. Закономерности изменения биометрического отношения высоты саженца к диаметру стволика у корневой шейки (В/Д отношения) в зависимости от шести оптометрических показателей семенной оболочки визуализировали с помощью скаттерплота и аппроксимирующей линии регрессии второй степени. В будущем, проследив прирост саженцев сосны обыкновенной сорта «Негорельская» по высоте и диаметру на втором и последующих вегетационных периодах ювенильного этапа на восстанавливаемом участке лесного ландшафта, возможно будет точнее установить степень интенсификации лесовосстановительного производства *P. sylvestris* L. var. *Negorelskaya* в зависимости от начальных свойств семени.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, сорт «Негорельская», ювенильная стадия, ранний рост, биометрия саженцев, отношение высоты к диаметру корневой шейки, RGB-оптометрия семян, морфометрия семян, FLR-библиотека.

Novikova T.P., Rabko S.U., Petrishchev E.P., Novikov A.I. Early growth of seedling (*Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya) obtained from seeds with known spectrometric and morphometric features. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 196–224 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.196-224

The research aim is to observe, evaluate and analyze the entire cycle of obtaining forest reproductive material using the example of the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) od the Negorelskaya cultivar, collecting a data bank, starting from a systematic study of the scientific landscape on the influence of spectral and morphometric indicators of individual seeds on the indicators of crops obtained from them to observation biometric parameters of the ontogenetic development of a seedling/sapling at the juvenile stage, taking into account the natural production conditions of growth and the time/age of transplantation. There are few studies containing information on the early growth of individual seedlings of *Pinus sylvestris* L. of the Negorelskaya cultivar according to the biometric indicator of the ratio of height to diameter of the root neck of seeds with known optometric brightness parameters. The object of the study were 494-day-old seedlings grown in the containers of a forest nursery, transplanted to a regenerated forest landscape in autumn without hardening (the first group: age from the moment of re-planting – 364 days) and in spring after 150 days of hardening (the second group: age – 214 days), as well as 497-daily container seedlings after 367 days of hardening, measured before transplanting. The null hypothesis was tested under the assumption that the average variants of the independent variable H/D ratio were not statistically differentiated in groups of seedlings with different transplant times. To clarify the degree of difference (or lack of difference), a multiple comparison based on the post-hoc Tukey test was used. The patterns of changes in the biometric ratio of the height of the seedling to the diameter of the root neck (H/D ratio) depending on six optometric parameters of the seed coat were visualized using a scatterplot and an approximating regression line of the second degree. In the future, by tracing the growth of seedlings of the *Pinus sylvestris* L. Negorelskaya cultivar in height and diameter during the second and subsequent growing seasons of the juvenile stage in the restored area of the forest landscape, it will be possible to more accurately determine the degree of intensification of the reforestation production of *Pinus sylvestris* L. of the Negorelskaya cultivar depending on the initial properties of the seed.

Keywords: Scots pine, *Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya, juvenile stage, early growth, seedlings biometrics, Height/Diameter ratio, RGB-channels seed parameters, seed morphometry, FLR-Library.

НОВИКОВА Татьяна Петровна – доцент Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, кандидат технических наук. ORCID: 0000-0003-1279-3960. SPIN-код: 6783-5821. WoS ResearcherID: N-1272-2016. Scopus AuthorID: 57211295391.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: novikova_tp.vgltu@mail.ru

NOVIKOVA Tatyana P. – PhD (Technical), Associate Professor of Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov. ORCID: 0000-0003-1279-3960. SPIN-code: 6783-5821. WoS ResearcherID: N-1272-2016. Scopus AuthorID: 57211295391.

394087. Timiryazeva str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: novikova_tp.vgltu@mail.ru

РЕБКО Сергей Владимирович – заведующий кафедрой лесных культур и почвоведения Белорусского государственного технологического университета, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент. ORCID: 0000-0002-6892-2859. SPIN-код: 8060-2777. WoS ResearcherID: AAS-6402-2021. Scopus AuthorID: 57315692200.

220006, ул. Свердлова, д. 13а, г. Минск, Республика Беларусь. E-mail: rebko@belstu.by

RABKO Siarhei U. – PhD (Agriculture), Head of the Department of Forest Crops and Soil Science of Belarusian State Technological University. ORCID: 0000-0002-6892-2859. SPIN-code: 8060-2777. WoS ResearcherID: N-1272-2016. Scopus AuthorID: 57315692200.

220006. Sverdlova str. 13a. Minsk. Republic of Belarus. E-mail: rebko@belstu.by

ПЕТРИЩЕВ Евгений Петрович – младший научный сотрудник Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, кандидат технических наук. ORCID: 0000-0002-1395-3631. SPIN-код: 7169-8420. Scopus AuthorID: 57211291245.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: petrishchev.vgltu@mail.ru

PETRISHCHEV Evgeniy P. – PhD (Technical), junior researcher of Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov. ORCID: 0000-0002-1395-3631. SPIN-code: 7169-8420. Scopus AuthorID: 57211291245.

394087. Timiryazeva str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: petrishchev.vgltu@mail.ru

НОВИКОВ Артур Игоревич – ведущий научный сотрудник Агрофизического научно-исследовательского института, отдел 140 – управления агротехнологиями и агромониторингом, доктор технических наук, доцент. ORCID: 0000-0003-1230-0433. SPIN-код: 7957-7466. WoS ResearcherID: N-1225-2016. Scopus AuthorID: 57207453678.

195220, Гражданский пр., д. 14, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: arthur.novikov@agrophys.ru

NOVIKOV Arthur I. – DSc (Technical), Leading Researcher, Agrophysical Research Institute, Department 140 – Management of Agricultural Technologies and Agricultural Monitoring, Associate Professor. ORCID: 0000-0003-1230-0433. SPIN-code: 7957-7466. WoS ResearcherID: N-1225-2016. Scopus AuthorID: 57207453678.

195220. Grazhdansky av. 14. St. Petersburg. Russia. E-mail: arthur.novikov@agrophys.ru

Т.А. Трубачева, Г.С. Щымбал

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВИДОВОГО СОСТАВА
НЕКУЛЬТИВИРУЕМЫХ ТРАВ В ГАЗОННЫХ СООБЩЕСТВАХ
ОБЪЕКТОВ НАСАЖДЕНИЙ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГА И ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ**

Введение. Газоны являются неотъемлемой частью ландшафтов городской среды, и их роль в формировании комфортной среды только возрастает. Причина этого – не только эстетическая функция, но и их санитарно-гигиеническая роль: осаждение пыли, химическая и биологическая очистка городского воздуха, смягчение микроклимата, снижение уровня шума и т. п.

На состояние газонов влияют, в первую очередь, условия, в которых они развиваются, – как почвенно-климатические, так и антропогенные факторы среды. Из основных неблагоприятных факторов можно выделить следующие:

- высокая кислотность почвы ($\text{pH } 4,0\ldots4,5$), вызванная усиленным стоком кислых осадков [Санаева, 2012];
- высокий уровень засоленности почвы из-за применения реагентов для ускорения таяния снега на газонах, прилегающих к дорогам и проезжим участкам улиц и дворов [Романова, 2021];
- неблагоприятный световой режим на территориях северной, северо-западной и западной экспозиций и под кронами деревьев [Гречушкина-Сухорукова, 2019];
- высокий уровень запыленности и концентрации техногенных загрязнителей;
- иссушение газонов в летний период, а в весенний и осенний периоды – подтопление, вызывающее выпревание трав;
- выделение при разложении лиственного опада веществ, ингибирующих рост трав (фенольно-дубильных и др.) [Санаева, 2012];
- неблагоприятные почвенно-гидрологические условия в зонах подземных коммуникаций.

Одним из важных негативных факторов влияния на состояние газонов является выкашивание, часто нерегулируемое. Необходимо отметить со-

кращение проективной площади газонов вследствие вытаптывания их из-за несовершенной системы дорожно-тропиночной сети, а также разрушение травяных покрытий из-за образования спонтанных площадок для игр и мест досуга.

Газонные травы, входящие в состав газонных травосмесей, часто не обладают той степенью устойчивости, которая могла бы обеспечивать высокое качество и долговечность газонов в условиях северо-западного региона, в частности, Санкт-Петербурга и его пригородов, поэтому возникает необходимость совершенствования состава ассортимента травянистых растений, в первую очередь, используя потенциал их видового разнообразия в данном регионе.

Цель настоящего исследования – выявление видового состава некультивируемых видов травянистых растений, представляющих интерес с точки зрения дальнейшего их использования при создании так называемых «альтернативных» газонов. Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- оценить и провести сравнительный анализ видового состава газонов на примерах городских и пригородных объектов зеленых насаждений;
- провести сравнительный анализ основных показателей газонов: доли газонных трав, видового состава, долевого участия и встречаемости некультивируемых видов;
- провести анализ травянистых растений по принадлежности к эколого-ценотическим группам;
- выявить потенциал видового разнообразия травянистых растений данного региона для использования в «альтернативных» газонах.

Материалы и методика исследования. Материалом послужили результаты обследования газонов на 18 объектах зеленых насаждений в Петербургском районе Санкт-Петербурга и г. Всеволожске Ленинградской области. В рамках данной статьи приводятся сведения о видовом составе газонов, долевом участии видов травянистых растений и их встречаемости, а также выявлен видовой состав некультивируемых трав, общих для обоих районов исследований.

Основными методами исследования выступили: наблюдение и измерение, сравнительный анализ, системный подход.

Оценка состояния газонов проводилась согласно «Методике оценки экологического состояния зеленых насаждений общего пользования г. Санкт-Петербурга». Оценивались тип газона, его площадь и, в частно-

сти, площадь проективного покрытия, наличие и площади проплешин. Также определяли категорию состояния газона, в том числе, плотность и однородность травянистого покрова, а также видовой состав травянистого покрова, в том числе некультивируемых видов.

Участки обследований и пробные площади закладывали с учетом многообразия условий: разные уровни инсоляции, режимы увлажнения, кислотности и уплотнения почвы, особенности рельефа. В парках учитывалось также использование газонов в качестве площадок для отдыха.

На крупных объектах насаждений закладывались пробные площади в пределах границ дорожек, на небольших по площади объектах проводили обследование всего газона.

Встречаемость оценивали по ряду условных градаций:

- единично и редко – вид отмечен на 1 объекте;
- довольно редко – на 2–3 объектах;
- нередко – на 4–6 объектах;
- довольно часто – на 7–11 объектах;
- часто – на 16–18 объектах [Обзор..., 2019].

Результаты исследования. Качество газона, в первую очередь, определяется долей газонных, т. е. культивируемых трав. По результатам исследований газонные травы представлены в основном следующими видами: *Festuca rubra* L., *Poa pratensis* L., *Festuca trichophylla* (Ducros ex Gaudin) K. Richt., *Festuca ovina* L., *Poa trivialis* L.

Доля газонных трав в травяном покрытии объектов исследований в г. Всеволожске значительно превышает этот показатель в Санкт-Петербурге, в то время как видовой состав некультивируемых трав во Всеволожске в разы больше, чем на объектах исследований в Петроградском районе Санкт-Петербурга (табл. 1).

Таблица 1

Сравнительный анализ соотношения доли газонных и некультивируемых видов в травяном покрове на объектах исследований

Comparative analysis of the ratio of the proportion of lawn and uncultivated species in the grass cover at the research sites

Объекты исследований	Долевое участие трав, %	
	газонные	некультивируемые
Санкт-Петербург, Петроградский р-н	51,3	48,7
г. Всеволожск	71,2	28,8

Основной причиной сокращения доли газонных трав в центральных районах являются неблагоприятные условия существования, в том числе уплотнение и засоление почвы, часто неблагоприятный световой режим. Во Всеволожске по сравнению с центральной частью города намного более благоприятные условия среды существования газонов.

Рассмотрим особенности видового состава некультивируемых видов на объектах обследований (табл. 2). Видовой состав газонов в пригородных зонах определяется, прежде всего, тесной взаимосвязью с окружающей природной средой, где преобладают растения более богатой естественной флоры.

Таблица 2

Характеристика видового состава газонов некультивируемых видов на объектах исследований

Characteristics of the species composition of lawns of uncultivated species at research sites

Объекты исследований	Количество видов			
	Доля участия 7–15%	Доля участия 4–6,5%	Доля участия 0,5–3%	Всего
Санкт-Петербург, Петроградский р-н	4	17	16	37
г. Всеволожск	9	20	90	119

Несомненно, что общее видовое разнообразие газонов в центре мегаполиса и пригородных районах различно: на газонах городских объектов этот показатель значительно меньше, чем в пригородных зонах. Закономерно, что структура видового состава газонов также неодинакова. Смещается и долевое участие видов. В то время как на газонах г. Всеволожска преобладает группа видов с небольшой долей участия (0,5–3%), на объектах Петроградского района превалируют виды со средним и малым долевым участием (4–6,5% и 0,5–3% соответственно).

Разница в долевом участии видов травянистых растений в газонных сообществах разных объектов может быть обусловлена различиями в условиях содержания газонов. Так, на пригородных территориях уровень антропогенного воздействия, такого как регулярная стрижка газонов, использование химических средств и механическое повреждение, заметно ниже. Это позволяет существовать более разнообразным видам, хотя и с

небольшой долей участия. В условиях мегаполиса антропогенное воздействие значительно выше. Это приводит к тому, что здесь могут выживать только наиболее устойчивые виды, однако их доля участия может быть средней или небольшой.

В процессе работы также оценивали встречаемость повторяющихся в обоих районах исследований видов. Учитывали не только количество объектов, но и количество пробных площадей, на которых встречался каждый из представленных видов (табл. 3). Встречаемость оценивали по условной шкале, представленной выше.

Таблица 3

Характеристика встречаемости некультивируемых видов на объектах исследований

Characteristics of the occurrence of uncultivated species at research sites

Категории встречаемости	Встречаемость по объектам, объектов	Встречаемость по ПП, ПП	Количество таксонов
Единично и редко	1	1–5	94
Довольно редко	2–3	1–8	18
Нередко	4–6	4–11	13
Довольно часто	7–11	44–66	7
Часто	16–17	более 100	2

Всего в травяном покрове объектов исследований выявлено 130 видов травянистых растений, из них на объектах Петроградского района Санкт-Петербурга – 37 таксонов, а во Всеволожске – 119 таксонов. Большую часть видового состава составляют единично и редко встречающиеся виды и лишь малую долю таксонов составляют категории встречаемости «нередко», «довольно часто» и «часто» (22 таксона). Подобные результаты, с учетом характеристик объектов исследований, могут свидетельствовать, с одной стороны, о стрессовых условиях существования газонных сообществ, с другой, учитывая значительное разнообразие некультивируемых трав, – предоставляют возможности для определения наиболее ценных видов для использования в альтернативных травосмесях.

Выделен список видов, которые встречаются на объектах как Петроградского района Санкт-Петербурга, так и г. Всеволожска. В этот список входит 22 таксона (табл. 4).

Таблица 4

Видовой состав некультивируемых видов, встречающихся на газонах Петроградского района Санкт-Петербурга и г. Всеволожска

The species composition of uncultivated species found on the lawns of the Petrogradsky district of St. Petersburg and the city of Vsevolozhsk

№	Название	Долевое участие, %	Кол-во ПП/объектов
1	<i>Cirsium vulgare</i> (Savi) Petr.	1–3	14 / 5
2	<i>Galinsoga quadriradiata</i> Ruiz & Pav.	1–5	4 / 2
3	<i>Polygonum aviculare</i> L.	3–7,5	66 / 11
4	<i>Stellaria media</i> (L.) Vill.	1–5	6 / 4
5	<i>Trifolium repens</i> L.	1–3–10	20 / 5
6	<i>Trifolium pratense</i> L.	2–5	3 / 3
7	<i>Senecio vulgaris</i> L.	2–10	3 / 2
8	<i>Potentilla anserina</i> L.	2–8	14 / 7
9	<i>Arctium lappa</i> Willd.	1–10	4 / 4
10	<i>Alchemilla vulgaris</i> L.	1	2 / 2
11	<i>Chenopodium album</i> L.	4–10	21 / 7
12	<i>Erigeron canadensis</i> Brot.	5–10	3 / 3
13	<i>Taraxacum officinale</i> F.H.Wigg.	2–13	116 / 16
14	<i>Galium aparine</i> L.	1–3	5 / 4
15	<i>Plantago major</i> L.	2–7–21	111 / 18
16	<i>Artemisia vulgaris</i> Burm.f.	2–4	4 / 4
17	<i>Elytrigia repens</i> (L.) Nevski	3–10	57 / 9
18	<i>Matricaria discoidea</i> DC.	2–4–30	54 / 11
19	<i>Aegopodium podagraria</i> L.	2–15	28 / 5
20	<i>Achillea millefolium</i> L.	2–9	5 / 4
21	<i>Thlaspi arvense</i> L.	1–13	6 / 3
22	<i>Sonchus oleraceus</i> L.	2–10	3 / 2

В этот перечень входят виды, встречаемость большинства которых выше, чем категории «единично и редко», но значения долевого участия значительно различаются.

Среди общих для обоих районов исследований видов некультивируемых трав наибольшее долевое участие отмечено у следующих: *Matricaria discoidea* – до 30%, *Plantago major* – до 21%, *Aegopodium podagraria* – до 15%, *Thlaspi arvense* и *Taraxacum officinale* – до 13%.

Доля участия 8–10% отмечена у *Trifolium repens*, *Senecio vulgaris*, *Arctium lappa*, *Chenopodium album*, *Erigeron canadensis*, *Elytrigia repens*, *Achillea millefolium* и *Sonchus oleraceus*.

Меньшее присутствие в газонах (1–5%) выявлено у: *Cirsium vulgare*, *Galinsoga quadriradiata*, *Polygonum aviculare*, *Stellaria media*, *Galium aparine*, *Artemisia vulgaris*, *Trifolium pratense* и *Alchemilla vulgaris*. Последние два вида могли бы стать перспективными для использования в альтернативных травосмесях.

Все перечисленные виды можно отнести к типичным сорным растениям из группы мелкотравных растений (большая часть), а также средних и крупных растений (*Aegopodium podagraria*, *Sonchus oleraceus*, *Cirsium vulgare*, *Arctium lappa*, *Artemisia vulgaris*). Участие некультивируемых трав из группы мелкотравных растений не всегда негативно отражается на внешнем виде газона, в то время как участие крупных растений в травяном покрытии резко снижает уровень его декоративности.

Чтобы реально оценить долю таких газонов на объектах исследований, рассмотрим их встречаемость на объектах и пробных площадках.

Максимальная встречаемость отмечена у следующих видов: *Plantago major* – на 18 объектах и 111 ПП; *Taraxacum officinale* – на 16 объектах и 116 ПП. Это типичные, широко распространенные сорные растения, являющиеся индикаторами уплотнения почвы.

Довольно часто встречаются (в порядке возрастания): *Potentilla anserina* – на 7 объектах и 14 ПП; *Chenopodium album* – на 7 объектах и 21 ПП; *Elytrigia repens* – на 9 объектах и 57 ПП; *Polygonum aviculare* – на 11 объектах и 66 ПП; *Matricaria discoidea* – на 11 объектах и 54 ПП.

К категории встречаемости «нередко» можно отнести следующие виды (в порядке возрастания): на 4 объектах – *Artemisia vulgaris*, *Arctium lappa*, *Galium aparine* и *Achillea millefolium*, *Stellaria media*; на 5 объектах – *Cirsium vulgare*, *Trifolium repens*, *Aegopodium podagraria*.

Довольно редко встречаются (в порядке возрастания): *Alchemilla vulgaris*, *Senecio vulgaris*, *Sonchus oleraceus* и *Galinsoga quadriradiata* – на 2 объектах; *Trifolium pratense*, *Erigeron Canadensis* и *Thlaspi arvense* – на 3 объектах.

Таким образом, можно утверждать, что виды крупных растений, резко ухудшающие качество газонов, выявлены в категориях встречаемости «нередко» (4–5 объектов) и «довольно редко» (2 объекта).

Виды с максимальным долевым участием (*Plantago major*, *Taraxacum officinale*, *Matricaria discoidea*) характеризуются и наибольшей встречаемостью («часто» и «довольно часто»).

Основная часть некультивируемых видов со значительным долевым участием (*Chenopodium album*, *Elytrigia repens*, *Achillea millefolium* и

Trifolium repens) характеризуется встречаемостью «довольно часто» и «нередко». Выявленные 22 вида травянистых растений разделены на эколого-ценотические группы (табл. 5).

Таблица 5

Распределение общих для обоих районов исследований видов по эколого-ценотическим группам

Distribution of the species common to both research areas by ecological-coenotic groups

№	Название	Эколого-ценотическая группа
1	<i>Cirsium vulgare</i>	сорно-рудеральные
2	<i>Galinsoga quadriradiata</i>	сорно-рудеральные, инвазионные
3	<i>Polygonum aviculare</i>	сорно-рудеральные
4	<i>Stellaria media</i>	сорно-рудеральные
5	<i>Trifolium repens</i>	сорно-луговые
6	<i>Trifolium pratense</i>	луговые
7	<i>Senecio vulgaris</i>	сорно-рудеральные
8	<i>Potentilla anserina</i>	сорно-рудеральные
9	<i>Arctium lappa</i>	сорно-рудеральные
10	<i>Alchemilla vulgaris</i>	сорно-рудеральные
11	<i>Chenopodium album</i>	сорно-рудеральные
12	<i>Erigeron canadensis</i>	сорно-рудеральные
13	<i>Taraxacum officinale</i>	сорно-луговые
14	<i>Galium aparine</i>	луговые
15	<i>Plantago major</i>	сорно-рудеральные
16	<i>Artemisia vulgaris</i>	сорно-рудеральные
17	<i>Elytrigia repens</i>	луговые
18	<i>Matricaria discoidea</i>	сорно-рудеральные
19	<i>Aegopodium podagraria</i>	сорно-дубравные
20	<i>Achillea millefolium</i>	лугово-лесные
21	<i>Thlaspi arvense</i>	сорно-луговые
22	<i>Sonchus oleraceus</i>	сорно-рудеральные

В представленном ассортименте превалируют растения из укрупненной группы «сорные»: сорно-рудеральные – 14 видов, сорно-луговые и сорно-дубравные – 4 вида. В группы «луговые» и «лугово-дубравные» вошли 4 вида: *Trifolium pratense*, *Galium aparine*, *Elytrigia repens* и *Achillea millefolium* [Флора..., 2024].

В списке повторяющихся на газонах в обоих районах исследования видов травянистых растений выявлены следующие индикаторы уплотне-

ния почвы: *Polygonum aviculare*, *Taraxacum officinale*, *Plantago major*, *Elytrigia repens*, *Potentilla anserina* и *Trifolium repens*. Все эти виды, кроме *Trifolium repens*, встречаются часто или довольно часто (8–18 объектов) и имеют долевое участие в травяном покрове до 8–20%.

Для общего выявленного на объектах исследований видового состава травянистых растений также были определены эколого-ценотические группы (табл. 6).

Таблица 6

Распределение общего видового состава по эколого-ценотическим группам

Distribution of the general species composition by ecological and cenotic groups

№	Укрупненная группа / кол. видов	Эколого-ценотическая группа	Количество видов
1.	Культурные (11)	Газонно-луговые	2
2.		Культурные	9
3.	Лесные (6)	Бореальные	2
4.		Дубравно-травные	2
5.		Лесные	1
6.		Опушечные	1
7.	Луговые (27)	Лесолуговые	5
8.		Лугово-опушечные	5
9.		Луговые	14
10.		Суходольно-луговые	3
11.	Приводные (15)	Лугово-болотные	2
12.		Травяно-болотные	5
13.		Прибрежно-водные	7
14.		Прибрежно-луговые	1
15.	Сорные (68)	Сегетально-рудеральные	2
16.		Сорно-дубравные	5
17.		Сорно-луговые	13
18.		Сорно-опушечно-луговые	1
19.		Сорно-рудеральные	43
20.		Сорно-рудерально-инвазионные	1
21.		Сорно-рудерально-заносные	1
22.		Сорно-заносные	2
23.	Нарушенные (1)	Нарушенные	1
24.	Заносные (2)	Заносные	2

Весь видовой состав некультивируемых трав, выявленный на объектах исследований, можно разделить на 24 эколого-ценотические группы, которые для удобства обобщены в семь укрупненных групп [Фардеева, Шафигуллина, 2018].

В общем ассортименте некультивируемых видов, выявленных в травяном покрове всех объектов исследований также, как и в общем для двух районов видовом составе, наиболее широко представлена эколого-ценотическая группа «сорные растения» (68 видов).

На газонах выявлены два инвазионных вида – *Galinsoga quadriradiata* (до 5%) и *Erigeron canadensis* (до 10%). В настоящее время их участие в травянистом покрове невелико, и их можно отнести в категорию потенциально инвазионных видов, но их численность необходимо контролировать.

Обсуждение. Доля газонных трав в травяном покрытии объектов исследований в г. Всеволожске значительно превышает этот показатель в Санкт-Петербурге. Вместе с этим видовое разнообразие газонов в центральный районах Санкт-Петербурга значительно меньше, чем во Всеволожске, в первую очередь, по составу некультивируемых видов.

Виды с максимальным долевым участием характеризуются и наибольшей встречаемостью («часто» и «довольно часто»).

На газонах выявлены два инвазионных вида, численность которых необходимо контролировать.

В общем списке выявленных видов травянистых растений превалируют представители эколого-ценотической группы «сорные растения» (68 видов).

Для оптимизации видового состава газонов представляют интерес, прежде всего, виды, относящиеся к луговым (27 видов) и лесным (6 видов) ценозам. Такие виды могут составить основу травостоев, развивающихся в особых условиях, где нет необходимости в регулярном кошении газонов, или в сложных условиях недостаточного освещения или влажности. Перспективны также приводные растения, которые могут составить основу травяного покрова береговых территорий с неблагоприятным водным режимом почвы.

Заключение. Проведенное исследование позволяет выявить наиболее перспективные виды растений в травяном покрове Санкт-Петербурга и Ленинградской области для введения их в состав травяных смесей, в первую очередь, для территорий со сложными почвенно-климатическими или антропогенными условиями.

Изучение видового состава некультивируемых трав может стать основой практических рекомендаций для создания устойчивых газонных сообществ объектов зеленых насаждений, особенно в сложных климатических и антропогенных условиях.

Вклад авторов: Т.А. Трубачева – 80%, Г.С. Цымбал – 20%.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Гречушкина-Сухорукова Л.А. Динамика освещенности газонов в тени крон древесных насаждений различных пород // Юг России: экология, развитие. 2019. Т. 14, № 2. С. 48–58.

Обзор культурной флоры Санкт-Петербурга (Россия): монография. М.: РОСА, 2019. 179 с.

Романова И.В. Оценка динамики засоления почв придорожных территорий вследствие применения противогололедных реагентов и их влияние на фитоценозы // Успехи современного естествознания. 2021. № 4. С. 71–76.

Санаева Т.С. Деградация травянистой растительности на объектах озеленения города // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2012. № 1. С. 175–180.

Фардеева М.Б., Шаfigуллина Н.Р. Экология растений и методы фитоиндикации: учеб. пособ. к теор. и практ. занятиям. Казань: Казанский федеральный университет, 2018. 150 с.

Флора сосудистых растений Центральной России: база данных. URL: https://www.impb.ru/eco/show_info.php?id=845 (дата обращения: 12.11.2024).

References

Fardeeva M.B., Shafiqullina N.R. Plant Ecology and Methods of Phytoindication: textbook for theor. and pract. classes. Kazan: Kazan Federal University, 2018. 150 p. (In Russ.)

Flora of Vascular Plants of Central Russia: database. URL: https://www.impb.ru/eco/show_info.php?id=845 (accessed November 12, 2024). (In Russ.)

Grechushkina-Sukhorukova L.A. Dynamics of illumination of lawns in the shadow of the crowns of tree plantations of various species. *South of Russia: ecology, development*, 2019, vol. 14, no. 2, pp. 48–58. (In Russ.)

Overview of the cultural flora of St. Petersburg (Russia): monograph. Moscow: ROSA, 2019. 180 p. (In Russ.)

Romanova I.V. Assessment of the dynamics of salinization of soils of roadside areas as a result of the use of deicing agents and their influence on phytocenoses. *Advances in Modern Natural Sciences*, 2021, no. 4, pp. 71–76. (In Russ.)

Sanaeva T.S. Degradation of herbaceous vegetation at urban greening facilities. *Bulletin of the Moscow State University of Forestry – Lesnoy Vestnik*, 2012, no. 1, pp. 175–180. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 29.09.2024

Трубачева Т.А., Цымбал Г.С. Исследование видового состава некультивируемых трав в газонных сообществах объектов насаждений Санкт-Петербурга и Ленинградской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 225–238. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.225-238

В статье отражены сведения по структуре и видовому составу газонов на объектах зеленых насаждений общего пользования г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Особое внимание удалено видовому составу некультивируемых видов травянистых растений, представляющих интерес с точки зрения дальнейшего их использования при создании так называемых «альтернативных» газонов. Проведены оценка и сравнительный анализ видового состава газонов на примерах городских и пригородных объектах зеленых насаждений; анализ травянистых растений по принадлежности к эколого-ценотическим группам; выявлен потенциал видового разнообразия травянистых растений данного региона для использования при составлении травяных смесей. Оценка состояния газонов проводилась согласно «Методике оценки экологического состояния зеленых насаждений общего пользования г. Санкт-Петербурга». Травянистый покров обследовали на 18 объектах зеленых насаждений в Петроградском районе Санкт-Петербурга и г. Всеволожске Ленинградской области в разных условиях инсоляции, увлажнения, кислотности и уплотнения почвы, особенностей рельефа. По результатам исследования установлено, что на газонах и города, и области выявлены два инвазионных вида, численность которых необходимо контролировать. Видовое разнообразие газонов по составу некультивируемых видов в центральных районах Санкт-Петербурга значительно меньше, чем во Всеволожске, что абсолютно ожидаемо. В общем списке выявленных видов травянистых растений превалируют представители эколого-ценотической группы «сорные растения» (68 видов), многие из которых являются индикаторами уплотнения и закисления почв. Для оптимизации видового состава газонов представляют интерес, прежде всего, виды, относящиеся к луговым (27 видов) и лесным (6 видов) ценозам. Такие виды могут составить основу травостоев, развивающихся в особых условиях, где нет необходимости регулярного кошения газонов, или в сложных условиях недостаточного освещения или влажности.

Ключевые слова: городская среда, газон, факторы среды, видовой состав, встречаемость, долевое участие, эколого-ценотическая группа.

Trubacheva T.A., Tsymbal G.S. Investigation of the species composition of uncultivated herbs in lawn communities of planting sites in St. Petersburg and the Leningrad region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 225–238 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.225-238

The article contains information on the structure and species composition of lawns, which are an integral part of urban landscapes. It is noted that the floral composition of lawns determines not only its appearance, but also its stability in different environmental conditions. The condition of lawns is influenced, first of all, by the conditions in which they develop. Special attention is paid to the species composition of uncultivated herbaceous plant species, which are of interest from the point of view of their further use in the creation of so-called "alternative" lawns. The assessment and comparative analysis of the species composition of lawns using examples of urban and suburban green spaces was conducted; the analysis of herbaceous plants by belonging to ecological-coenotic groups was made; the potential of the species diversity of herbaceous plants in this region for use in the preparation of herbal mixtures was assessed. The assessment of the lawn condition was carried out according to the "Methodology for assessing the ecological condition of public green spaces in St. Petersburg." The herbaceous cover was examined at 18 green space sites in the Petrogradsky district of St. Petersburg and Vsevolozhsk, Leningrad region, under different conditions of insolation, moisture, acidity and soil compaction, and relief features. According to the results of the study, attention should be paid to the fact that two invasive species have been identified on the lawns of both the city and the region, the number of which must be controlled. The species diversity of lawns and uncultivated species in the central districts of St. Petersburg is significantly less than in Vsevolozhsk, which is absolutely expected. The general list of identified species of herbaceous plants is dominated by representatives of the ecological and cenotic group "weeds" (68 species), many of which are indicators of soil compaction and acidification. And in order to optimize the species composition of lawns, first of all, species related to meadow (27 species) and forest (6 species) cenoses are of interest. Such species can form the basis of herb stands that develop in special conditions where there is no need for regular lawn mowing or in difficult conditions of insufficient lighting or humidity.

Keywords: urban environment, lawn, environmental factors, species composition, occurrence, share participation, ecological-coenotic group.

ТРУБАЧЕВА Татьяна Алексеевна – старший преподаватель кафедры декоративного растениеводства Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 6353-3331. ORCID: 0009-0002-3651-1577.

194027, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: true.tt@yandex.ru

TRUBACHEVA Tatyana A. – Senior Lecturer, Department of Ornamental Plant Growing, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 6353-3331. ORCID: 0009-0002-3651-1577.

194027. Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: true.tt@yandex.ru

ЦЫМБАЛ Галина Сергеевна – доцент кафедры декоративного растениеводства Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат педагогических наук. SPIN-код: 9177-6414. ORCID: 0009-0008-8249-0010.

194027, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: rgs@yandex.ru

TSYMBAL Galina S. – PhD (Pedagogical), Associate Professor, Department of Ornamental Plant Growing, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 9177-6414. ORCID: 0009-0008-8249-0010.

194027. Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: rgs@yandex.ru

А.А. Добровольский

**АНАЛИЗ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ
В ОБЛАСТИ ЛЕСНОЙ ПОЛИТИКИ В РОССИИ:
СОЦИОЛОГИЧЕСКИЙ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ПОДХОДЫ**

Введение. «Лесная политика» может рассматриваться не только как научная дисциплина, но и как область практической деятельности, связанная с управлением лесными ресурсами, межгосударственными и межведомственными отношениями, а также как часть государственной или региональной политики в сфере природопользования и охраны окружающей среды. Научная дисциплина «Лесная политика» рассматривается как относительно молодая, междисциплинарная область на стыке социальных наук, сфокусированная на лесных явлениях [Koch, Tetley, 2023]. Область дисциплины включает анализ процессов управления, институтов, интересов сторон и конфликтов в лесном секторе [Krott, 2005].

Существуют разные подходы к определению термина «политика». Согласно Большому российскому энциклопедическому словарю [Большой..., 2009] политика (от греч. *politika* – государственные или общественные дела, *polis* – государство) – это сфера деятельности, связанная с отношениями между социальными группами, сущность которой заключается в определении форм, задач и содержания деятельности государства.

Существует и другой подход. Согласно Ожегову [2004] политика – это деятельность органов государственной власти и управления, отражающая общественный строй и экономическую структуру страны, а также деятельность партий и других организаций и общественных групп, определяемая их интересами и целями.

Авторы публикаций в области лесной политики не имеют единого, устоявшегося ее определения. Существуют такие трактовки как «стратегия» [Соколов, 2003], «совокупность норм» [Писаренко, Страхов, 2001], «совокупность институтов» [Блам и др., 2002], «политические заявления» [Mayers, Bass, 1998], «курс действий» [Исаев, Коровин, 2009; Michael, 1979; Forest Policy, 1998], «определение целей и средств ведения лесного хозяйства» [Моисеев, 2005; Riihinen, Tikkanen, 1993].

Шутов [2012] определяет политику как искусство управления городами-государствами. Главное в этом искусстве – преобладание общих интересов общества над частными.

Собственно, термин «лесная политика» не является новым для российского лесного сектора. Уже в конце 19-го – начале 20-го веков было много публикаций в специализированных изданиях. Наиболее активно лесная политика обсуждалась в периоды радикальных экономических реформ. Как указывает Иванов [2009], в начале 20-го века группа авторов, занимавшихся вопросами лесной политики в России, значительно расширилась, а с 1917 г. интерес к этой теме резко возрос. Это было вызвано реформами, которые кардинально изменили государственное устройство России, ее экономические и политические основы.

Как отметил Петров [2015], с 1917 г. в России не было руководящих документов или законов, которые содержали бы в названии словосочетание «лесная политика». Это можно объяснить тем, что до недавнего времени лесная политика заменялась политикой Коммунистической партии. После распада СССР, в условиях новых экономических отношений, время для создания стабильной лесной политики и реорганизации лесного хозяйства еще не пришло.

Согласно Антоновой [2010] большинство российских авторов рассматривают лесную политику как совокупность действий, предпринимаемых от имени государства в отношении лесов для достижения поставленных государством целей.

Это отражает сложившееся под влиянием системы, где существует сильный государственный контроль над всеми аспектами общественной жизни, общественное и профессиональное мнение. Несмотря на то, что происходит трансформация общественного сознания, подавляющее большинство российских авторов в определении лесной политики указывают, что это процесс реализации государственной собственности на лесной фонд [Чернякевич, 2005; Иванов, 2009].

[Петров, 2012, 2015] условно различают понимание термина «лесная политика» для демократических и авторитарных государств. Для демократических государств лесная политика – это непрерывный процесс переговоров между органами государственной власти, неправительственными организациями и населением с целью достижения баланса их интересов. Для авторитарных государств лесная политика – это инструмент реализации власти (законодательной, исполнительной и судебной) в лесном секторе для достижения поставленных государством целей.

Резюмируя все вышесказанное, можно выделить два основных понимания этого термина в российском научном сообществе и, соответственно, сформулировать два наиболее цитируемых определения:

1. Лесная политика – это процесс реализации государственной власти в сфере лесного хозяйства,

2. Лесная политика – это переговорный процесс между государством, бизнесом, неправительственными организациями и всеми заинтересованными сторонами с целью достижения баланса интересов в сфере лесного сектора.

Хотя лесная политика является устоявшейся дисциплиной во многих университетах мира, её содержание варьируется от страны к стране в зависимости от места лесного сектора в национальной экономике и обществе, а также в зависимости от социально-экономических предпосылок [Krott, 2005]. Другими словами, эта дисциплина не может быть отделена от социальной, экономической и политической среды, в которой она осуществляется [Wiersum, Arts, 2013].

В России начало исследований в этой области пришлось на период реформ, когда страна активно присоединялась к различным международным инициативам по сохранению лесов и устойчивому лесопользованию. Россия обладает крупнейшими в мире лесными ресурсами и пережила период бурных общественных изменений. Последствия их влияния на лесной комплекс, как на национальном, так и на региональном уровнях требуют изучения с использованием уже накопленных в этой области знаний [Антонова, Шейнгауз, 2002; Антонова, 2010].

Современную ситуацию с процессами лесной политики необходимо рассматривать через исторические аспекты. В советский период, когда была сильна роль государства, «лесная политика» рассматривалась главным образом в терминах «жесткого планирования и контроля», сильных иерархий и всестороннего контроля со стороны государства. Затем, после распада Советского Союза, в процессе трансформации государства на дальнейшее развитие лесной политики повлияли несколько групп факторов: с одной стороны, переход к рыночной экономике, с другой – сильное идеологическое наследие управления через «сильное правление», трудности с поиском модели управления лесами, ведущей к эффективному лесному хозяйству, в рамках огромной страны и многочисленные изменения законодательства.

Вовлеченность различных заинтересованных сторон в попытки повлиять на лесную повестку постепенно возрастает. По инициативе Общественного экологического совета Федерального агентства лесного хозяйства (Рослесхоз) в ноябре 2011 г. была создана рабочая группа по разработке Лесной политики Российской Федерации. С этого времени

«Лесная политика» стала одной из ключевых тем, обсуждаемых на конференциях разного уровня, включая Международный лесной форум в Санкт-Петербурге, который является одной из основных дискуссионных площадок в лесном секторе России. В том же году на базе Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова (СПбГЛТУ) была создана кафедра лесной политики, экономики и управления – первая кафедра, официально занимающаяся вопросами лесной политики в системе высшего профессионального лесного образования в России.

В сентябре 2013 г. Распоряжением Правительства РФ № 1724-р были принятые «Основы государственной политики в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов в Российской Федерации на период до 2030 года», широко известные как «Лесная политика России». Документ определяет общие принципы, цели и задачи государственной политики в области использования, охраны и воспроизводства лесов, а также механизмы их реализации. Документ основан на Конституции Российской Федерации, принципах и нормах международного права, международных договорах Российской Федерации и федеральных конституционных законах (Распоряжение Правительства РФ № 1724-р от 26 сентября 2013 г.). Сам факт принятия такого документа в результате учета мнений различных сторон, связанных с лесным сектором, стал важным прецедентом в российских условиях. Однако остается открытым вопрос о его правовом статусе. Значительных реформ лесного законодательства после этого не последовало. Однако позже, на основании этого документа, а также с учетом национальных целей и стратегических задач, определенных указами Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 г. N 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» и от 21 июля 2020 г. N 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года», была разработана и утверждена Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года (Распоряжение Правительства РФ от 11 февраля 2021 г. № 312-р).

Таким образом, вопросы лесной политики активно обсуждаются в российском обществе. Появился ряд исследователей, изучающих эти проблемы. Дисциплина постепенно начинает эволюционировать от универсальных, нормативных предписаний («как должно быть») к контекстуальному анализу («что есть и почему»). Однако научные школы, систематически проводящие исследования в этом направлении, еще находятся на стадии формирования. Поэтому возникает вопрос о существовании научно-

исследовательских институтов, научных журналов, СМИ и интернет-ресурсов, занимающихся изучением и освещением вопросов и проблем в этой сфере на территории России.

В рамках настоящей работы представлен анализ ситуации с исследованиями в области дисциплины «лесная политика» в России с использованием экспертного подхода.

Материалы и методика исследования. Для сбора экспертных мнений относительно ситуации с лесной политикой в Российской Федерации был проведен опрос среди представителей различных сфер лесного сектора (ученые и преподаватели, представители исполнительной власти, неправительственных организаций и бизнеса).

Был составлен список из 9 вопросов, ответы на которые позволили оценить отношение респондентов:

- к предмету лесной политики в целом и к его обсуждению в СМИ;
- к текущей ситуации в области исследований по вопросам лесной политики и к роли институтов, организаций, авторов публикаций, связанных с этими исследованиями.

Анкета имеет структуру закрытых вопросов в сочетании с открытыми вопросами. Например, в первом вопросе респондентов просили дать определение термина «лесная политика», выбрав из следующих вариантов ответа: «Лесная политика – это процесс реализации государственной власти в лесном секторе» или «Лесная политика – это переговорный процесс между государством, бизнесом, НКО и всеми заинтересованными сторонами для достижения баланса интересов в лесном секторе» – или предложить свой собственный вариант определения.

Для проведения дистанционного интервьюирования с помощью инструментов Google Forms была разработана анкета в электронной форме. Опрос распространялся по электронной почте и через социальные сети.

После разработки структуры анкеты мы сосредоточились на другой важной задаче – процессе отбора респондентов.

Был сформирован список из 20 человек – признанных экспертов в области лесных отношений. Одновременно с опросом этих респондентов их просили порекомендовать лиц, занимающихся исследованиями лесной политики. Таким образом, шаг за шагом количество целевых респондентов увеличилось до 123.

Исследование было проведено в 2 этапа с интервалом в 3 года. Для начала процесса личного интервьюирования был выбран Международный

лесной форум в Санкт-Петербурге 2019 г. Международный лесной форум является общественной площадкой для дискуссий между предпринимателями, учеными, представителями государственного управления и финансовых структур российского лесного сектора. В 2019–2022 гг. был проведен ряд личных встреч на подобных мероприятиях, а также осуществлялась дистанционная связь с респондентами.

Следует отметить, что не все респонденты приняли участие в опросе. Ответы респондентов оценивались с использованием стандартных статистических методов – средних значений и процента респондентов.

Всего были проанализированы мнения 76 респондентов, представляющих разные социальные группы и разные регионы Российской Федерации, такие как Амурская область, Приморский край, Республика Татарстан, Республика Коми, Республика Марий Эл, Республика Карелия, Санкт-Петербург, Москва, Архангельск, Красноярск, Хабаровск, Воронеж, Брянск, Московская область, Ленинградская область и Тверская область. Также было несколько респондентов из Финляндии (3) и Швеции (1).

Организации и компании были представлены в следующем количестве:

- органы государственной власти в области лесного хозяйства – 10;
- частные лесохозяйственные компании – 9;
- частные компании лесной промышленности – 11;
- неправительственные организации – 7;
- научно-исследовательские институты и учреждения высшего образования – 39.

Во время опроса респонденты также определяли платформы для обсуждения вопросов лесной политики в Интернете. Эти ресурсы были проанализированы с точки зрения трафика с использованием электронного ресурса Audit PR-CY.

Результаты исследования. Анализ ответов респондентов на определение термина «Лесная политика» дал следующие результаты: «лесная политика – это переговорный процесс...» – 43%; «лесная политика – это процесс реализации власти органов государственной власти» – 35%; «собственные варианты определения термина» – 22%.

Среди предложенных собственных вариантов в шести случаях также делался акцент на ключевой роли государства, однако отмечалось вовлечение профессионального сообщества и выделялось наличие таких компонентов, как разработанные стратегии и долгосрочные программы развития.

В пяти вариантах собственных определений респондентов акцент делается на сфере отношений между различными заинтересованными сторонами и достижении ими определенных ценностей. В двух других ответах респонденты рассматривают лесную политику как систему мер, направленных на получение прибыли от леса и лесной промышленности.

Организации и лица, вовлеченные в сферу исследований лесной политики. Большинство респондентов, отвечая на вопрос об организациях, занимающихся исследованиями проблем лесной политики, указали университеты и научно-исследовательские институты. Часть респондентов указала на значительную роль неправительственных организаций. Список наиболее часто упоминаемых организаций (в порядке убывания значимости по мнению респондентов) выглядит следующим образом:

- Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М.Кирова;
- Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства;
- Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана;
- Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства;
- Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН;
- Всероссийский институт повышения квалификации руководящих работников и специалистов лесного хозяйства.

На основе ответов респондентов все упомянутые организации можно условно разделить на несколько групп (в порядке убывания значимости по мнению респондентов):

- университеты (40%);
- научно-исследовательские институты (37%);
- неправительственные организации (20%);
- другие организации (3%).

В ответах на вопрос о наличии в России авторов, публикующих статьи по результатам исследований лесной политики, было упомянуто 48 человек. Однако 24% респондентов не смогли назвать таких авторов или ответили, что таких авторов в России нет.

В десять наиболее часто упоминаемых авторов (в порядке убывания значимости по мнению респондентов) вошли:

- Петров В.Н. (Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет);

- Моисеев Н.А. (Мытищинский филиал Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана);
- Петров А.П. (Всероссийский институт повышения квалификации руководящих работников и специалистов лесного хозяйства);
- Писаренко А.И. (Российское общество лесоводов);
- Шматков Н.М. (система сертификации «Лесной эталон», Ассоциация НРГ);
- Ярошенко А.Ю. (Ассоциация по охране окружающей среды «Охрана природы»);
- Шутов И.В. (Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства);
- Страхов В.В. (Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства);
- Исаев А.С. (Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН);
- Шварц Е.А. (Институт географии РАН).

Все названные авторы (48 человек) были сгруппированы по организациям следующим образом (в порядке убывания значимости по мнению респондентов):

- научно-исследовательские институты (44%);
- университеты (27%);
- неправительственные организации (25%);
- другие организации (4%).

Почти все перечисленные авторы и представляющие их организации расположены в двух городах – Москве и Санкт-Петербурге. Также следует отметить, что по состоянию на 2025 г. некоторых из отмеченных респондентами авторов (Исаев А.С., Шутов И.В., Писаренко А.И.) уже нет в живых.

Для выявления российских научных журналов, публикующих результаты исследований по вопросам лесной политики, респондентам был задан следующий вопрос: «В каких российских научных журналах Вы находили результаты исследований, касающихся вопросов лесной политики?»

По мнению респондентов, самым популярным журналом, в котором публиковались актуальные статьи по лесной политике, являлось «Лесное хозяйство». Он издавался с 1928 г. и ранее составлял основное научно-производственное издание лесного сектора. Однако из-за отсутствия финансирования журнал не издавался с 2015 года.

Также среди десяти наиболее известных журналов были указаны следующие (в порядке уменьшения частоты упоминаний респондентами):

- «Лесной вестник» Московского государственного университета леса (<http://les-vest.msfu.ru>);
- «Лесной журнал» (<http://lesnoizhurnal.ru>);
- «Лесоведение» (<http://lesovedenie.ru>);
- «Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии» (<https://spbftu.ru/publications/izvestia/>);
- «Сибирский лесной журнал» (<http://сибирскийлеснойжурнал.рф>);
- «Российские леса и лесное хозяйство» (<http://riosusfeu.nethouse.ru/articles/7369>);
- «Пространственная экономика» (<http://spatial-economics.com>);
- «Вопросы лесной науки» (<https://cepl.rssi.ru/science/print/forest-science-issues/>);
- «Лесотехнический журнал» (<http://lestehjournal.ru>);
- «Лесная информация» (<http://lhi.vniilm.ru/index.php/ru>).

В основном эти журналы издаются научно-исследовательскими организациями.

Заключение. Лесная политика как отдельное направление междисциплинарных исследований в России только формируется, что обусловлено необходимостью интеграции экологических, экономических, социальных и правовых дисциплин.

Россия обладает огромным потенциалом для развития этой сферы знаний: вопросы лесной политики обсуждаются, диалог активно ведется, в этой области появляется ряд исследователей. Однако, как показывают результаты опроса, даже среди профессионалов нет единого понимания термина «лесная политика». Его также иногда путают с национальной лесной программой. Это можно объяснить несколькими причинами.

Во-первых, на нынешнюю систему научно-исследовательских институтов и университетов сильно влияет прошлое. За 70-летний период существования СССР сформировались определенные стереотипы, которые до сих пор присутствуют в российских реалиях. Считалось, что в советском обществе, где развитие всех отраслей планировалось в рамках единой экономической и технической политики, не может быть никакого конфликта интересов [Лебедев, Кушлин, 1975; Кулинич, 2006], соответственно, не было необходимости изучать эти вопросы, в том числе и в лесном секторе.

Таким образом, традиция целевых исследований в этом направлении не сформировалась, и в современной России этот процесс только начинается.

Во-вторых, существует традиционное разделение областей исследований в российских научных и образовательных организациях. Междисциплинарные исследования, которые могут включать исследования в области лесной политики, не очень популярны в соответствующих лесных научно-исследовательских институтах и университетах. Они чаще занимаются техническими и естественными науками, в то время как традиционными вопросами политики занимаются в гуманитарных учреждениях, в структурах которых обычно присутствуют политологические кафедры. Как результат, в лесных научно-исследовательских институтах и университетах еще не сформировались научные школы, стабильно занимающиеся исследованиями проблем лесной политики. Исходя из опроса респондентов, публикации в этой области не представлены в каком-либо специализированном журнале, а распределены по разным изданиям, некоторые из которых имеют очень маленький охват аудитории или уже прекратили свое существование.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Антонова Н.Е. Лесная политика: теория и применение // Пространственная экономика. 2010. № 2. С. 33–52.

Антонова Н.Е., Шейнгауз А.С. Управление лесным комплексом многолесного региона. Владивосток: Дальнаука, 2002. 188 с.

Блам Ю.Ш., Машкина Л.В., Машкина О.В. Проблема выбора лесной политики // Регион: Экономика и социология. 2002. № 1. С. 79–96.

Большой Российской энциклопедический словарь. М., 2009. 1887 с.

Иванов С.А. Государственная лесная политика: основные направления и роль в стимулировании рационального лесопользования // Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета. 2009. № 4. С. 166–169.

Исаев А.С., Коровин Г.Н. Актуальные проблемы национальной лесной политики. М.: ЛЕВКО, 2009. 108 с.

Кулинич М.В. Исторический опыт государственной политики СССР в сфере организации научных исследований в 1960–1980-е гг.: дис. ... канд. ист. наук. М., 2006. 170 с.

Лебедев В.Г., Кушлин В.И. Научно-техническая революция и преимущества социализма. М.: Мысль, 1975. 261 с.

Мусеев Н.А. Национальная лесная политика станет важной частью стратегии социально-экономического развития России // Российская лесная газета. 2005. № 7 (85).

Ожегов С.И. Словарь русского языка: ок. 53000 слов / под ред. Л.И. Скворцова. 24-е изд., испр. М.: ОНИКС, 2004. 1198 с.

Петров А.П. Лесная политика Российской Федерации: лучше поздно, чем никогда // Лесной вестник. 2012. № 4(87). С. 171–173.

Петров В.Н. Лесная политика и лесное право: учеб. пособ. СПб.: СПбГЛТУ, 2015. 215 с.

Писаренко А.И., Страхов В.В. О лесной политике России. М.: Юриспруденция, 2001. 152 с.

Соколов В.А. Основы лесной политики: учеб. пособ. Красноярск: Краснояр. гос. ун-т, 2003. 140 с.

Чернякевич Л.М. Организационно-экономические аспекты реформирования системы государственного управления лесами // Региональная экономика: теория и практика. 2005. № 1. С. 46–51.

Шутов И.В. Вехи лесного хозяйства России. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2012. 283 с.

Forest Policy. International Case Study. CABI Publishing, 1998. 273 p.

Koch S., Tetley C. What “counts” in international forest policy research? A conference ethnography of valuation practice and habitus in an interdisciplinary social science field // Forest Policy and Economics. 2023. Vol. 154. Art. no. 103034.

Krott M. Forest policy analysis. Dordrecht: Springer, 2005. 335 p.

Mayers J., Bass S. The role of policy and institutions // Tropical Rain Forest: A Wider Perspective. Springer, 1998. P. 269–302.

Michael D.C. Forest Policy: A Contribution to the Development of a Comprehensive Forest Policy: PhD thesis. Ann Arbor: University of Michigan, 1979. 353 p.

Riihinen P., Tikkanen I. The concept of forest policy in the market system // Forest Management. 1993. № 2. P. 29–31.

Wiersum K.F., Arts B. From practical science to a practice based approach: A short history of forest policy studies // Forest and nature governance: A practice based approach. Springer, 2013. P. 23–46.

References

Antonova N.E. Forest Policy: Theory and Application. *Spatial Economics*, 2010, no. 2, pp. 33–52. (In Russ.)

Antonova, N.E., Sheingauz, A.S. Forest Complex Management in a Richly Forested Region. Vladivostok: Dalnauka, 2002. 188 p. (In Russ.)

Blam Yu.Sh., Mashkina L.V., Mashkina O.V. The Problem of Choosing Forest Policy. *Region: Economics and Sociology*, 2002, no. 1, pp. 79–96. (In Russ.)

- Chernyakevich L.M.* Organizational and Economic Aspects of Reforming the System of State Forest Management. *Regional Economics: Theory and Practice*, 2005, no. 1, pp. 46–51. (In Russ.)
- Forest Policy. International Case Study. CABI Publishing, 1998. 273 p.
- Great Russian Encyclopedic Dictionary. Moscow, 2009. 1887 p. (In Russ.)
- Isaev A.S., Korovin G.N.* Current Issues of National Forest Policy. Moscow: Levko, 2009. 108 p. (In Russ.)
- Ivanov S.A.* State Forest Policy: Main Directions and Role in Stimulating Rational Forest Management. *Bulletin of the Saratov State Socio-Economic University*, 2009, no. 4, pp. 166–169. (In Russ.)
- Koch S., Tetley C.* What “counts” in international forest policy research? A conference ethnography of valuation practice and habitus in an interdisciplinary social science field. *Forest Policy and Economics*, 2023, vol. 154, art. no. 103034.
- Krott M.* Forest policy analysis. Dordrecht: Springer, 2005. 335 p.
- Kulinich, M.V.* Historical Experience of the USSR State Policy in Organizing Scientific Research in the 1960s–1980s: Diss. ... Cand. Hist. Sci. Moscow, 2006. 170 p. (In Russ.)
- Lebedev V.G., Kushlin V.I.* Scientific and Technological Revolution and the Advantages of Socialism. Moscow: Mysl', 1975. 261 p. (In Russ.)
- Mayers J., Bass S.* The role of policy and institutions. *Tropical Rain Forest: A Wider Perspective*. Springer, 1998, pp. 269–302.
- Michael D.C.* Forest Policy: A Contribution to the Development of a Comprehensive Forest Policy: PhD thesis. Ann Arbor: University of Michigan, 1979. 353 p.
- Moiseev N.A.* National Forest Policy Will Become an Important Part of Russia's Socioeconomic Development Strategy. *Rossiyskaya Lesnaya Gazeta*, 2005, no. 7 (85). (In Russ.)
- Ozhegov S.I.* Dictionary of the Russian Language: approx. 53,000 words / ed. by L.I. Skvortsov. 24th ed., corr. Moscow: ONIKS, 2004. 1198 p. (In Russ.)
- Petrov A.P.* Forest Policy of the Russian Federation: Better Late Than Never. *Lesnoy Vestnik*, 2012, no. 4 (87), pp. 171–173. (In Russ.)
- Petrov V.N.* Forest Policy and Forest Law: textbook. St. Petersburg: SPbGLTU, 2015. 215 p. (In Russ.)
- Pisarenko A.I., Strakhov V.V.* On Russia's Forest Policy. Moscow: Jurisprudence, 2001. 152 p. (In Russ.)
- Riihinen P., Tikkainen I.* The concept of forest policy in the market system. *Forest Management*, 1993, no. 2, pp. 29–31.
- Shutov I.V.* Milestones in Russian Forestry. St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University, 2012. 283 p. (In Russ.)
- Sokolov V.A.* Fundamentals of Forest Policy: textbook. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State University, 2003. 140 p. (In Russ.)

Wiersum K.F., Arts B. From practical science to a practice based approach: A short history of forest policy studies. *Forest and nature governance: A practice based approach*. Springer, 2013, pp. 23–46.

Материал поступил в редакцию 23.10.2024

Добровольский А.А. Анализ текущего состояния исследований в области лесной политики в России: социологический и сравнительный подходы // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 239–252. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.239-252

Лесная политика как отдельное направление исследований в настоящий момент только формируется в научно-образовательной среде Российской Федерации. Среди исследователей и специалистов отрасли пока еще нет устойчивых научных школ, занимающихся исследованиями в этом направлении, да и сам термин трактуется очень широко. Настоящая работа посвящена анализу существующей ситуации с исследованиями в области лесной политики в России. Инструменты проведенного исследования включают сравнительный анализ, количественные и качественные социологические методы. Эмпирическую основу составляют результаты, полученные в процессе опроса специалистов отрасли, представляющих разные заинтересованные группы: академические учреждения, научно-исследовательские институты, некоммерческие организации, органы государственной власти, лесохозяйственные частные компании и лесную промышленность. Период проведения опросов – 2019–2022 гг. Кроме того, проведен анализ различных ресурсов (литературные источники и средства массовой информации), посвященных этой области знаний. В результате работы получены и структурированы сведения по: ученым и авторам работ; изданиям, размещающим результаты исследований в этой области; существующим дискуссионным площадкам, на которых происходит обмен информацией и размещение материалов по рассматриваемой теме. Проанализировано понимание термина «лесная политика» специалистами отрасли, а также интерпретированы полученные результаты. Были определены авторы научных работ, ассоциирующиеся у представителей профессионального сообщества с исследованиями и дискуссиями в области лесной политики. Выявлена высокая значимость представителей некоммерческих организаций в этом процессе. Составлен перечень российских научных журналов, публикующих результаты в этом направлении исследований, а также дискуссионных платформ.

Ключевые слова: лесная политика, терминология лесной политики, междисциплинарный, респонденты, российские ученые.

Dobrovolsky A.A. Analysis of the Current State of Research in the Field of Forest Policy in Russia: Sociological and Comparative Approaches. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 239–252 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.239-252

Forest policy as specific area of research is only beginning to take shape within the scientific and educational community of the Russian Federation. Among researchers and industry specialists, there are still no well-established scientific schools dedicated to this field, and the term itself is interpreted very broadly. This work is dedicated to analyzing the current situation of research in the field of forest policy in Russia. The tools used in this study include comparative analysis, as well as quantitative and qualitative sociological methods. The empirical basis consists of the results obtained from surveys of industry experts representing various interested groups: academic institutions, research institutes, non-profit organizations, government bodies, private forest management companies, and the forestry industry. The surveys were conducted between 2019 and 2022. Additionally, an analysis of various resources (literary sources and mass media) related to this field of knowledge was carried out. As a result of the research, information was collected and organized regarding scientists and authors of works, publications that disseminate research results in this area, and existing discussion platforms where information exchange and materials related to the topic take place. The understanding of the term «forest policy» by industry specialists was analyzed, and the obtained results were interpreted. The study identified key authors of scientific works associated with research and discussions in the field of forest policy within the professional community. The significant role of representatives from non-profit organizations in this process was highlighted. A list of Russian scientific journals publishing research results in this area, as well as discussion platforms, was compiled.

Keywords: forest policy, forest policy terminology, interdisciplinary, respondents, Russian scientists.

ДОБРОВОЛЬСКИЙ Александр Александрович – доцент кафедры лесоводства Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, 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 Aleksandr A. – PhD (Agriculture), Associate Professor of the Department of Silviculture, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 7044-0571. ORCID: 0000-0002-6816-4912.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: alexander-83@yandex.ru

3. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ЛЕСОЗАГОТОВОВОК

УДК 631.3/621-01

Е.Н. Власов

УРАВНЕНИЯ ДИНАМИКИ ТРАНСПОРТНОГО РОБОТА ДЛЯ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Введение. Главным стимулом для внедрения роботизированных технологий на российских предприятиях лесопромышленного комплекса (ЛПК) должно стать значительное повышение производительности труда. Роботизированные технологии помогают сохранить безостановочное производство, выполнять сложные, трудоёмкие и энергозатратные производственные операции 24 часа в сутки, улучшить условия труда на производстве.

Кроме того, роботизация могла бы помочь отрасли справиться с теми вызовами, с которыми сегодня сталкивается отечественный ЛПК в условиях ограничения экспорта древесины. Важной темой становится переориентация предприятий на более глубокую переработку древесины в целях создания продукта с высокой добавленной стоимостью. Исключение возможности человеческой ошибки, скорость и точность выполнения процессов – всё это свидетельствует в пользу необходимости инвестиций в роботизированные технологии [Добрачев и др., 2014].

Транспортные (подвижные) роботы могут быть использованы не только в заводских условиях, но и в теплицах, оранжереях, питомниках, где посадки осуществляются в регулярном виде.

Повышение эффективности таких систем связано прежде всего с повышением быстродействия и точности работы подвижного робота, для чего необходимо учитывать его динамические характеристики [Козырев, 1983; Воронин и др., 1986; Довбня и др., 1988].

Методика расчета. Выполним нахождение уравнений динамики транспортного робота с помощью уравнений Лагранжа второго рода с множителями [Лурье, 1961].

Ходовая часть транспортного робота (ТР)¹, рассмотренного в статье, состоит из 2 модулей мотор-колёс, расположенных на поперечной оси тे-

¹ ГОСТР 60.0.0.4– 2019/ ИСО 8373:2012 РОБОТЫ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2019. 27 с.

лежки ТР вдоль его бортов, и 2 флюгерных колёс, установленных в передней части ТР по его бортам (кинематическая схема ТР приведена на рис. 1). Такое расположение тяговых колес обеспечивает высокую маневренность ТР вплоть до разворачивания вокруг центральной оси. В качестве двигателей мотор-колес используются электродвигатели постоянного тока, питание которых осуществляется от бортовой аккумуляторной батареи.

При выводе уравнений движения ТР считаем, что мотор-колеса и флюгерные колеса жестко связаны с корпусом. Податливостью и люфтом редуктора мотор-колёс пренебрегаем.

Из-за разнесения во времени работы ТР и промышленного робота (ПР), ПР рассматривается как неподвижная масса $M_{\text{пр}}$, расположенная на продольной оси платформы ТР в точке C_1 на расстоянии L_0 от центра масс платформы (рис. 1)

Для составления уравнения движения ТР воспользуемся уравнениями Лагранжа второго рода с множителями [Лурье, 1961].

Кинетическая энергия T транспортного робота складывается из кинетической энергии мотор-колёс $T_{\text{ка}}$, $T_{\text{кв}}$, кинетической энергии платформы $T_{\text{п}}$ с установленным на ней ПР, кинетических энергий вилок флюгеров $T_{\text{вф1}}$ и $T_{\text{вф2}}$, соответственно, колес флюгеров $T_{\text{кф1}}$, $T_{\text{кф2}}$.

Вычисления перечисленных выше кинетических энергий производятся по теореме Кенига [Бать и др., 2025]:

$$T_i = \frac{1}{2}m_i v_{ci}^2 + \frac{1}{2}(J_{xi}\omega_{xi}^2 + J_{yi}\omega_{yi}^2 + J_{zi}\omega_{zi}^2), \quad (1)$$

где m_i – масса рассматриваемого i -го тела; v_{ci} – скорость центра массы i -го тела; J_{xi} , J_{yi} , J_{zi} – моменты инерции i -го тела относительно осей поступательно движущейся системы координат с началом в центре масс тела; ω_{xi} , ω_{yi} , ω_{zi} – проекции абсолютной угловой скорости i -го тела на оси поступательно движущейся системы координат с началом в центре масс тела.

Так, например, кинетическая энергия $T_{\text{ка}}$ мотор-колеса А равна:

$$T_{\text{ка}} = \frac{1}{2}m_k(v_{AX}^2 + v_{AY}^2) + \frac{1}{2}(J_K\dot{\phi}_1^2 + J_{ZK}\dot{\Phi}^2), \quad (2)$$

где m_k – масса мотор-колеса; v_{AX} , v_{AY} – проекции скорости центра масс мотор-колеса на оси основной (неподвижной) системы координат; J_K – приведенный момент инерции мотор-колеса относительно собственной оси вращения; J_{ZK} – приведенный момент инерции мотор-колеса относительно вертикальной оси, проходящей через его центр масс; $\dot{\phi}_1$ – угловая скорость вращения колеса ТР; $\dot{\Phi}$ – угловая скорость вращения платформы ТР вокруг ее центра масс.

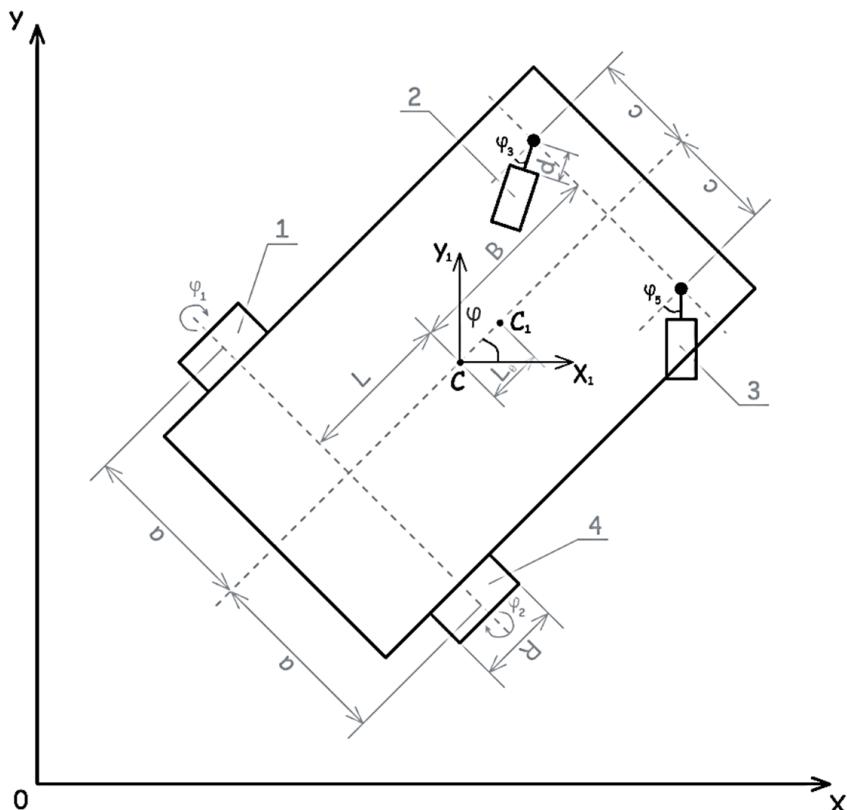


Рис. 1. Кинематическая схема ТР.

1, 4 – мотор-колеса; 2, 3 – флюгерные колеса; С – положение центра масс платформы ТР; С₁ – точка крепления промышленного робота; а, В, с, д, L, L₀, R – геометрические размеры, характеризующие взаимное расположение и размеры платформы, ТР, мотор-колес, флюгерных колес; φ – угол поворота платформы вокруг ее центра масс; φ_1 и φ_2 – углы поворота, соответственно, мотор-колес А и В; φ_3 и φ_5 – углы поворота флюгеров ТР в горизонтальной плоскости

Fig. 1. Kinematic diagram of the vehicle

1, 4 – motor wheels; 2, 3 – weathervane wheels; C – position of the center of mass of the platform vehicle; C₁ – attachment point of the industrial robot; a, B, c, d, L, L₀, R – geometric dimensions characterizing the relative position and dimensions of the platform, vehicle, motor wheels, weathervane wheels; φ – the angle of rotation of the platform around its center of mass; φ_1 and φ_2 – rotation angles of motor wheels A and B, respectively; φ_3 and φ_5 – rotation angles of the vehicle weathervanes in the horizontal plane

Значения T_{Π} , T_{KB} , T_{KF1} , T_{KF2} , T_{BF1} , T_{BF2} находятся аналогично.

Таким образом, кинетическая энергия T транспортного робота является функцией следующих параметров:

$$T = T(\dot{x}, \dot{y}, \dot{\phi}, \dot{\phi}_1, \dot{\phi}_2, \dot{\phi}_3, \dot{\phi}_4, \dot{\phi}_5, \dot{\phi}_6, \phi_1, \phi_3, \phi_5, m_i, J_i), \quad (3)$$

Здесь x , y – координаты центра масс платформы ТР; ϕ – угол поворота платформы вокруг ее центра масс; ϕ_1 и ϕ_2 – углы поворота колес ТР; ϕ_4 и ϕ_6 – углы поворота, соответственно, левого и правого колеса флюгера; ϕ_3 и ϕ_5 – углы поворота, соответственно, правой и левой вилок флюгера; m_i – массы мотор-колеса, платформы ТР и ПР, вилки флюгера, колеса флюгера; J_i – моменты инерции рассматриваемых составных частей ТР относительно осей поступательно движущихся систем координат с началами в центрах масс этих частей.

Потенциальную энергию ТР считаем равной нулю.

Обобщенными координатами являются следующие девять величин: x , y , ϕ , ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 , ϕ_4 , ϕ_5 , ϕ_6 . Они не являются независимыми, так как нетрудно составить семь уравнений неголономных связей.

Из условия отсутствия проскальзывания колес А и В, т. е. из условия равенства нулю скоростей точек контакта колес с поверхностью движения ТР получаем:

$$\dot{x} \cos \phi + \dot{y} \sin \phi - a\dot{\phi} - r\dot{\phi}_1 = 0; \quad (4)$$

$$\dot{x} \cos \phi + \dot{y} \sin \phi + a\dot{\phi} - r\dot{\phi}_2 = 0. \quad (5)$$

Из условий отсутствия движения мотор-колёс по направлению линии АВ (рис. 1) имеем:

$$\dot{x} \sin \phi - \dot{y} \cos \phi + l\dot{\phi} = 0. \quad (6)$$

Из условий отсутствия движения по направлению осей вращения колес флюгера имеем еще две неголономных связи:

$$\dot{x} \sin(\phi + \phi_3) - \dot{y} \cos(\phi + \phi_3) + \dot{\phi}_3 d - \dot{\phi}(b \cos \phi_3 + c \sin \phi_3 - d) = 0; \quad (7)$$

$$\dot{x} \sin(\phi + \phi_5) - \dot{y} \cos(\phi + \phi_5) + \dot{\phi}_5 d - \dot{\phi}(b \cos \phi_5 - c \sin \phi_5 - d) = 0. \quad (8)$$

Условия отсутствия проскальзывания колес флюгеров дают два последних уравнения неголономной связи:

$$\dot{x} \cos(\phi + \phi_3) + \dot{y} \cos(\phi + \phi_3) - r_1 \dot{\phi}_4 - \dot{\phi}(c \cos \phi_3 + b \sin \phi_3) = 0; \quad (9)$$

$$\dot{x} \cos(\phi + \phi_5) + \dot{y} \cos(\phi + \phi_5) - r_1 \dot{\phi}_5 + \dot{\phi}(c \cos \phi_5 + b \sin \phi_5) = 0. \quad (10)$$

Единственные ненулевые обобщенные силы Q_4, Q_5 , соответствующие углам φ_1 и φ_2 поворота колёс А и В ТР, равны [Чиликин и др., 1979]:

$$Q_4 = \frac{M_{\varphi_1}}{i} - m_{c1}; \quad (11)$$

$$Q_5 = \frac{M_{\varphi_2}}{i} - m_{c2}. \quad (12)$$

Здесь $M_{\varphi_1}, M_{\varphi_2}$ – электромагнитные моменты, соответственно, на валу первого и второго электродвигателя мотор-колёс; i – передаточное число редуктора мотор-колеса; m_{c1}, m_{c2} – моменты сопротивления движению колеса (включая как механические потери на мотор-колесе, так и момент трения качения колеса). M_{φ_1} и M_{φ_2} определяются из систем уравнений, описывающих электропривод на основе двигателей постоянного тока [Чиликин и др., 1979].

Результаты и обсуждение. Составим уравнения движения ТР в форме уравнений Лагранжа второго рода с множителями [Исполов, 1972]:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} - \frac{\partial T}{\partial q_k} = Q_k + \sum_{j=1}^l \mu_j C_{jk}, \quad (13)$$

где C_{jk} – коэффициенты в уравнениях неголономных связей вида

$$\sum_{k=1}^5 C_{jk} \dot{q}_k + C_j = 0. \quad (14)$$

В результате получим записанную в матрично-векторной форме систему уравнений, описывающих движение ТР:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{19} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{91} & \cdots & a_{99} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\varphi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_9 \end{bmatrix} = Q_4 + Q_5 + \begin{bmatrix} c_{11}c_{12}\cdots c_{17}00 \\ c_{21}c_{22}\cdots c_{27}00 \\ \vdots \\ c_{71}c_{72}\cdots c_{77}00 \\ 0 \ 0 \cdots 0 \ 00 \\ 0 \cdots 0 \ 00 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \vdots \\ \mu_7 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Здесь a_{ij} ($i, j = 1, \dots, 9$) – элементы матрицы инерционных коэффициентов; $[\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{\varphi}, \dots, \ddot{\varphi}_6]^T$ – вектор ускорений; $[b_1, \dots, b_9]^T$ – вектор, обусловленный силами инерции от взаимного влияния движения по координатам φ_1 ,

$\varphi_3, \varphi_5; [0, 0, 0, Q_4, Q_5, 0, \dots, 0]^T$ – вектор обобщенных сил; $[\mu_1, \dots, \mu_7, 0, 0]^T$ – вектор множителей Лагранжа; C_{ij} – элементы матрицы коэффициентов уравнений неголономных связей.

Решение уравнений должно осуществляться совместно с уравнениями неголономных связей.

Выводы

1. Полученные результаты могут быть использованы для решения прямой и обратной задач динамики робота при его проектировании;
2. Полученные уравнения динамики ТР могут использоваться для математического моделирования движения ТР по трассе различной конфигурации;
3. Полученные уравнения необходимы для исследования устойчивости ТР.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Батъ М.И., Джанелидзе Г.Ю., Кельзон А.С. Теоретическая механика в примерах и задачах: учеб. пособ. для вузов. 12-е изд., стер. Т. 2: Динамика. СПб.: Лань, 2025. 640 с.

Воронин А.А., Егоров Ю.Б., Станкевич Л.А., Сотсков Ю.В. Математическое моделирование роботизированных технологических комплексов: учеб. пособ. Л.: ЛПИ, 1986. 80 с.

Добрачев А.А., Раевская Л.Т., Швец А.В. Кинематические схемы, структуры и расчет параметров лесопромышленных манипуляторных машин: монография. Екатеринбург: УГЛТУ, 2014. 128 с.

Довбня Н.М., Халфен А.А., Яковлев И.В. Транспортные роботы для гибких производственных систем. Л.: ЛДНТП, 1988. 23 с.

Исполов Ю.Г. Краткое руководство к решению задач по аналитической механике. Л.: ЛПИ, 1972. 118 с.

Козырев Ю.Г. Промышленные роботы. Справочник. М.: Машиностроение, 1983. 376 с.

Лурье А.И. Аналитическая механика. М.: Физматгиз, 1961. 824 с.

Чиликин М.Г., Клюев В.Н., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода. М.: Энергия, 1979. 616 с.

References

Bat M.I., Dzhanelidze G.Yu., Kelzon A.S. Theoretical mechanics in examples and problems: a textbook for universities. 12th ed., ster. Vol. 2: Dynamics. St. Petersburg: Lan, 2025. 640 p. (In Russ.)

Chilikin M.G., Klyuev V.N., Sandler A.S. Theory of an automated electric drive. Moscow: Energiya, 1979. 616 p. (In Russ.)

Dobrachev A.A., Rayevskaya L.T., Shvets A.V. Kinematic schemes, structures and calculation of parameters of timber manipulator machines: monograph. Ekaterinburg: Ural State Forestry University, 2014. 128 p. (In Russ.)

Dovbnya N.M., Khalfen A.A., Yakovlev I.V. Transport robots for flexible production systems. Leningrad: LDNTP, 1988. 23 p. (In Russ.)

Ispolov Yu.G. A short guide to solving problems in analytical mechanics. Leningrad: LPI, 1972. 118 p. (In Russ.)

Kozyrev Yu.G. Industrial robots. Handbook. Moscow: Mashinostroenie, 1983. 376 p. (In Russ.)

Lurie A.I. Analytical mechanics. Moscow: Fizmatgiz, 1961. 824 p. (In Russ.)

Voronin A.A., Egorov Yu.B., Stankevich L.A., Sotskov Yu.V. Mathematical modeling of robotic technological complexes: textbook. Leningrad: LPI, 1986. 80 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 03.04.2024

Власов Е.Н. Уравнения динамики транспортного робота для лесопромышленного комплекса // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 253–261. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.253-261

Главным стимулом для внедрения роботизированных технологий на российских предприятиях лесопромышленного комплекса (ЛПК) должно стать значительное повышение производительности труда. Роботизированные технологии помогают сохранить безостановочное производство, выполнять сложные, трудоёмкие и энергозатратные производственные операции 24 часа в сутки, улучшить условия труда на производстве. Кроме того, роботизация могла бы помочь отрасли справиться с теми вызовами, с которыми сегодня сталкивается отечественный ЛПК в условиях ограничения экспорта древесины. Важной темой становится переориентация предприятий на более глубокую переработку древесины в целях создания продукта с высокой добавленной стоимостью. Исключение возможности человеческой ошибки, скорость и точность выполнения процессов – всё это свидетельствует в пользу необходимости инвестиций в роботизированные технологии. Транспортные (подвижные) роботы (ТР) могут быть использованы не только в заводских условиях, но и в теплицах, оранжереях, питомниках, где посадки осуществляются в регулярном виде. Повышение эффективности таких систем связано прежде всего с повышением быстродействия и точности работы подвижного робота, для чего необходимо учитывать их динамические характеристики. В работе получены уравнения движения транспортного робота, ходовая часть которого состоит из 2 модулей мотор-колёс,

расположенных на поперечной оси тележки ТР вдоль его бортов, и 2 флюгерных колес, установленных в передней части ТР по его бортам. Такое расположение тяговых колес обеспечивает высокую маневренность ТР вплоть до разворачивания вокруг центральной оси. В качестве двигателей мотор-колес используются электродвигатели постоянного тока, питание которых осуществляется от бортовой аккумуляторной батареи. Полученные результаты имеют самостоятельный практический интерес, а также могут использоваться для математического моделирования движения ТР по трассе, исследования устойчивости и т. п.

Ключевые слова: транспортный робот, уравнения Лагранжа второго рода с множителями, неголономные связи.

Vlasov E.N. Equations of dynamics of a transport robot for the timber industry. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 253–261 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.253-261

The main incentive for the introduction of robotic technologies at Russian enterprises of the timber industry complex (LPC) should be a significant increase in labor productivity. Robotic technologies help to maintain non-stop production, perform complex, labor-intensive and energy-consuming production operations 24 hours a day, improve working conditions in production. Meanwhile, robotization could help the industry to cope with the challenges that the domestic timber industry is facing today in the context of limited timber exports. An important topic is the reorientation of enterprises to deeper processing of wood in order to create a product with high added value. The exclusion of the possibility of human error, the speed and accuracy of the processes also testify for the need for investments in robotic technologies. Transport (mobile) robots (TR) can be used not only in factory conditions, but also in greenhouses, greenhouses, nurseries, where plantings are carried out on a regular basis. The increase in the efficiency of such systems is primarily due to an increase in the speed and accuracy of the mobile robot, for which it is necessary to take into account their dynamic characteristics. In this paper, the equations of motion of a transport robot are obtained, the undercarriage of which consists of 2 motor-wheel modules located on the transverse axis of the truck along its sides, and 2 weather vane wheels mounted in front of the truck along its sides. This arrangement of the traction wheels ensures high maneuverability of the vehicle up to turning around the central axis. Direct current electric motors are used as motor-wheel motors, which are powered by an on-board battery. The results obtained are of independent practical interest, and can also be used for mathematical modeling of vehicle movement along the highway, stability studies, etc.

Keywords: transport robot, Lagrange equations of the 2nd kind with multipliers, nonholonomic relationships.

ВЛАСОВ Евгений Николаевич – доцент кафедры прикладной механики и инженерной графики Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук. ORCID: 0000-0002-1982-2130. SPIN-код: 3785-3663.

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

VLASOV Evgeny N. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Applied Mechanics and Engineering Graphics of the St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0000-0002-1982-2130. SPIN-code: 3785-3663.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: vlasov-en@mail.ru

И.К. Говядин, А.Н. Чубинский

РАСПОЗНАВАНИЕ ДРЕВЕСНЫХ ПОРОД НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Введение. Алгоритмы компьютерного зрения позволяют анализировать морфологические особенности коры деревьев, их текстуру и цветовые характеристики, что делает возможным автоматическое определение породы на основе изображений [Miao et al., 2024]. В последние годы развитие глубокого обучения и сверточных нейронных сетей (англ. Convolutional Neural Networks, далее CNN) значительно повысило точность таких систем, сделав их применимыми в различных сферах, включая лесное хозяйство и экологический мониторинг [Войтов и др., 2023; Овсянников, 2024; Pradipkumar, Alagu Raja, 2022].

Беспилотные летательные аппараты (далее БПЛА) способны охватывать большие территории, проводить съемку в труднодоступных местах и обеспечивать получение изображений с высоким разрешением. Эти данные в сочетании с методами машинного обучения позволяют создавать надежные системы классификации древесных пород, способные работать в реальных условиях [Onishi, Ise, 2021]. При этом учитываются такие факторы, как вариативность освещения, ракурсов и сезонных изменений.

Традиционные методы идентификации древесных пород, основанные на визуальном анализе, морфологических измерениях и экспертной оценке специалистов-дendрологов, имеют ряд существенных ограничений. Они требуют значительных временных и финансовых затрат, а также подвержены субъективности оценки. Автоматизированные системы, использующие компьютерное зрение и машинное обучение, способны устранить эти недостатки, предоставив быстрые и объективные результаты [Говядин, 2023; Каримов, Говядин, 2023; Carpentier et al., 2018].

Несмотря на значительный прогресс в области компьютерного зрения, применение таких технологий в лесном хозяйстве остается недостаточно изученным. Основные вызовы связаны с вариативностью внешнего вида коры различных деревьев, которая зависит от множества факторов, влияющих на формирование обучающей выборки. К таким факторам относятся возраст дерева, климатические условия, уровень влажности, наличие по-

вреждений и сезонные изменения. Кроме того, в естественных условиях кора может быть частично покрыта мхом, лишайниками или повреждена насекомыми, что значительно усложняет процесс классификации [Говядин и др., 2024; Kim et al., 2023].

Кора деревьев представляет собой сложную гетерогенную структуру, формирующуюся в процессе роста растения и выполняющую защитные функции. Ее морфологические особенности зависят от видовой принадлежности, возраста дерева, климатических условий и воздействия внешних факторов. Внешний слой коры, называемый перидермой, обеспечивает барьерную защиту и отличается высокой вариативностью фактуры. Внутренние слои, включая флоэму, участвуют в процессах обмена веществ и формирования вторичных структур.

Исследования структуры коры деревьев показали, что фактурные особенности являются одним из ключевых признаков, позволяющих идентифицировать породу [Kottilapurath Surendran et al., 2024]. Для хвойных пород характерны глубокие продольные борозды и чешуйчатые структуры, тогда как лиственные породы демонстрируют более разнообразную морфологию, включающую гладкие, трещиноватые или шелушиющиеся поверхности. В рамках данного исследования использовался предварительно размеченный набор данных (dataset), содержащий изображения стволов семи древесных пород: березы, ели, сосны, осины, клена, дуба и лиственницы. Эти изображения включают разнообразные варианты текстуры и окраски, характерные для каждой породы, что позволяет учитывать природную изменчивость коры.

Существенным препятствием для автоматической классификации древесных пород является высокая изменчивость фактуры коры, обусловленная возрастом дерева. Молодые экземпляры часто характеризуются гладкой поверхностью коры, тогда как у взрослых деревьев кора становится грубой, растрескавшейся и покрытой вторичными структурами. Освещение и погодные условия также оказывают значительное влияние на визуальные характеристики коры, изменения контрастность и цветовые параметры изображений, что может негативно сказываться на работе алгоритмов машинного обучения [Kim et al., 2022; Armi, Abbasi, 2023].

Дополнительную сложность представляет ракурс съемки, поскольку изображения, полученные с БПЛА, могут содержать значительные перспективные искажения. Изменение угла обзора влияет на восприятие фактуры, а тени, возникающие при съемке в густых лесных массивах, создают дополнительные артефакты. Сезонные изменения также вносят суще-

ственний вклад в вариативность данных, поскольку в разное время года кора может покрываться снегом, наледью или влагой, что изменяет ее оптические свойства.

Используемый в данном исследовании подход основан на методах глубокого обучения, в частности, на CNN, которые способны анализировать сложные паттерны фактуры и учитывать нелинейные зависимости между признаками. Предварительная обработка изображений включает нормализацию цветовых характеристик и применение методов выделения текстурных признаков, что позволяет минимизировать влияние внешних факторов, таких как освещение и погодные условия [Говядин и др., 2023].

Целью данного исследования является разработка и внедрение метода автоматического распознавания древесных пород на основе анализа изображений стволов. Работа направлена на повышение точности и эффективности классификации древесных пород за счет применения современных алгоритмов машинного обучения, а также на оценку применимости предложенного подхода в реальных условиях лесного хозяйства.

Материалы и методика исследования. Методология исследования включает следующие этапы: сбор и предобработка данных, выбор архитектуры модели, обучение и валидация, а также оценка результатов и их интерпретация.

Сбор данных осуществлялся с использованием БПЛА, что позволило получать изображения стволов деревьев в вертикальной плоскости, включая труднодоступные верхние части ствола, которые невозможно зафиксировать с помощью мобильных устройств, таких как смартфоны.

Набор данных включает изображения с различными параметрами съемки, такими как угол обзора (например, под прямым углом к стволу, с наклоном сверху или снизу), расстояние до объекта (крупный план или дальний план) и интенсивность освещения (включая как освещенные участки, так и затененные области). Это обеспечивает высокую вариативность входных данных, что важно для повышения устойчивости модели к различным условиям съемки. Для улучшения качества классификации данные были разделены на обучающую, валидационную и тестовую выборки в пропорции 70:20:10.

Дополнительно проводилась оценка качества исходных изображений, включая проверку разрешения (определялось, обладают ли изображения достаточной четкостью и детализацией для распознавания фактуры и морфологических особенностей коры деревьев), контрастности (оценива-

лась степень различимости текстурных особенностей коры, таких как линии, трещины и пятна) и наличия артефактов, таких как тени и блики.

С целью увеличения объема набора данных применялись методы аугментации данных, включая поворот, масштабирование, изменение яркости и добавление шумов (мелкие искажения). Эти методы позволили искусственно создать новые варианты изображений на основе имеющихся данных, что способствовало улучшению генерализации модели и снижению вероятности переобучения.

Рассмотрены и протестированы различные архитектуры CNN, включая ResNet, EfficientNet и MobileNet, с целью выявления оптимального компромисса между точностью классификации и вычислительной сложностью модели. В настоящее время окончательный выбор архитектуры еще не сделан, так как исследование находится на стадии анализа и доработки. Тем не менее, для продолжения работы выбран промежуточный вариант модели, который позволяет проводить исследования и тестирование методик предобработки данных, настройки гиперпараметров и аугментации. Такой подход обеспечивает гибкость в исследовании и позволяет оптимизировать модель по мере получения новых результатов.

Обучение модели проводилось с использованием метода обучения с учителем. В качестве входных данных использовались изображения стволов деревьев, предварительно обработанные и размеченные в соответствии с их породой.

Для инициализации весов модели применялись предварительно обученные параметры (такая модель уже «знает» общие признаки изображений, такие как линии, текстуры и формы), после чего выполнялось дополнительное обучение на специализированном наборе данных. В качестве функции потерь использовалась кросс-энтропия (математическая функция, измеряющая разницу между предсказаниями модели и реальными метками), а в качестве оптимизатора – алгоритм Adam (метод адаптивной оптимизации, который обновляет веса модели в процессе обучения). Этот подход обеспечил эффективную сходимость за счет адаптивного изменения коэффициентов обучения.

Обучение модели проводилось в несколько этапов, что позволило улучшить адаптацию модели к данным и снизить вероятность ошибок. На первом этапе использовались небольшие мини-пакеты данных (по 32 изображения за раз), что способствовало повышению устойчивости модели к переобучению. На втором этапе применялась регуляризация (набор методов, направленных на улучшение способности модели к обобщению дан-

ных), включая технику «dropout» (обнуление нейронов в слое модели во время обучения с вероятностью 0,4, то есть 40% нейронов) и «batch normalization» для нормализации данных и предотвращения переобучения.

Дополнительно были проведены эксперименты с различными значениями гиперпараметров, включая размер мини-пакетов, коэффициент обучения и количество эпох, с целью оптимизации модели. Оценка качества модели осуществлялась на валидационной выборке, а итоговые показатели метрик, таких как точность (доля правильных предсказаний), полнота (если цель – определить класс «Берёза», то полнота показывает, какой процент всех «Берёз» в наборе данных был правильно идентифицирован) и F1-score (среднее гармоническое между точностью и полнотой), анализировались после завершения обучения.

Также была проведена сегментация изображений с целью выделения области интереса – ствола дерева – и удаления фоновых объектов, таких как листья и ветви. Для этого использовались алгоритмы пороговой сегментации (например, все пиксели, яркость которых превышает заданный порог, классифицируются как «фон», а остальные – как «область интереса») и модели глубокого обучения для семантической сегментации (пиксели, принадлежащие стволу дерева, классифицируются как «ствол», а остальные – как «не ствол»).

Для повышения устойчивости модели к вариациям условий съемки применялись методы цветовой коррекции, позволяющие компенсировать изменения освещения и цветопередачи. Это делает модель более универсальной и надежной для использования в реальных условиях, таких как лесные массивы при различных погодных условиях и в разное время суток.

Результаты исследования. В ходе исследования проведена оценка точности работы предложенной модели классификации древесных пород (рис. 1). Обученная свёрточная нейронная сеть продемонстрировала высокую эффективность, достигая средней точности более 90% на тестовом наборе данных.

Наилучшие показатели были достигнуты для пород с выраженной фактурой коры, таких как дуб и береза, где точность классификации превышала 95%. В то же время для пород, имеющих схожие фактурные характеристики, таких как ель и сосна, точность оказалась несколько ниже (около 85%), что обусловлено близостью их визуальных признаков.

Ниже представлены сводные результаты тестирования модели классификации древесных пород (табл. 1).



Рис. 1. Пример фотоматериалов набора данных
Fig. 1. Sample photographic dataset

Точность модели, отражающая долю корректно классифицированных изображений, оказалась максимальной для дуба (97,6%) и берёзы (95,4%). Это объясняется выраженностью текстурных особенностей их коры, что упрощает процесс идентификации. Наименьшая точность зафиксирована для ели (86,7%) и сосны (85,2%), что связано с высокой степенью схожести их текстурных характеристик, создающей дополнительные сложности для классификации.

Таблица 1

Анализ ключевых характеристик

Analysis of key characteristics

№ п/п	Порода	Точность (%)	Полнота (%)	F1-score (%)	Среднее время классификации (миллисекунд)
1	Берёза	95,4	94,1	94,7	12
2	Ель	86,7	85,9	86,3	15
3	Сосна	85,2	84,0	84,6	14
4	Осина	92,1	91,0	91,5	13
5	Клён	90,3	89,7	90,0	12
6	Дуб	97,6	96,8	97,2	16
7	Лиственница	88,9	87,5	88,2	14

Показатель полноты демонстрирует, какой процент объектов определённого класса модель смогла корректно идентифицировать. Для дуба и берёзы полнота оказалась на высоком уровне, что подтверждает надёжность модели в распознавании этих пород. F1-score, отражающий баланс между точностью и полнотой, в среднем превышает 90% для большинства пород. Однако для схожих пород, таких как ель и сосна, F1-score снижается до 84–86%, что указывает на необходимость доработки модели для улучшения классификации этих пород.

Среднее время классификации изменяется в диапазоне от 12 до 16 миллисекунд. Наименьшее время обработки наблюдается для изображений берёзы и клёна, что связано с их относительно простыми текстурными особенностями. Наибольшее время классификации требуется для дуба, поскольку его кора обладает сложной фактурой, требующей более детального анализа.

В целом модель показала высокую эффективность при классификации древесных пород, достигая средней точности более 90%. Однако для пород с визуально схожими характеристиками требуется дополнительная работа. Это может включать улучшение качества исходного набора данных или применение более сложных архитектур модели для повышения точности классификации.

На графиках (рис. 2) представлены результаты анализа производительности модели классификации древесных пород с использованием ROC-кривых и Precision-Recall кривых.

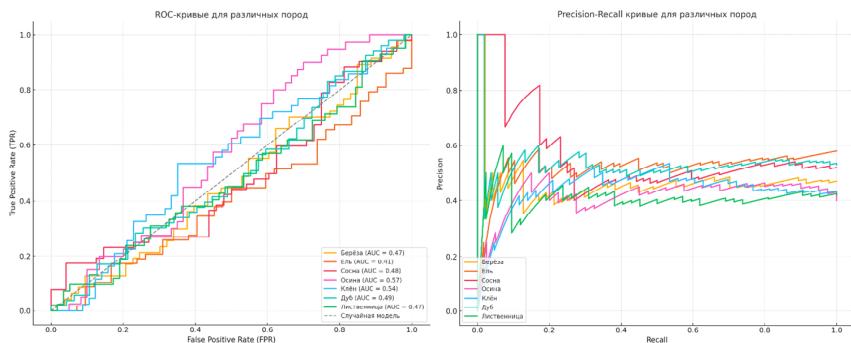


Рис. 2. Производительность модели

Fig. 2. Model performance

ROC-кривые демонстрируют способность модели дифференцировать истинные и ложные классы для каждой из исследуемых древесных пород. Высокое значение площади под кривой (AUC) указывает на хорошую работу модели. Например, для пород с ярко выраженным текстурными особенностями (например, дуба и берёзы) AUC стремится к 1, что подтверждает высокую точность классификации. Напротив, для схожих пород, таких как ель и сосна, наблюдаются несколько менее выраженные результаты, что связано с близостью их текстурных признаков.

Precision-Recall кривые иллюстрируют баланс между точностью (доля правильных предсказаний среди всех, определённых моделью как данный класс) и полнотой (доля правильно предсказанных объектов среди всех объектов этого класса). Этот график особенно полезен для оценки работы модели при наличии несбалансированных данных. Наибольший баланс между точностью и полнотой наблюдается для дуба и берёзы, что подтверждает высокую эффективность модели при классификации этих пород.

На графике (рис. 3) представлена зависимость метрики F1-score от коэффициента обучения модели.

Анализ графика демонстрирует, что при чрезмерно низких значениях коэффициента обучения (например, 0,0001) скорость сходимости модели существенно снижается, что приводит к недостаточной оптимизации и низкому значению F1-score (78,2%). Наилучшие результаты достигаются при коэффициенте обучения 0,01, где модель демонстрирует максимальное значение F1-score (91,3%), что свидетельствует о балансе между скоростью обучения и качеством классификации. Однако при дальнейшем увеличении коэффициента обучения (например, выше 0,01) наблюдается снижение качества классификации, что связано с нестабильностью процесса оптимизации: модель либо переобучается, либо теряет способность к сходимости.

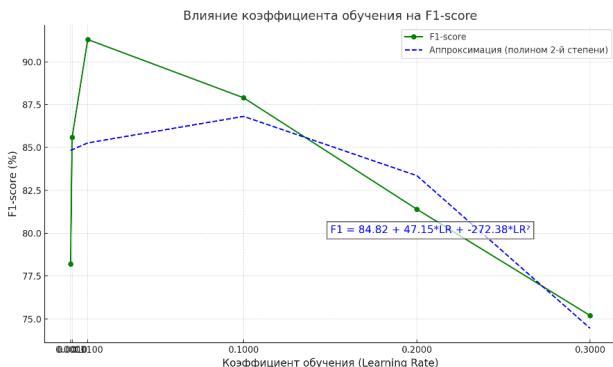


Рис. 3. Зависимость метрики

Fig. 3. Metric dependency

Уравнение полиномиальной регрессии второй степени, описывающее зависимость F1-score от коэффициента обучения, наглядно демонстрирует, как изменяется F1-score при различных значениях коэффициента обучения. Кривая аппроксимации отражает общую тенденцию: увеличение коэффициента обучения сначала приводит к улучшению F1-score, однако после достижения определённого значения (0,01) качество модели начинает снижаться.

Степень сложности и разнообразия фактуры коры, которая различна у разных пород деревьев, является ключевым фактором, влияющим на работу модели классификации. Фактура коры определяет уникальные признаки, по которым модель распознаёт породу (рис. 4).

Результаты регрессионного анализа показывают, что основными факторами, влияющими на точность классификации, являются угол съёмки и уровень освещённости. Точность снижается с увеличением угла съёмки, что связано с перспективными искажениями фактуры. Овещённость также играет значительную роль: низкий уровень освещения способствует повышению точности модели, так как тени и яркие блики минимизируются, тогда как высокая освещённость приводит к менее стабильным результатам. Влияние фактурной изменчивости на точность оказалось минимальным, что свидетельствует о способности модели эффективно справляться как с простой, так и со сложной фактурой коры. Однако низкое значение коэффициента детерминации ($R^2 = 0,243$) указывает на необходимость учёта дополнительных факторов для полного объяснения вариации точности.

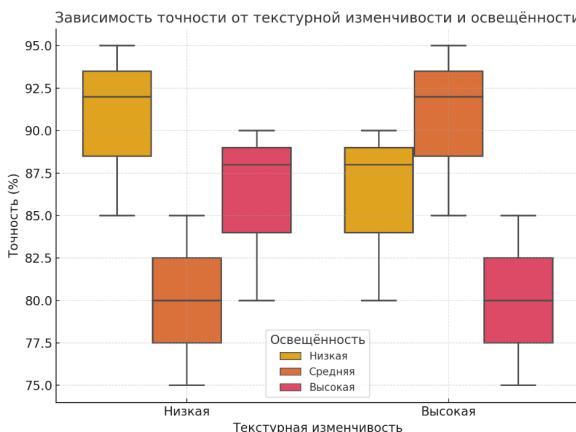


Рис. 4. Зависимость точности от текстурной изменчивости и освещенности
 Fig. 4. Accuracy dependence on texture variability and illumination

Для фактур с высокой изменчивостью точность классификации в среднем ниже, особенно при низкой освещённости. В то же время низкая текстурная изменчивость обеспечивает более стабильные результаты, что подтверждается меньшим разбросом значений точности.

Заключение. Результаты исследования показывают, что разработанная модель классификации древесных пород демонстрирует высокую эффективность, достигая средней точности более 90% на тестовом наборе данных. Наиболее успешные результаты были получены для пород с ярко выраженной фактурой коры, таких как дуб и берёза, где точность превышает 95%. Это свидетельствует о способности модели эффективно извлекать ключевые признаки из изображений с выраженным фактурными элементами.

Тем не менее, модель сталкивается с трудностями при классификации пород с визуально схожей фактурой, таких как ель и сосна. Точность для этих пород составила около 85%, что указывает на недостаточную дифференцирующую способность модели для подобных классов. Это может быть связано как с ограничениями используемого набора данных, так и с архитектурными особенностями модели. Для улучшения классификации таких пород рекомендуется рассмотреть возможность увеличения объёма данных для этих классов и добавления дополнительных признаков, таких как спектральные характеристики или морфометрические параметры.

Анализ влияния внешних факторов выявил, что угол съёмки и уровень освещённости существенно влияют на точность классификации. С увеличением угла съёмки точность снижается, что связано с перспективными искажениями фактуры. Освещённость также оказалась значимым фактором: при низком уровне освещения точность повышается за счёт уменьшения артефактов, таких как блики, тогда как при высоком уровне освещённости наблюдаются менее стабильные результаты. Эти выводы подчёркивают необходимость дальнейшей работы с аугментацией данных, включая моделирование различных углов съёмки и условий освещённости.

Примечательно, что фактурная изменчивость, вопреки ожиданиям, оказывает статистически незначимое влияние на точность классификации. Это может свидетельствовать о высокой адаптивности модели, способной эффективно обрабатывать как однородные, так и гетерогенные текстуры. Однако низкий коэффициент детерминации регрессионной модели ($R^2 = 0,243$) указывает на ограниченную объяснительную способность текущего набора предикторов. Для более полного объяснения вариации точности целесообразно включение дополнительных факторов, таких как влажность коры, наличие биологических повреждений (например, следов насекомых или грибковых поражений), а также учет сезонных изменений морфологических характеристик древесных стволов.

В целом предложенный подход подтвердил свою применимость для автоматической классификации древесных пород на основе анализа изображений стволов деревьев, полученных с использованием БПЛА. Однако рекомендуется расширить обучающую выборку, включить дополнительные параметры окружающей среды и провести кросс-валидацию на независимых наборах данных.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Войтов Д.Ю., Васильев С.Б., Кормилицын Д.В. Разработка технологии определения породы деревьев с применением компьютерного зрения // Лесной вестник. 2023. Т. 27, № 1. С. 60–66. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-60-66.

Говядин И.К. Инновационные подходы к сбору данных о высотах и диаметрах деревьев в насаждениях // Перспективы развития лесного комплекса: сб. науч. тр. межд. науч.-практ. конф. Брянск, 2023. С. 179–182.

Говядин И.К., Чубинский А.Н., Алексеев А.С. Метод измерения диаметров деревьев на основе технологий искусственного интеллекта // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 249. С. 177–194. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.177-194.

Говядин И.К., Каримов Б.М., Шеремет В.А. Система визуализации данных. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023612089 Российская Федерация: № 2022668020; заявл. 30.09.2022; опубл. 30.01.2023.

Каримов Б.М., Говядин И.К. Искусственный интеллект в лесной отрасли: возможности и перспективы // Современные тренды управления и цифровая экономика: от регионального развития к глобальному экономическому росту: сб. ст. V Межд. науч.-практ. конф. Екатеринбург, 2023. С. 334–338.

Овсянников А.В. Методология классификации пород деревьев boreальных лесов с использованием архитектуры Efficientnet искусственного интеллекта // Journal of Agriculture and Environment. 2024. No. 5 (45). DOI: 10.60797/JAE.2024.45.8.

Armi L., Abbasi E. Tree Bark Classification using Color-improved Local Quinary Pattern and Stacked MEETG // Journal of Artificial Intelligence and Data Mining (JAIDM). 2023. Vol. 11, no. 3. P. 391–405. DOI: 10.22044/jadm.2023.12692.2420.

Carpentier M., Giguère P., Gaudreault J. Tree Species Identification from Bark Images Using Convolutional Neural Networks // 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2018. DOI: 10.48550/arXiv.1803.00949.

Kim T.K., Hong J., Ryu D., Kim S., Byeon S.Y., Huh W., Kim K., Baek G.H., Kim H.S. Identifying and extracting bark key features of 42 tree species using convolutional neural networks and class activation mapping // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. Art. no. 4772. DOI: 10.1038/s41598-022-08571-9.

Kim J.-H., Purusatama B.D., Saverio A., Prasetya D., Jang J., Park S.-Y., Lee S., Kim N. Convolutional neural network performance and the factors affecting performance for classification of seven *Quercus* species using sclereid characteristics in the bark // BioResources. 2023. Vol. 19. P. 510–524. DOI: 10.15376/biores.19.1.510-524.

Kottilapurath Surendran G., Deekshitha, Lukac M., Výbošťok J., Mokros M. A forestry investigation: Exploring factors behind improved tree species classification using bark images // Ecological Informatics. 2024. Vol. 85, iss. 1. Art. no. 102932. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2024.102932.

Miao S., Zhang K., Zeng H., Liu J. AI-Based Tree Species Classification Using Pseudo Tree Crown Derived From UAV Imagery (preprint). 2024. DOI: 10.20944/preprints202402.0786.v1.

Onishi M., Ise T. Explainable identification and mapping of trees using UAV RGB image and deep learning // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. Art. no. 903. DOI: 10.1038/s41598-020-79653-9.

Pradipkumar V.H., Alagu Raja R.A. Automatic Identification of Tree Species from UAV Images Using Machine Learning Approaches // Journal of the Indian Society of Remote Sensing. 2022. Vol. 50. P. 2447–2464. DOI: 10.1007/s12524-022-01608-6.

References

- Armi L., Abbasi E. Tree Bark Classification using Color-improved Local Quinary Pattern and Stacked MEETG. *Journal of Artificial Intelligence and Data Mining (JAIDM)*, 2023, vol. 11, no. 3, pp. 391–405. DOI: 10.22044/jadm.2023.12692.2420.
- Carpentier M., Giguère P., Gaudreault J. Tree Species Identification from Bark Images Using Convolutional Neural Networks. *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2018. DOI: 10.48550/arXiv.1803.00949.
- Goyyadin I.K. Innovative approaches to collecting data on the heights and diameters of trees in plantations. *Prospects for the development of the forestry complex: collection of scientific papers of the int. sci.-pract. conf.* Bryansk, 2023, pp. 179–182. (In Russ.)
- Goyyadin I.K., Karimov B.M., Sheremet V.A. Data visualization system. Certificate of state registration of a computer program No. 2023612089 Russian Federation: No. 2022668020; decl. 09/30/2022; publ. 01/30/2023. (In Russ.)
- Goyyadin I.K., Chubinsky A.N., Alekseev A.S. Method for measuring tree diameters based on artificial intelligence technologies. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 249, pp. 177–194. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.177-194. (In Russ.)
- Karimov B.M., Goyyadin I.K. Artificial intelligence in the forestry industry: opportunities and prospects // *Modern management trends and digital economy: from regional development to global economic growth: collection of articles from the V Int. sci.-pract. conf.* Ekaterinburg, 2023, pp. 334–338.
- Kim T.K., Hong J., Ryu D., Kim S., Byeon S.Y., Huh W., Kim K., Baek G.H., Kim H.S. Identifying and extracting bark key features of 42 tree species using convolutional neural networks and class activation mapping. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, art. no. 4772. DOI: 10.1038/s41598-022-08571-9.
- Kim J.-H., Purusatama B.D., Saverio A., Prasetya D., Jang J., Park S.-Y., Lee S., Kim N. Convolutional neural network performance and the factors affecting performance for classification of seven *Quercus* species using sclereid characteristics in the bark. *BioResources*, 2023, vol. 19, pp. 510–524. DOI: 10.15376/biores.19.1.510-524.
- Kottilapurath Surendran G., Deekshitha, Lukac M., Výbošt'ok J., Mokros M. A forestry investigation: Exploring factors behind improved tree species classification using bark images. *Ecological Informatics*, 2024, vol. 85, iss. 1, art. no. 102932. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2024.102932.
- Miao S., Zhang K., Zeng H., Liu J. AI-Based Tree Species Classification Using Pseudo Tree Crown Derived From UAV Imagery (preprint). 2024. DOI: 10.20944/preprints202402.0786.v1.
- Onishi M., Ise T. Explainable identification and mapping of trees using UAV RGB image and deep learning. *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, art. no. 903. DOI: 10.1038/s41598-020-79653-9.

Ovsyannikov A.V. Methodology for classification of boreal forest tree species using the Efficientnet artificial intelligence architecture. Journal of Agriculture and Environment, 2024, no. 5 (45). DOI: 10.60797/JAE.2024.45.8. (In Russ.)

Pradipkumar V.H., Alagu Raja R.A. Automatic Identification of Tree Species from UAV Images Using Machine Learning Approaches. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2022, vol. 50, pp. 2447-2464. DOI: 10.1007/s12524-022-01608-6.

Voitov D.Yu., Vasilyev S.B., Kormilitsyn D.V. Development of technology for determining tree species using computer vision. Forestry Bulletin, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 60-66. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-60-66. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 05.02.2025

Говядин И.К., Чубинский А.Н. Распознавание древесных пород на основе анализа изображений // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 262–276. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.262-276

В статье представлен метод автоматического распознавания древесных пород на основе анализа изображений стволов деревьев, полученных с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Авторы применяют сверточные нейронные сети (CNN) для классификации семи древесных пород: берёзы, ели, сосны, осины, клёна, дуба и лиственницы. Исследование направлено на преодоление ограничений традиционных методов идентификации, таких как субъективность экспертной оценки и высокая трудоёмкость. Методология включает сбор и предварительную обработку данных, аугментацию изображений для увеличения вариативности, а также обучение модели с использованием архитектур ResNet, EfficientNet и MobileNet. Результаты демонстрируют высокую эффективность модели: средняя точность классификации превышает 90%, при этом наилучшие показатели достигнуты для дуба (97,6%) и берёзы (95,4%). Для пород с визуально схожей фактурой (ель и сосна) точность составила около 85%, что указывает на необходимость дальнейшей оптимизации. Анализ влияния внешних факторов выявил значимость угла съёмки и уровня освещённости для точности классификации. Предложенный метод может быть использован в лесном хозяйстве для автоматизации мониторинга и управления ресурсами. Для повышения эффективности авторы рекомендуют расширить набор данных, включить дополнительные параметры окружающей среды и провести кросс-валидацию на независимых выборках.

Ключевые слова: искусственный интеллект, компьютерное зрение, машинное обучение, анализ деревьев, распознавание деревьев, алгоритмы ИИ.

Govyadin I.K., Chubinsky A.N. Recognition of tree species based on image analysis. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 262–276 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.262-276

The article presents a method for the automatic recognition of tree species based on the analysis of tree trunk images captured using unmanned aerial vehicles (UAVs). The authors employ convolutional neural networks (CNNs) to classify seven tree species: birch, spruce, pine, aspen, maple, oak, and larch. The study aims to overcome the limitations of traditional identification methods, such as subjective expert assessment and high labor intensity. The methodology includes data collection and preprocessing, image augmentation to increase variability, and model training using ResNet, EfficientNet, and MobileNet architectures. The results demonstrate the model's high efficiency, with an average classification accuracy exceeding 90%. The best performance was achieved for oak (97,6%) and birch (95,4%), while visually similar species (spruce and pine) showed lower accuracy (around 85%), indicating the need for further optimization. An analysis of external factors revealed the significant impact of shooting angle and lighting conditions on classification accuracy. The proposed method can be applied in forestry for automated monitoring and resource management. To enhance performance, the authors recommend expanding the dataset, incorporating additional environmental parameters, and conducting cross-validation on independent datasets.

К e y w o r d s: artificial intelligence, computer vision, machine learning, tree analysis, tree recognition, AI algorithms.

ГОВЯДИН Илья Константинович – доцент кафедры технологии материалов, конструкций и сооружений из древесины Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук. Researcher ID: AAF-5782-2019. ORCID: 0000-0002-0143-1916.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: govyadin812@gmail.com

GOVYADIN Ilya K. – PhD (Technical), St.Petersburg State Forest Technical University. Researcher ID: AAF-5782-2019. ORCID: 0000-0002-0143-1916.

194021. Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: govyadin812@gmail.com

ЧУБИНСКИЙ Анатолий Николаевич – профессор кафедры технологии материалов, конструкций и сооружений из древесины Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор технических наук. Researcher ID: I-9432-2016. ORCID: 0000-0001-7914-8056.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: a.n.chubinsky@gmail.com

CHUBINSKY Anatoly N. – DSc (Technical), Professor, St.Petersburg State Forest Technical University. Researcher ID: I-9432-2016. ORCID: 0000-0001-7914-8056.

194021. Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: a.n.chubinsky@gmail.com

М.А. Гнусов, А.А. Платонов, Д.Ю. Дручинин

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЁМА
ВОРОХА ВОЛОЧЕНИЯ ПОРУБОЧНЫХ ОСТАТКОВ,
ФОРМИРУЕМОГО ЛЕСНЫМИ ГРАБЛЯМИ**

Введение. Технологическая операция сбора (сгребания) порубочных остатков неотъемлемой частью входит в состав целого ряда технологических процессов выполнения работ по заготовке древесины или целенаправленного удаления нежелательной древесно-кустарниковой растительности. Текущий сценарий систем лесоводства во всем мире очень часто не предполагает наличия специальной техники, в результате чего технологическая операция сбора (сгребания) порубочных остатков нередко выполняются вручную [Morais et al., 2023]. Не рассматривая в данном исследовании ручной способ сбора порубочных остатков (широко, впрочем, распространённый на территории России) отметим, что указанная операция должна выполняться специализированными техническими средствами под общим названием «лесные грабли» [Платонов, 2023]. Однако, несмотря на важность и возможность [Трушевский и др., 2024] выполнения указанной технологической операции, сами лесные грабли рассматриваются в современных отечественных и мировых научно-исследовательских работах весьма поверхностно, зачастую лишь в рамках обсуждения вопросов о необходимости сбора (фактически – заготовки) формирующейся биомассы из порубочных остатков.

Выполненным нами обзором современных научных работ было установлено отсутствие исследований, в которых проводилась бы частная или комплексная оценка критериев совершенствования технических средств сбора или сгребания порубочных остатков (лесных грабель). Некоторые современные исследования сосредоточены на оценке взаимосвязи между сгребанием порубочных остатков и экологическими последствиями такого процесса [Dickens et al., 2020; Elliot, Rhee, 2022], целый ряд исследований посвящён обсуждению выгод, которые лесозаготовители получают от формирующихся рынков биомассы [Garren et al., 2022; Fokin et al., 2024; Louis et al., 2024; Kühmaier, Grünberg, 2025], а также возможности использования «зелёных отходов» как источника энергии [Маганов и др., 2024; Kunickaya et al., 2024; Mcgookin et al., 2025]. Ряд научных работ посвящён

выявлению взаимосвязи между затратами на сгребание порубочных остатков и производительностью такого процесса [Louis et al., 2022; Yoshimura et al., 2025], в том числе по различным придорожным территориям [Рябухин и др., 2023; Fernandez-Lacruz et al., 2020; Nilsson, Grönlund, 2024]. Лишь некоторые исследователи [Laitila, Väätäinen, 2020, 2021] выделяют необходимость определения объёма собираемой (сгребаемой) биомассы, при этом наш обзор выявил отсутствие исследований, оценивающих такой ключевой момент достижения оптимальной производительности лесных грабель, как определение (в том числе моделирование) объёма формируемого ими вороха порубочных остатков.

Целью исследования является разработка математической модели формирования объёма вороха порубочных остатков с целью повышения эффективности их сгребания лесными граблями.

Цель работы достигается посредством разработки соответствующего математического описания, принимающего во внимание конструктивные параметры технических средств сгребания порубочных остатков (лесных грабель), а также параметры порубочных остатков с учётом допустимых факторов формирования лесными граблями вороха волочения порубочных остатков.

Материалы и методика исследования. Исследование, являющееся теоретическим, базируется на анализе и моделировании физических особенностей перемещения древесной биомассы по очищаемой от неё поверхности, а также по поверхности лесных грабель.

Объект исследования представлял собой лесные грабли с ломанным профилем зубьев постоянного сечения поверхности и наличием предохранительных устройств, закрепляющиеся на переднюю (преимущественно) или заднюю навеску трактора типа Belarus-82.1. Выбор объекта исследования обусловлен тем, что подобные лесные грабли (с числом зубьев $Z = 5$) являются наиболее характерными техническими средствами сгребания порубочных остатков для современного российского и белорусского производства (рис. 1).

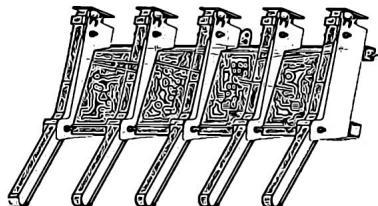


Рис. 1. Модель лесных грабель
Fig. 1. Forest rake model

Предметом исследования является математическая модель формирования посредством лесных грабель объёма вороха порубочных остатков с учётом параметров лесных грабель и сгребаемой биомассы.

Для достижения поставленной цели использовались методы математического моделирования, а именно: кинематический (для учёта траектории движения зубьев лесных грабель, углов обвала свежесрезанных порубочных остатков), динамический (для учёта устойчивости лесных грабель и вороха порубочных остатков).

Результаты исследования. В процессе сгребания лесными граблями 1 свежесрезанных порубочных остатков перед рассматриваемыми техническими средствами формируется ворох волочения 2, состоящий, как правило, из смеси элементов древесной массы (веток, стеблей, листьев или хвои и т. д.) и, в незначительном количестве (зависит от модели лесных грабель), срезанного зубьями лесных грабель грунта (рис. 2).

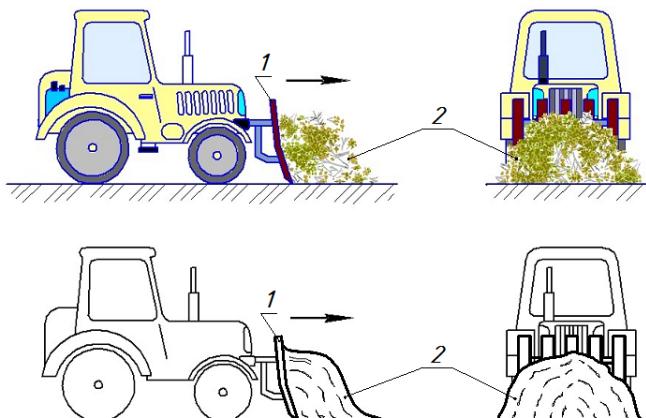


Рис. 2. Ворох волочения, формируемый перед лесными граблями

Fig. 2. A pile of drag material formed in front of a forest rake

Ворох волочения порубочных остатков, каждый раз формируемый лесными граблями в процессе их прохождения по очищаемой территории, определяется сочетанием конструктивных и технологических параметров работы, обладая такими отличительными характеристиками, как масса, плотность и объём.

Основные параметры существующих и перспективных конструкций лесных грабель целесообразно определять с учётом формируемого при по-

моши лесных грабель вороха порубочных остатков, характеризуемого, в частности, его объёмом.

На рис. 3 представлен формируемый при помощи лесных грабель ворох порубочных остатков объёмом V_R , при этом для наглядности изображения верхняя точка указанного объёма (рис. 3, т. А) не совпадает с верхней крайней точкой (рис. 3, т. В) рабочей поверхности лесных грабель.

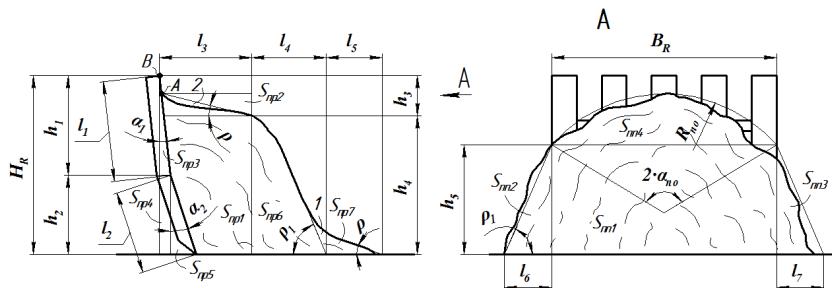


Рис. 3. Расчёчная схема формируемого при помощи лесных грабель объёма порубочных остатков

Fig. 3. Calculation scheme of the volume of logging residues formed using a forest rake

Конструктивными параметрами, оказывающими непосредственное влияние на взаимодействие лесных грабель ломаного профиля с порубочными остатками, являются (рис. 3): B_R и H_R – соответственно, ширина и высота лесных грабель, м; l_1 и l_2 – длины верхней и нижней частей зуба лесных грабель, м; α_1 и α_2 – углы наклона верхней и нижней частей зуба лесных грабель, град.

Иными основными параметрами взаимодействия лесных грабель ломаного профиля с порубочными остатками являются (рис. 3): ρ – угол внутреннего трения свежесрезанной древесины (порубочных остатков) в покое, град.; ρ_1 – критический угол обвала свежесрезанной древесины (порубочных остатков), град.; h_3 – расстояние от верхней крайней точки рабочей поверхности лесных грабель до точки начала обвала свежесрезанной древесины (порубочных остатков), м; h_4 – расстояние от точки взаимодействия лесных грабель с очищаемой поверхностью до точки начала обвала свежесрезанной древесины (порубочных остатков), м; h_5 – расстояние от точки взаимодействия лесных грабель с очищаемой поверхностью до точки контакта по высоте крайнего по ширине зуба с порубочными остатками (высота валика порубочных остатков), м; l_6 (l_7) – ширина валика порубочных остатков, м.

Площади продольного (S_{np}) и поперечного (S_{nn}) сечений формируемого объёма порубочных остатков (рис. 3) определяются как (1):

$$S_{np} = \sum_{i=1}^{n_{np}} S_{np,i}; \quad S_{nn} = \sum_{i=1}^{n_{nn}} S_{nn,i}, \quad (1)$$

где $S_{np,i}$ ($S_{nn,i}$) – элементарные площади продольного (поперечного) сечений объёма порубочных остатков при общем количестве таких площадей n_{np} (n_{nn}).

При определении площадей продольного (S_{np}) и поперечного (S_{nn}) сечений формируемого объёма порубочных остатков принимались следующие допущения:

1. Очищаемая от порубочных остатков поверхность характеризуется наличием на ней лесной подстилки с отсутствием невыкорчеванных пней, а также иных естественных и искусственных включений (препятствий);
2. Угол наклона очищаемой от порубочных остатков поверхности не превышает 3° ;
3. В продольной проекции лесных грабель (рис. 3) формирующийся объём порубочных остатков достигает крайней точки (т. В) рабочей поверхности лесных грабель, в отдельных случаях превышая её по высоте;
4. При волочении объёма порубочных остатков угол ρ внутреннего трения одинаков (рис. 3) в начале и в конце данного объёма. Аналогично, критический угол обвала ρ_1 одинаков как для основного объёма порубочных остатков (рис. 3), так и для валиков порубочных остатков, формирующихся по обе стороны ширины лесных грабель;
5. Размеры l_6 и l_7 валиков порубочных остатков одинаковы, при этом недостаток расчётного объёма одного валика компенсируется избытком расчётного объёма другого валика (рис. 3);
6. Продольный объём порубочных остатков, характеризуемый площадью S_{nn7} (рис. 3), распределяется по неучтённым объёмам (площадям) 1 и 2;
7. Верхняя граница объёма порубочных остатков с долей вероятности $P = 0,9$ соответствует дуге радиуса R (рис. 3).
8. Динамически изменяющееся в процессе сгребания порубочных остатков расстояние h_3 в каждый момент времени t соответствует наибольшему размеру (длине или размаху веток по их наиболее удалённым точкам от ствола/стволов) сгребаемых порубочных остатков.

С учётом принятых допущений, площади $S_{np1} \dots S_{np6}$ (m^2) определяются по формулам (2), просуммировав которые, можно определить площадь продольного сечения S_{np} формируемого лесными граблями объёма порубочных остатков по формуле (3).

$$\begin{cases} S_{np1} = \frac{H_R \cdot h_3}{\operatorname{tg} \rho}, & S_{np2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{h_3}{\operatorname{tg} \rho} \cdot h_3, & S_{np3} = \frac{1}{2} \cdot h_1 \cdot h_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha_1, \\ S_{np4} = h_2 \cdot h_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha_1, & S_{np5} = \frac{1}{2} \cdot h_2 \cdot l_2 \cdot \sin \alpha_2, & S_{np6} = \frac{1}{2} \cdot h_4 \cdot \frac{h_4}{\operatorname{tg} \rho_1}; \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} S_{np} = & S_{np1} - S_{np2} - S_{np3} - S_{np4} - S_{np5} + S_{np6} = \\ = & \frac{H_R \cdot h_3}{\operatorname{tg} \rho} - \frac{h_3^2}{2 \cdot \operatorname{tg} \rho} - \frac{l_1^2 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \sin \alpha_1}{2} - l_2 \cdot \cos \alpha_2 \cdot l_1 \cdot \sin \alpha_1 - \\ - & \frac{l_2 \cdot \cos \alpha_2 \cdot l_2 \cdot \sin \alpha_2}{2} + \frac{(H_R - h_3)^2}{2 \cdot \operatorname{tg} \rho_1} = \frac{H_R \cdot h_3}{\operatorname{tg} \rho} - \frac{h_3^2}{2 \cdot \operatorname{tg} \rho} - \\ - & \frac{l_1^2 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \sin \alpha_1}{2} - l_1 \cdot l_2 \cdot \cos \alpha_2 \cdot \sin \alpha_1 - \frac{l_2^2 \cdot \cos \alpha_2 \cdot \sin \alpha_2}{2} + \frac{(H_R - h_3)^2}{2 \cdot \operatorname{tg} \rho_1}. \end{aligned} \quad (3)$$

Установленное выражение (3) представляет собой функцию площади продольного сечения порубочных остатков (перемещаемых по очищаемой поверхности и взаимодействующих с ней) в зависимости от конструктивных параметров лесных грабель (а именно – H_R , l_1 , l_1 , α_1 и α_2) и с учётом углов внутреннего трения ρ и обвала ρ_1 свежесрезанной древесины (порубочных остатков).

С учётом принятых допущений площади $S_{nn1} \dots S_{nn4}$ (m^2) определяются по формуле (4), просуммировав которые, можно определить площадь по-перечного сечения S_{nn} формируемого лесными граблями объёма порубочных остатков по формуле (5).

$$\begin{cases} S_{nn1} = B_R \cdot h_5; & S_{nn2} = S_{nn3} = \frac{1}{2} \cdot h_5 \cdot l_6; \\ S_{nn4} = \frac{R_{no}^2}{2} \cdot \left(\pi \cdot \frac{2 \cdot \alpha_{no}}{180} - \sin(2 \cdot \alpha_{no}) \right); \\ R_{no} = \frac{2 \cdot H_R / (1 - \cos \alpha_{no})}{2}; & \alpha_{no} = 2 \cdot \operatorname{arctg} \frac{2 \cdot (H_R - h_5)}{B_R}. \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
S_{\text{пп}} = S_{\text{пп1}} + S_{\text{пп2}} + S_{\text{пп3}} + S_{\text{пп4}} = B_R \cdot h_5 + 2 \cdot \frac{h_5 \cdot l_6}{2} + \\
+ \frac{1}{2} \cdot \left(\left(\frac{H_R - h_5}{1 - \cos \left(2 \cdot \arctg \frac{2 \cdot (H_R - h_5)}{B_R} \right)} \right)^2 \cdot \left(\pi \cdot \frac{2 \cdot 2 \cdot \arctg \frac{2 \cdot (H_R - h_5)}{B_R}}{180} - \right. \right. \\
\left. \left. - \sin \left(2 \cdot 2 \cdot \arctg \frac{2 \cdot (H_R - h_5)}{B_R} \right) \right) \right) = B_R \cdot l_6 \cdot \operatorname{tg} \rho_1 + l_6^2 \cdot \operatorname{tg} \rho_1 + \\
+ \frac{1}{2} \cdot \left(\left(\frac{H_R - l_6 \cdot \operatorname{tg} \rho_1}{1 - \cos \left(2 \cdot \arctg \frac{2 \cdot (H_R - l_6 \cdot \operatorname{tg} \rho_1)}{B_R} \right)} \right)^2 \times \right. \\
\left. \times \left(\frac{\pi \cdot \arctg \frac{2 \cdot (H_R - l_6 \cdot \operatorname{tg} \rho_1)}{B_R}}{45} - \sin \left(4 \cdot \arctg \frac{2 \cdot (H_R - l_6 \cdot \operatorname{tg} \rho_1)}{B_R} \right) \right) \right). \quad (5)
\end{aligned}$$

Установленное выражение (5) представляет собой функцию площади поперечного сечения порубочных остатков (перемещаемых по очищаемой поверхности и взаимодействующих с ней) в зависимости от конструктивных параметров лесных грабель (а именно $-H_R$, B_R) и с учётом параметров формирования валиков порубочных остатков (ρ_1 и l_6).

С учётом формул (3) и (5), обозначая $l_6 + l_7 = 2 \cdot l_{\text{в}}$, $l_3 = l_{\text{ПВО}}$, а также принимая во внимание изменение (уменьшение) площади поперечного сечения $S_{\text{пп}}$ в направлении движения базового транспортного средства, формируемый лесными граблями объём V_R (м^3) порубочных остатков определяется по формуле (6) как:

$$\begin{aligned}
V_R = \left(\frac{H_R \cdot l_{\text{ПВО}}}{\operatorname{tg} \rho} - \frac{l_{\text{ПВО}}^2}{2 \cdot \operatorname{tg} \rho} - \frac{l_1^2 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \sin \alpha_1}{2} - l_1 \cdot l_2 \cdot \cos \alpha_2 \cdot \sin \alpha_1 - \right. \\
\left. - \frac{l_2^2 \cdot \cos \alpha_2 \cdot \sin \alpha_2}{2} + \frac{(H_R - l_{\text{ПВО}})^2}{2 \cdot \operatorname{tg} \rho_1} \right) \cdot (B_R + 2 \cdot l_{\text{в}}). \quad (6)
\end{aligned}$$

Обсуждение. Эффективность сгребания порубочных остатков лесными граблями во многом зависит от производительности работы рассматри-

ваемых технических средств. В целом производительность сгребания формирующейся биомассы вышеописанными (а также аналогичными по основным конструктивным элементам) лесными граблями зависит от следующих факторов:

- состояния удаляемой растительности (высокая плотность сгребаемой биомассы обуславливает повышенную вероятность застревания лесных грабель, необходимость применения увеличенных толкающих усилий трактора, повторных проходов для его продвижения);
- состояния остающейся растительности (большое расстояние между растущими деревьями/кустарниками, отсутствие подлеска и густой высокой травянистой растительности обуславливает возможность маневренной работы тракторного агрегата на повышенных скоростях);
- типа, состояния почвы и рельефа местности (работа на склонах или при неровном рельефе замедляет сгребание сформированной биомассы, высокая влажность почвы снижает проходимость и замедляет движение тракторного агрегата, обуславливает забивание зубьев лесных грабель смесью почвы и растительных остатков);
- загрязнённости очищаемой территории, наличия инфраструктурных препятствий (пни, валуны, камни, металлический лом, шины, а также столбы ЛЭП и т. п. обуславливают необходимость маневрирования тракторного агрегата на пониженных скоростях).

В целом, принимая во внимание вышеописанные результаты исследования, производительность W_R ($\text{м}^3/\text{ч}$) работы трактора с агрегатированными на нём лесными граблями определится по формуле (7):

$$W_R = \frac{3600 \cdot V_R \cdot k_{\text{п}} \cdot k_{\text{в}}}{t_{\text{п}}} = \frac{3600 \cdot k_{\text{п}} \cdot k_{\text{в}}}{t_{\text{п}}} \cdot \left(\frac{H_R \cdot l_{\text{ПБО}}}{\text{tg} \rho} - \frac{l_{\text{ПБО}}^2}{2 \cdot \text{tg} \rho} - \frac{l_1^2 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \sin \alpha_1}{2} - l_1 \cdot l_2 \cdot \cos \alpha_2 \cdot \sin \alpha_1 - \frac{l_2^2 \cdot \cos \alpha_2 \cdot \sin \alpha_2 + (H_R - l_{\text{ПБО}})^2}{2 \cdot \text{tg} \rho_1} \right) \cdot (B_R + 2 \cdot l_{\text{в}}). \quad (7)$$

где V_R – формируемый лесными граблями объём порубочных остатков, м^3 ; $k_{\text{п}}$ – коэффициент окраинных потерь порубочных остатков лесными граблями ($k_{\text{п}} = 0,9 \dots 1$); $k_{\text{в}}$ – коэффициент использования базового транспортного средства по времени ($k_{\text{в}} = 0,8 \dots 0,9$).

Выполнение многофакторной оптимизации конструктивных параметров рассмотренных в данном исследовании технических средств сгребания

порубочных остатков позволит определить по полученному выражению (7) оптимальные величины производительности их работы, что, как следствие, позволит повысить эффективность сгребания лесными граблями формирующейся в ходе проведения лесозаготовок или проведения лесохозяйственных работ биомассы.

Заключение. Установлено, что, несмотря на важность выполнения технологической операции сбора и сгребания порубочных остатков, лесные грабли (призванные осуществлять указанную технологическую операцию) рассматриваются в современных отечественных и мировых научно-исследовательских работах весьма поверхностно, зачастую лишь в рамках обсуждения вопросов о необходимости сбора (фактически заготовки) формирующейся биомассы из порубочных остатков.

Показано, что формируемый лесными граблями ворох волочения порубочных остатков обладает такими отличительными характеристиками, как масса, плотность и объём, от величины последнего при этом зависит производительность работы трактора с агрегатированными на нём лесными граблями.

Выявлено, что объём вороха волочения лесными граблями определяется их конструктивными параметрами (габаритными шириной и высотой, длинами и углами наклона верхней и нижней частей зуба), параметрами сгребаемых порубочных остатков (наибольшим размером по длине или размаху веток, углом внутреннего трения, шириной валиков сгребаемой биомассы по сторонам лесных грабель).

Раскрыто, что производительность сгребания формирующейся биомассы лесными граблями зависит от комплекса влияющих факторов, связанных с состояниями удаляемой и остающейся растительности, типом почвы и рельефом местности, загрязнённостью очищаемой территории.

В перспективе предложено на основе многофакторной оптимизации конструктивных параметров лесных грабель выявить по полученному в исследовании выражению оптимальные величины производительности работы лесных грабель, что позволит повысить эффективность сгребания ими формирующихся порубочных остатков.

Сведения о финансировании исследования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-19-00876.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Маганов И.А., Тихонов Е.А., Петруша С.В., Трушевский П.В., Морковин В.А., Куницкая О.А. Исследование энергетического баланса лесных терминалов, функционирующих на биотопливных источниках энергии // Лесотехнический журнал. 2024. № 14(3). С. 5-22. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2024.3/1.

Платонов А.А. Грабли лесные: назначение, область применения, классификация // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2023. № 27(6). С. 139-150. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-139-150.

Рябухин П.Б., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Обоснование технологических процессов и систем машин для лесосечных работ // ИВУЗ. Лесной журнал. 2023. № 2(392). С. 88-105. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-2-88-105.

Трушевский П.В., Должиков И.С., Григорьев И.В., Григорьева О.И., Ревяко С.И., Баранов А.Н. Определение доступного запаса порубочных остатков на лесосеке после сплошной рубки по скандинавской технологии // Resources and Technology. 2024. № 21(3). С. 57-74. DOI: 10.15393/j2.art.2024.7863.

Dickens D., Morris L., Clabo D., Ogden L. Pine Straw Raking and Growth of Southern Pine: Review and Recommendations // Forests. 2020. Vol. 11. Art. no. 799. DOI: 10.3390/f11080799.

Elliot W., Rhee H. Impacts of Forest Biomass Operations on Forest Hydrologic and Soil Erosion Processes // Trees, Forests and People. 2022. Vol. 7. Art. no. 100186. DOI: 10.1016/j.tfp.2021.100186.

Fernandez-Lacruz R., Edlund M., Bergström D., Lindroos O. Productivity and profitability of harvesting overgrown roadside verges – a Swedish case study // International Journal of Forest Engineering. 2020. Vol. 32. P. 1-10. DOI: 10.1080/14942119.2020.1822664.

Fokin S., Shportko O., Druchinin D. On shredding of wood raw materials with knives of different designs // BIO Web of Conferences. 2024. Vol. 145. Art. no. 03012. DOI: 10.1051/bioconf/202414503012.

Garren A., Bolding M., Barrett S., Aust W.M., Coates T.A. Characteristics of forest biomass harvesting operations and markets in Virginia // Biomass and Bioenergy. 2022. Vol. 163. Art. no. 106501. DOI: 10.1016/j.biombioe.2022.106501.

Kunickaya O., Zyryanov M., Medvedev S., Mokhriev A., Spiridonova A., Perfiliev P., Teppoev A. Efficient Technologies for Harvesting and Reutilizing Logging Residues in Russia: A Sustainable Forestry Approach // Mathematical Modelling of Engineering Problems. 2024. Vol. 11. P. 745-753. DOI: 10.18280/mmep.110319.

Kühmaier M., Grünberg J. The Relevance of Criteria and Indicators for Sustainable Timber Harvesting from the Perspective of Different Stakeholders. Journal of Sustainable // Forestry. 2025. Vol. 44. P. 1-21. DOI: 10.1080/10549811.2025.2513229.

Laitila J., Väätäinen K. Productivity of harvesting and clearing of brushwood alongside forest roads // Silva Fennica. 2020. Vol. 54, iss. 5. Art. no. 21. DOI: 10.14214/sf.10379.

Laitila J., Väätäinen K. Productivity and cost of harvesting overgrowth brushwood from roadsides and field edges // International Journal of Forest Engineering. 2021. Vol. 32, iss. 2. P. 140-154. DOI: 10.1080/14942119.2021.1903790.

Louis L.T., Daigneault A., Kizha A.R. Constraints and opportunities in harvesting woody biomass: perspectives of foresters and loggers in the Northeastern United States // International Journal of Forest Engineering. 2024. Vol. 35. P. 1-16. DOI: 10.1080/14942119.2023.2299158.

Louis L.T., Kizha A.R., Daigneault A., Han H.-S., Weiskittel A. Factors Affecting Operational Cost and Productivity of Ground-Based Timber Harvesting Machines: a Meta-analysis // Current Forestry Reports. 2022. Vol. 8. P. 38-54. DOI: 10.1007/s40725-021-00156-5.

Mcgookin C., Charchi N., Mendonça A., Beretta S., Ellis N. Green waste, an untapped energy source? Reviewing the prospect of green waste as a biomass energy source // Cleaner Waste Systems. 2025. Vol. 11. Art. no. 100273. DOI: 10.1016/j.clwas.2025.100273.

Moraes G.F. de, Santos J.d.S.G., Han D., Filho L.O.R., Xavier M.G.B., Schmidt L., de Souza H.D., de Castro F.T., de Souza-Esquerdo V.F., Albiero D. Agricultural Machinery Adequacy for Handling the Mombaça Grass Biomass in Agroforestry Systems // Agriculture. 2023, Vol. 13. Art. no. 1416. DOI: 10.3390/agriculture13071416.

Nilsson D., Grönlund Ö. Productivity and cost of harvesting roadside brushwood and small trees in Sweden: a simulation study // International Journal of Forest Engineering. 2024. Vol. 35, iss. 1. P. 1-14. DOI: 10.1080/14942119.2024.2336686.

Yoshimura T., Suzuki Y., Sato N. Application of System Dynamics Simulation to Assess System Productivity of Forest Harvesting Systems: A Case Study from Japan // Forests. 2025. Vol. 16, iss. 5. Art. no. 734. DOI: 10.3390/f16050734.

References

Dickens D., Morris L., Clabo D., Ogden L. Pine Straw Raking and Growth of Southern Pine: Review and Recommendations. *Forests*, 2020, vol. 11, art. no. 799. DOI: 10.3390/f11080799.

Elliot W., Rhee H. Impacts of Forest Biomass Operations on Forest Hydrologic and Soil Erosion Processes. *Trees, Forests and People*, 2022, vol. 7, art. no. 100186. DOI: 100186. 10.1016/j.tfp.2021.100186.

Fernandez-Lacruz R., Edlund M., Bergström D., Lindroos O. Productivity and profitability of harvesting overgrown roadside verges – a Swedish case study. *International Journal of Forest Engineering*, 2020, vol. 32, pp. 1-10. DOI: 10.1080/14942119.2020.1822664.

Fokin S., Shportko O., Druchinin D. On shredding of wood raw materials with knives of different designs. *BIO Web of Conferences*, 2024, vol. 145, art. no. 03012. DOI: 10.1051/bioconf/202414503012.

- Garren A., Bolding M., Barrett S., Aust W.M., Coates T.A.* Characteristics of forest biomass harvesting operations and markets in Virginia. *Biomass and Bioenergy*, 2022, vol. 163, art. no. 106501. DOI: 10.1016/j.biombioe.2022.106501.
- Kunickaya O., Zyryanov M., Medvedev S., Mokhriev A., Spiridonova A., Perfiliev P., Teppoev A.* Efficient Technologies for Harvesting and Reutilizing Logging Residues in Russia: A Sustainable Forestry Approach. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 2024, vol. 11, pp. 745-753. DOI: 10.18280/mmep.110319.
- Kühmaier M., Grünberg J.* The Relevance of Criteria and Indicators for Sustainable Timber Harvesting from the Perspective of Different Stakeholders. *Journal of Sustainable Forestry*, 2025, vol. 44, pp. 1-21. DOI: 10.1080/10549811.2025.2513229.
- Laitila J., Väätäinen K.* Productivity of harvesting and clearing of brushwood alongside forest roads. *Silva Fennica*, 2020, vol. 54, iss. 5, art. no. 21. DOI: 10.14214/sf.10379.
- Laitila J., Väätäinen K.* Productivity and cost of harvesting overgrowth brushwood from roadsides and field edges. *International Journal of Forest Engineering*, 2021, vol. 32, iss. 2, pp. 140–154. DOI: 10.1080/14942119.2021.1903790.
- Louis L.T., Daigneault A., Kizha A.R.* Constraints and opportunities in harvesting woody biomass: perspectives of foresters and loggers in the Northeastern United States. *International Journal of Forest Engineering*, 2024, vol. 35, pp. 1–16. DOI: 10.1080/14942119.2023.2299158.
- Louis L.T., Kizha A.R., Daigneault A., Han H.-S., Weiskittel A.* Factors Affecting Operational Cost and Productivity of Ground-Based Timber Harvesting Machines: a Meta-analysis. *Current Forestry Reports*, 2022, vol. 8, pp. 38–54. DOI: 10.1007/s40725-021-00156-5.
- Maganov I.A., Tikhonov E.A., Petrusha S.V., Trushevsky P.V., Morkovin V.A., Kunickaya O.A.* Study of the energy balance of forest terminals operating on biofuel energy sources. *Forestry Engineering Journal*, 2024, vol. 14, iss. 3, pp. 5-22. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2024.3/1. (In Russ.)
- Mcgookin C., Charchi N., Mendonça A., Beretta S., Ellis N.* Green waste, an untapped energy source? Reviewing the prospect of green waste as a biomass energy source. *Cleaner Waste Systems*, 2025, vol. 11, art. no. 100273. DOI: 10.1016/j.clwas.2025.100273.
- Morais G.F. de, Santos J.d.S.G., Han D., Filho L.O.R., Xavier M.G.B., Schmidt L., de Souza H.D., de Castro F.T., de Souza-Esquerdo V.F., Albiero D.* Agricultural Machinery Adequacy for Handling the Mombaça Grass Biomass in Agroforestry Systems. *Agriculture*, 2023, vol. 13, art. no. 1416. DOI: 10.3390/agriculture13071416.
- Nilsson D., Grönlund Ö.* Productivity and cost of harvesting roadside brushwood and small trees in Sweden: a simulation study. *International Journal of Forest Engineering*, 2024, vol. 35, iss. 1, pp. 1-14. DOI: 10.1080/14942119.2024.2336686.
- Platonov A.A.* Forest rakes: purpose, scope, classification. *Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, iss. 6, pp. 139-150. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-139-150. (In Russ.)

Ryabukhin P.B., Kunitskaya O.A., Grigorieva O.I. Justification of technological processes and machine systems for logging operations. IVUZ. Forestry journal, 2023, vol. 2 (392), pp. 88-105. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-2-88-105. (In Russ.)

Trushevsky P.V., Dolzhikov I.S., Grigoriev I.V., Grigorieva O.I., Revyako S.I., Baranov A.N. Determination of the available stock of logging residues in the felling area after clear-cutting using Scandinavian technology. Resources and Technology, 2024, vol. 21, iss. 3, pp. 57-74. DOI: 10.15393/j2.art.2024.7863. (In Russ.)

Yoshimura T., Suzuki Y., Sato N. Application of System Dynamics Simulation to Assess System Productivity of Forest Harvesting Systems: A Case Study from Japan. Forests, 2025, vol. 16, iss. 5, art. no. 734. DOI: 10.3390/f16050734.

Материал поступил в редакцию 17.02.2025

Гнусов М.А., Платонов А.А., Дручинин Д.Ю. Моделирование объёма вороха волочения порубочных остатков, формируемого лесными граблями // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 277-291. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.277-291

Технологическая операция сбора или сгребания порубочных остатков, входящая в состав целого ряда технологических процессов выполнения работ по заготовке древесины или целенаправленного удаления нежелательной древесно-кустарниковой растительности, должна выполняться специализированными техническими средствами под общим названием «лесные грабли». Актуальность исследования определяется отсутствием современных научных работ, оценивающих такой ключевой момент достижения оптимальной производительности лесных грабель, как выявление объёма формируемого ими вороха порубочных остатков. Целью исследования является разработка математической модели формирования объёма вороха порубочных остатков с целью повышения эффективности их сгребания лесными граблями. Объект исследования представлял собой лесные грабли с ломанным профилем зубьев постоянного сечения поверхности и наличием предохранительных устройств, закрепляющиеся на переднюю (преимущественно) или заднюю навеску трактора типа Belarus-82.1. Выявлено, что конструктивные параметры лесных грабель ломаного профиля зубьев (а именно: ширина и высота грабель, длины и углы наклона верхней и нижней частей зуба), параметры сгребаемых лесными граблями порубочных остатков (наибольший размер по длине или размаху веток, угол внутреннего трения, размеры валиков сгребаемой биомассы по обеим сторонам лесных грабель) оказывают непосредственное влияние на взаимодействие лесных грабель с порубочными остатками, формируя объём вороха волочения. Показано, что эффективность сгребания порубочных остатков лесными граблями во многом зависит от производительности их работы, зависящей при этом от комплекса влияющих факторов, связанных с состояниями

удаляемой (сгребаемой) и остающейся (на очищаемой территории) растительности, типом почвы и рельефом местности, степенью загрязнения указанной территории. По результатам данной работы авторами предложено на основе многофакторной оптимизации конструктивных параметров принятых в исследование лесных грабель выявить оптимальные величины производительности их работы, что позволит повысить эффективность сгребания лесными граблями формирующихся порубочных остатков.

Ключевые слова: порубочные остатки, сгребание, лесные грабли, моделирование, конструктивные параметры, ворох волочения, производительность.

Gnusov M.A., Platonov A.A., Druchinin D.Yu. Modeling the volume of a heap of logging residue drag formed by a forest rake. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 277–291 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.277-291

To collect or rake logging residues during timber harvesting or targeted removal of unwanted trees and shrubs, the technological process provides for a corresponding technological operation, which must be performed by specialized technical means under their common name «forest rakes». The relevance of the study is determined by the lack of modern scientific works evaluating such a key moment of achieving optimal productivity of forest rakes as identifying the volume of the logging residue pile formed by them. The purpose of the study is to develop a mathematical model for the formation of the volume of the logging residue pile in order to increase the efficiency of their raking by forest rakes. The object of the study was a forest rake with a broken profile of teeth of constant surface cross-section and the presence of safety devices, fixed to the front (mainly) or rear hitch of a Belarus-82.1 tractor. It has been revealed that the design parameters of forest rakes with a broken tooth profile (namely: the width and height of the rake, the lengths and angles of inclination of the upper and lower parts of the tooth), the parameters of logging residues raked by forest rakes (the largest size along the length or span of branches, the angle of internal friction, the sizes of the rollers of raked biomass on both sides of the forest rake) have a direct effect on the interaction of the forest rake with logging residues, forming the volume of the drag heap. It has been shown that the efficiency of raking logging residues by forest rakes largely depends on the productivity of their work, which depends on a set of influencing factors associated with the state of the removed (raked) and remaining (on the cleared territory) vegetation, the type of soil and terrain, the degree of pollution of the said territory. In order to increase the efficiency of raking forest rakes of logging residues, the authors of the study, based on the results of this work, proposed to identify the optimal values of their performance based on multifactor optimization of the design parameters of the forest rakes adopted in the study.

Keywords: logging residues, raking, forest rakes, modeling, design parameters, drag pile, productivity.

ГНУСОВ Максим Александрович – руководитель лаборатории лесного машиностроения Инженерного центра Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, доктор технических наук, доцент. SPIN-код: 6242-1723. ORCID: 0000-0003-1653-4595.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: mgnusov@yandex.ru

GNUSOV Maksim A. – DSc (Technical), Head of the Laboratory of Forestry Engineering of the Engineering Center of the Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Associate Professor. SPIN-code: 6242-1723. ORCID: 0000-0003-1653-4595.

394087. Timiryazev str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: mgnusov@yandex.ru

ПЛАТОНОВ Алексей Александрович – доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, кандидат технических наук, доцент. SPIN-код: 1306-3080. ORCID: 0000-0003-4114-4636.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: paa7@rambler.ru

PLATONOV Aleksey A. – PhD (Technical), Associate Professor of Department of Forestry Mechanization and Machinery Design of the Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Associate Professor. SPIN-code: 1306-3080. ORCID: 0000-0003-4114-4636.

394087, Timiryazev str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: paa7@rambler.ru

ДРУЧИНИН Денис Юрьевич – заведующий кафедрой механизации лесного хозяйства и проектирования машин Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, кандидат технических наук, доцент. SPIN-код: 2482-8478. ORCID: 0000-0003-2128-2687.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: druchinin.denis@rambler.ru

DRUCHININ Denis Yu. – PhD (Technical), Head of Department of Forestry Mechanization and Machinery Design of the Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Associate Professor. SPIN-code: 2482-8478. ORCID: 0000-0003-2128-2687.

394087. Timiryazev str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: druchinin.denis@rambler.ru

И.И. Шанин, А.А. Штондин

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ
ТИПОВЫХ И ИННОВАЦИОННЫХ РАЗРАБОТОК
В ОБЛАСТИ ПРОФИЛАКТИКИ И ТУШЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ**

Введение. Ежегодные вспышки лесных пожаров на лесных территориях повышают антропогенную нагрузку в регионах и оказывают существенное влияние на состояние окружающей среды. В связи с этим существует необходимость принятия эффективных мер, направленных на предупреждение и скорейшую локализацию лесных пожаров. Принятие необходимых мер по профилактике и тушению лесных пожаров, в контексте изменения климата и снижения углеродного следа, является важной задачей государственного уровня.

Начиная с 2010 года лесные пожары охватывают значительные по площади лесные земли, приводя в негодность тысячи гектаров лесных насаждений. Основным источником оперативных данных о текущей пожароопасной обстановке на лесных территориях выступают открытые данные Рослесхоза. Согласно нормативно-правовой документации Рослесхозом предоставляется ежегодная отчетность о динамике, мероприятиях по предотвращению лесных пожаров. Одной из основных форм является форма 7-ОИП¹.

Ежегодно на территории РФ в разных точках страны происходит множество лесных пожаров, в среднем от 11 до 14 тысяч. Лесная площадь, охваченная огнем, составляет от 8 до 10 тыс. га в каждый пожароопасный период. В 2022 г. можно было наблюдать значительное снижение общей площади лесных пожаров, которому способствовали оперативные мероприятия по предотвращению распространения огня. Тем не менее, только за 2022 г. от лесных пожаров пострадало 3240,5 тыс. га лесов. Число лесных пожаров по-прежнему значительное, но имеет тенденцию к снижению: если за весь 2022 г. было зафиксировано 11924 лесных пожаров, то в 2021 г. их было 14 240 с общей площадью в 9928,1 тыс. га, а в 2020 г. лесными пожа-

¹ Форма N 7-ОИП «Сведения о возникновении лесных пожаров, их ликвидации и эффективности тушения по целевому назначению лесов». URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_415430/d5d8b666fa5e19c9d7ef402ca39bf91e320bfd50/ (дата обращения: 07.08.2024).

рами были охвачены лесные территории на площади 9127,4 тыс. га с общим числом лесных пожаров в 13863 шт. [Государственный..., 2024].

На рис. 1 представлена динамика площадей, охваченных лесными пожарами, а также их количество.

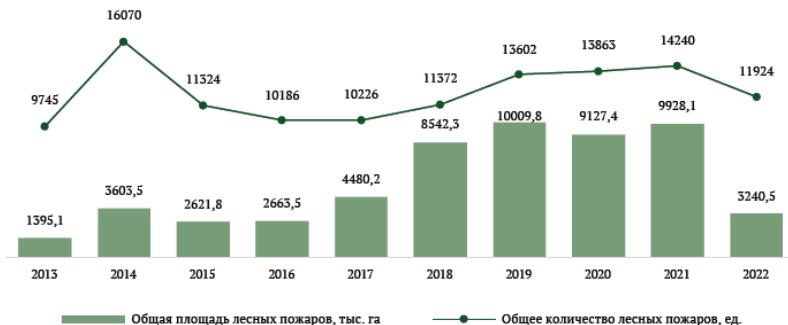


Рис. 1. Динамика площадей, охваченных лесными пожарами (тыс. га), и их количества (шт.) [Государственный..., 2024]

Fig. 1. Dynamics of areas affected by forest fires (thousand hectares) and their amount (units)

В качестве одного из ключевых условий нераспространения огня на лесных территориях можно отметить оперативность реагирования на лесные пожары. Дальнейшая пожароопасная обстановка определяется эффективностью принятых мер по выявлению и локализации очага лесного пожара именно в первые сутки возникновения. В большинстве случаев от действий оперативных, противопожарных служб и ответственных за конкретный участок лесной территории лиц в первые часы лесных пожаров зависит дальнейшая скорость распространения огня, размер площади, охваченной лесным пожаром, и, как следствие, объем утраченных лесных насаждений. На рис. 2 представлены данные о доле лесных пожаров, потушенных в день возникновения.

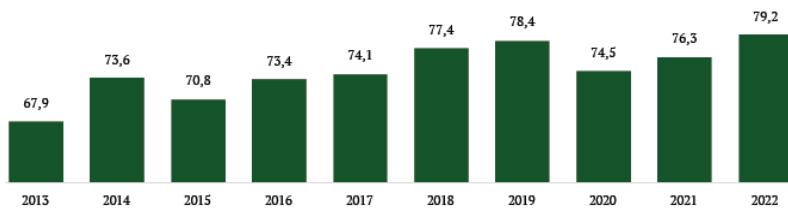


Рис. 2. Количество пожаров, потушенных в день возникновения (% от общего числа) [Государственный..., 2024]

Fig. 2. Amount of forest fires suppressed on the day of occurrence (% of total number)

В целом, анализируя динамику, мы видим, что оперативность реагирования на лесные пожары находится на достаточно высоком уровне (79,25% в 2022 году), но, учитывая ежегодные площади, охваченные огнем (3240,5 тыс. га по итогам 2022 г.), этого недостаточно. Даже небольшой лесной пожар может перекинуться на другие лесные территории и перейти в статус неконтролируемого. Наблюдается положительная динамика реагирования и тушения лесных пожаров в первые сутки после возникновения (с 74,5% в 2020 г. до 79,2%). Наличие лесных пожаров, не потушенных в день возникновения (20,8%), объясняется в основном труднодоступностью лесных территорий, на которых выявлен очаг пожара, и невозможностью оперативно отследить предпожарное задымление.

Материалы и методика исследования. В статье применены методы сравнительного, табличного анализа. Использовались методы сравнения и нормирования технических характеристик лесопожарных машин и механизмов при выполнении полевых работ. Применялась методика расчета технико-экономического обоснования использования тракторной и колесной техники при производстве профилактических и лесопожарных работ на лесных территориях с расчетом стоимости машино-смен.

Также применялись методы анализа нормативно-правовых актов, в которых отражены правила и нормативы, применяемые при проведении противопожарных работ в лесной отрасли. На законодательном уровне мероприятия по профилактике и тушению лесных пожаров регулируются рядом нормативно-правовых актов, основным из которых выступает приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 161 от 28.03.2014 «Об утверждении видов средств предупреждения и тушения лесных пожаров, нормативов обеспеченности данными средствами лиц, использующих леса, норм наличия средств предупреждения и тушения лесных пожаров при использовании лесов». Все противопожарные мероприятия на лесных землях должны осуществляться в соответствии со статьей 53.1 Лесного кодекса Российской Федерации. В данных актах определены основные типы используемых средств, применяемых в качестве предупреждающих возникновение очага огня и используемых непосредственно при тушении лесных пожаров. Также в представленной нормативно-правовой документации отражены лесопожарные нормативы, определяющие уровень обеспеченности необходимыми средствами пожаротушения, привлекаемым численным составом, используемыми на лесных территориях лесопожарными машинами и механизмами.

Результаты исследования. Применение необходимых мер должно в первую очередь основываться на исследованиях в области осуществления контроля за лесными территориями и разработки соответствующих охранных мероприятий. Контроль за пожарной безопасностью на лесных территориях основывается на проведении комплекса противопожарных мероприятий, позволяющих обеспечить профилактику и возможность оперативного реагирования на возникновение лесного пожара (рис. 3).



Рис. 3. Модель протекания основных мероприятий по профилактике и тушению лесных пожаров

Fig. 3. A set of basic measures for the prevention and extinguishing of forest fires

Для предотвращения возникновения лесных пожаров необходимо осуществлять комплекс профилактических мер, направленных на снижение возможности перехода огня и дальнейшего его распространения по лесным территориям. Как показывает практика, наиболее эффективным способом является прокладка лесных противопожарных минерализованных полос и барьеров, которые снижают риски перехода лесного пожара на новые территории. Эти мероприятия в основном предотвращают низовые лесные пожары, которые возникают из-за различных факторов, в том

числе поджога, выброшенного окурка и т. д. Лесные территории (преимущественно Уральского, Сибирского, Дальневосточного, Северо-Западного федеральных округов) характеризуются трудностью проведения конкретных профилактических противопожарных мер. Это вызвано тем, что техника на колесном ходу не всегда имеет доступ к необходимому участку леса, а направлять технику на гусеничном ходу достаточно проблематично из-за существенных расстояний и необходимости дозаправки.

Выявленные проблемы, связанные со сложностью тушения пожаров и труднодоступностью лесных территорий, позволили сделать вывод, что в лесном комплексе на сегодняшний день недостаточно применяются инновационные разработки, которые позволили бы повысить эффективность осуществления мер по профилактике и тушению лесных пожаров. Стоит отметить, что значительная часть лесных пожаров, а именно 20,8%, очаги которых не удалось локализовать в течении первых 24 ч, могут достаточно быстро перерости в крупные лесные пожары. Здесь необходимо оценить основные мероприятия по профилактике лесных пожаров с применением имеющихся машин и механизмов, а также проанализировать имеющиеся инновационные разработки в этом направлении.

В первую очередь стоит уделить внимание проводимым работам, применяемым машинам и устройствам, осуществляющим комплекс мероприятий по профилактике возникновения и распространения лесных пожаров. Наиболее распространенным способом является обустройство минерализованных лесных полос [Евдокименко, Иванов, 2017; Дручинин и др., 2020].

Способ профилактики лесных пожаров, основанный на повышении влажности лесных территорий путем проливки границ лесов, позволяет защитить лесные участки от попадания на них источников горения. Увлажнение почвы происходит вдоль дорог и автомагистралей, по границам городов, сел и крупных промышленных предприятий. Минусом данного способа выступает быстрое осушение почвы и возможный недостаток водных ресурсов. При применении химических средств, затрудняющих процесс горения, используются материалы, образующие полосы из химической пены для предотвращения распространения пожара [Шур и др., 2018; Зимарин и др., 2021].

Обустройство минерализованных полос как один из способов почвообработки является наиболее простым и оптимальным во многих случаях. В основном оно используется на труднодоступных лесных территориях, где нет доступа к водным источникам. [Малюков и др., 2019; Щербаков и др., 2023].

Основное назначение данного способа профилактики лесных пожаров заключается в задержании огня, распространяющегося при низовых пожарах. Ширина минерализованной полосы может быть различна, рекомендуемая составляет не менее 1,5 м, оптимальная ширина минерализованной полосы для эффективного задержания огня – от 2,5 до 3,5 м. Довольно часто в сфере лесного хозяйства применяются различные противопожарные устройства. В частности, хорошо зарекомендовали себя лесные комбинированные плуги ПКЛ-70 и ПЛК-2.0, мульчеры Impulse, Forster. Минерализованная полоса прокладывается на открытом грунте с использованием специальной техники. В основном используется тяжелая техника на базе тракторов МТЗ 82, ДТ-75 в сцепке с соответствующим устройством (лесной плуг, лесопожарный грунтомет, мульчер). Может применяться бульдозер Т-150 (рис. 4).



Рис. 4. Механизированные устройства для обустройства минерализованных полос: а) мульчер Impulse; б) мульчер Forster; в) плуг ПКЛ-70; г) ПЛК-2.0

*Fig. 4. Mechanized devices for the arrangement of mineralized strips:
a) mulcher Impulse; b) mulcher Forster; c) forest plough PKL-70; d) PLK-2.0*

Тушение лесных пожаров осуществляется также специализированными пожарными цистернами, разработанными для труднодоступных лесных

территорий. На сегодняшний день распространеными автопожарными цистернами являются: 1,6-40 (33081) на базе ГАЗ-33081 (4x4), АЦ 3,0-40 (4326)ВЛ на базе КамАЗ-4326-15 (4x4), АЦ 3,0-40 (33086)ВЛ (Л) на базе ГАЗ-33086 (4x4). Скорость тушения лесного пожара тем или иным устройством зависит от ряда факторов. Одним из них выступает проведение профилактических противопожарных мероприятий, следующим можно отметить труднодоступность лесных территорий и время, за которое прибывает пожарный расчет [Драпалюк и др., 2020; Podolskaia, 2023].

Учитывая, что в классических литературных источниках 1 мото-час на холостом ходу приравнивается к 60 минутам, при проведении профилактических работ и осуществлении тушения лесных пожаров 1 мото-час приравнивается к 40 минутам. Необходимо учитывать факторную составляющую, т.к. при тушении лесных пожаров возможно влияние сложности ландшафтных условий и характера местности, а также возможности доступа людей и пожарной техники к очагу пожара.

В исследовании на основе необходимых расчетов по результатам анализа применения противопожарных машин и механизмов были определены максимально возможные условия использования лесопожарной техники. Стоит учитывать, что пожарная техника на основе автоцистерн имеет ограниченный объем от 1000 до 3000 л воды, и во многих случаях вблизи лесных пожаров источники водных ресурсов отсутствуют.

В то же время лесопожарным машинам и устройствам, осуществляющим работу без воды, требуется только топливо, что позволяет обеспечивать их непрерывную работу в зоне лесных пожаров. В среднем одно лесопожарное устройство может работать 12 – 13 ч в сутки. При слабой скорости распространения лесного пожара коэффициент не меняется, при средней скорости коэффициент составляет 1,3, при сильной скорости лесного пожара значение умножается на коэффициент интенсивности 1,5 [Drapalyuk et al., 2019].

В табл. 1 представлена характеристика лесопожарных машин и механизмов, оптимизированных под лесное хозяйство, с характеристикой их возможной выработки при противопожарных работах.

Рассматривая типовые и давно зарекомендовавшие себя при профилактике и тушении лесных пожаров машины и механизмы, можно отметить, что каждое устройство или машина уникальны, выполняют свои функции исключительно под конкретный вид работ и в определенных территориальных условиях. Например, плуги и мульчевые установки при прокладке минерализованных полос, с соответствующей функцией, работают только в сцепке с трактором и экскаватором на колесном ходу.

Трактора на колесном ходу по различным характеристикам достаточно проходимы, но все-таки их возможности ограничены. Наибольшие преимущества на труднодоступных лесных территориях может продемонстрировать техника на гусеничном ходу, скорость которой значительно ниже, чем у колесных тракторов, и которой требуется подвоз топлива к месту работы, что в сложных пожароопасных условиях затруднительно.

Таблица 1

Характеристика лесопожарных машин и механизмов, оптимизированных под лесное хозяйство (типовые разработки), м/ч, сутки

Characteristics of forest fire fighting vehicles and mechanisms optimized for forestry (typical developments), m/h, per day

Наименование лесопожарных работ	Вид используемого средства пожаротушения	Особенности	Скорость возрастания лесного пожара		
			Слабая	Средняя	Сильная
В сцепке с тракторами и бульдозерами					
Профилактика и тушение лесных пожаров без воды	Плуг ПКЛ-70, ПЛК-2.0	Обустройство противопожарных минерализованных полос	5,2–6,0	6,4–7,1	7,5–8,1
	Мульчер Impulse, Forster	Агрегатируются исключительно на экскаватор	4,8–5,9	6,3–7,2	7,6–8,9
	Трактор МТЗ 82, ДТ-75, Т-150К	Возможность осуществлять прицепку практически любых устройств	5,0–6,1	6,2–6,9	7,2–8,7
	Бульдозер Т-150	Хорошая проходимость на труднодоступных лесных участках	6,3–7,4	7,4–7,9	8,2–9,1
Механизированный способ (собственный ход)					
Профилактика и тушение лесных пожаров с использованием водных ресурсов	Лесопожарная автоцистерна АЦ 1,6-40(33081)ВЛ; АЦ 3,0-40(4326)ВЛ; АЦ 3,0-40 (33086)ВЛ (Л)	Тушение лесного пожара водой в виде мелкодисперсного распыла Использование пеногенераторов при тушении лесных пожаров	7,9–9,1	8,9–10,9	11,3–12,6

В то же время лесопожарные автоцистерны, разработанные именно для тушения лесных пожаров, отличаются повышенными характеристиками проходимости, усиленными элементами конструкции кузова и увеличенными топливными баками. Однако для пожарных автоцистерн также необходимы дороги, которые не всегда доступны при подъезде к очагу возгорания и водоему или отсутствуют вообще.

Наибольший успех в этом направлении можно достичь в кооперации с научными и образовательными учреждениями по разработке инновационных машин и механизмов. Инновационными разработками в направлении профилактики и тушения лесных пожаров занимаются профильные ВУЗы, НИИ, конструкторские отделы на производственных машиностроительных предприятиях [Шанин, Лысыч, 2018]. Рассмотрим основные инновационные разработки в области профилактики и тушения лесных пожаров, которые уже прошли полевые испытания и для которых имеются опытные, готовые к эксплуатации образцы (табл. 2).

Для профилактики и тушения лесных пожаров существуют научные разработки, но в ряде случаев они так и не нашли свое место в производственной цепочке, оставшись в виде макетов и патентов или одного опытного «недвижимого» образца. Тем не менее, часть научных разработок дорабатывается, и на регулярной основе проводятся соответствующие испытания.

Анализируя научные разработки и инновационные средства лесного пожаротушения, можно отметить лесопожарный грунтомет, разработанный учеными из ВГЛТУ. Данное устройство можно назвать уникальным, т.к. выполняются сразу 2 функции – обустраиваются противопожарные полосы и осуществляется тушение лесного пожара земляным грунтом. Первые наработки по данному устройству были сделаны в 2012 г. Бартеневым И.М., Драпалюком М.В., Гончаровым П.Э., Дручининым Д.Ю. Изначально лесопожарный грунтомет был представлен как полосопрокладыватель, который мог работать, осуществляя отсыпку грунта лишь по кромке пожара и на легких почвах, при движении только по дорогам. Этого оказалось недостаточно, т.к. необходимо было усовершенствовать устройство до применения на всех видах почв [Бартенев и др., 2012; Есков и др., 2018].

В современных научных исследованиях данное устройство представлено как лесопожарный грунтомет-полосопрокладыватель с улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками (рис. 5).

Таблица 2

**Характеристика лесопожарных машин и механизмов,
оптимизированных под лесное хозяйство
(научные разработки ВУЗов, производственных предприятий)**

**Characteristics of forest fire fighting machines and mechanisms optimized
for forestry (scientific developments of universities, manufacturing enterprises)**

Наименование лесопожарных работ	Вид используемого средства пожаротушения	Особенности	Скорость возрастаания лесного пожара		
			Сла-бая	Сред-няя	Силь-ная
Профилактика и тушение лесных пожаров без воды	Лесопожарный грунтомет (Разработка ученых ВГЛТУ)	Прицепное устройство с трактором Т-150К	10,3	13,4	15,4
Тушение лесных пожаров с водой	Мобильный комплекс для тушения лесных пожаров (разработка ведущих и молодых ученых ПетрГУ)	Монтируется только в грузовой отсек форвардера	7,1	9,2	10,6
Профилактика лесных пожаров	«Машина противопожарных барьеров» (МПБ)	Полностью автономная машина, на колесном ходу, на шасси КАМАЗ 43118	9,1	11,8	13,7
Профилактика и предотвращение лесных пожаров	Гусеничный пожарный вездеход ГАЗ-34039 (Снегоболотоход ТГ-126-01 «Росомаха»)	Автономный вездеход на гусеничном ходу, на базе снегоболотохода ТГ-126-01 «Росомаха» в сочетании с гидравлическим плугом ПДП-1.2	8,3	10,8	12,4
Доставка людей и пожарных устройств к труднодоступному месту лесного пожара	Колесный вездеход АГ-30 с бескамерными шинами низкого давления	Предназначен для субъектов лесного хозяйства и лесной промышленности, оборудован современными мультимедийными и инновационными системами	13,0	16,9	19,5
Профилактика и предотвращение лесных пожаров	Автономный передвижной мобильный комплекс управления тушением лесных пожаров	Выявление очагов возгорания лесных пожаров и контроль дальнейшего распространения пожаров, обеспечение связи	13,0	16,9	19,5



Рис. 5. Лесопожарный грунтотем-полосопрокладыватель с улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками

Fig. 5. Forest fire soil thrower-strip layer with improved technical and operational characteristics

Так, в трудах Позднякова А.К., Петкова А.Ф., Гнусова М.А. можно увидеть результаты испытаний улучшенного лесопожарного грунтотем-полосопрокладывателя, где в его устройство внедрены фрезы-метатели, движение которых осуществляется непосредственно приводом отбора мощности ведущего трактора. Основная функция по рыхлению почвы осуществляется двумя усиленными сферическими дисками, которые образуют необходимую массу почвенного вала. Улучшенная модификация грунтотема-полосопрокладывателя может осуществлять эффективную работу на различных видах почв. Таким образом, с помощью данного устройства можно осуществлять прокладку минерализованных полос практически на всех видах почв и тушение лесного пожара грунтом, без использования водных ресурсов [Драпалюк и др., 2020; Малюков и др., 2022]. Преимуществом данного грунтотема выступает возможность его монтирования практически на любой трактор или бульдозер.

Еще одной инновационной разработкой ученых из ВУЗовской среды выступает мобильный комплекс для тушения лесных пожаров, разработанный ведущими и молодыми учеными опорного университета «Петрозаводский государственный университет». Данный комплекс представлен в виде модуля, который устанавливается преимущественно на колесный форвардер. Представленный противопожарный модуль имеет достаточно несложную конструкцию, которая состоит из платформы с необходимым оборудованием. Далее осуществляется установка в грузовой отсек форвардера. К основным техническим устройствам усовершенствованного мобильного лесопожарного комплекса можно отнести: гидролинию, лафетный ствол, насосную установку, емкость для жидкого огнетушащего вещества (рис. 6).



Рис. 6. Усовершенствованный мобильный комплекс для тушения лесных пожаров (разработка ведущих и молодых ученых ПетрГУ)

Fig. 6. Mobile complex for extinguishing forest fires (developed by leading and young scientists of PetrSU)

Использование мобильного комплекса петрозаводских ученых [Скобцов и др., 2023а] ориентировано в первую очередь на оперативное реагирование при возникновении лесных пожаров на труднодоступных лесных территориях. Еще одним преимуществом данного мобильного противопожарного комплекса следует считать возможность дистанционного управления его огнетушащим веществом и водой механизатором форвардера [Скобцов и др., 2023б].

Создателем комплекса выступила группа ученых во главе с профессором Скобцовым И.Г. Изначально предполагалось, что разрабатываемый противопожарный комплекс может устанавливаться на форвардер или иную трелевочную машину манипуляторного типа со схожими характеристиками [Скобцов и др., 2023с].

К недостаткам использования данного мобильного комплекса можно отнести возможность его применения только на форвардерах. На территории РФ форвардеры не производятся, для запуска комплекса в серийное производство потребуется поиск необходимых модификаций форвардеров из дружественных стран. В то же время испытание разработки ученых ПетрГУ проводилось совместно с белорусским предприятием по производству лесозаготовительной техники. На сегодняшний день лесозаготовители обратили внимание на лесозаготовительную технику из Китая, но она еще как следует не опробована в различных условиях. Следует отметить, что и стоимость форвардера довольно высока. Тушением лесных пожаров

занимаются ведомства, относящиеся к государственным, региональным и муниципальным органам власти. В основном тушение лесных пожаров, обустройство минерализованных полос и противопожарных разрывов осуществляется на базе тракторов и бульдозеров, стоимость которых в разы дешевле нового форвардера.

Поэтому по универсальности применения преимущество получает лесопожарный грунтотем, который доставляется на место вблизи очага возникновения лесного пожара. Затем осуществляется сцепка грунтотема с трактором или бульдозером и начинается его работа [Малюков и др., 2023].

В существующих санкционных и кризисных условиях экономики машиностроительные предприятия испытывают сложности при производстве промышленной продукции. Прежде всего, они вынуждены искать новых поставщиков комплектующих взамен санкционных и ушедших с российского промышленного рынка комплектующих. Но и в этих условиях предприятиям удается осваивать и выпускать новые виды машиностроительной продукции. Многим машиностроительным предприятиям выпускать новую товарную продукцию удается только за счет перспективных инновационных решений, которые должны быть направлены на решение социальных и экологических задач.

В качестве инновационного решения, направленного на профилактику и эффективное тушение лесных пожаров, можно отметить инновационную разработку «Машина противопожарных барьеров» (МПБ). Данное техническое решение разрабатывалось силами Галичского автокранового завода с консультацией с учеными в соответствующей научной области.

Разработанная машина по своим техническим характеристикам может осуществлять обустройство трех видов противопожарных минерализованных полос в соответствии с необходимым уровнем углубления рабочего органа, который осуществляет свою работу как цепное устройство. Можно отметить универсальность данной машины, в функции которой входит еще и возможность рытья противопожарных лесных траншей, и при необходимости, в зависимости от пожароопасных условий, обустройство дренажных полос насыпного грунта.

Немаловажными являются достаточно высокая скорость передвижения в сравнении с другими машинами (в основном тракторами и бульдозерами), а также возможность дистанционного управления МПБ при осуществлении противопожарных работ вблизи очагов лесных пожаров. Главная цель применения машины противопожарных барьеров заключается в профилактике лесных пожаров и недопущении перехода лесного пожара на гражданские и военные объекты. Пока представленная машина находится в виде макета.

В 2022 г. Иркутским заводом гусеничной техники были представлены две новые модели вездеходных транспортных средств. Представленные разработки специально сконструированы для труднодоступных территорий, в том числе лесных. Одна из них – это модернизированный вездеход на гусеничном ходу (гусеничный пожарный вездеход ГАЗ-34039 – снегоболотоход ТГ-126-01 «Росомаха»), который соответствует современному уровню предпочтений потенциальных заказчиков, предприятий и организаций в сфере лесной промышленности, а также бюджетных структур лесного хозяйства в регионах. Вездеход предназначен для лесовосстановительных работ, а также локализации и профилактики тушения лесных пожаров в труднодоступных местах, куда не доедет колесная техника. Уникальным преимуществом данного вездехода выступает наличие в структуре машины гидравлического плуга ПДП-1.2, с помощью которого осуществляется прокладка противопожарных лесных минерализованных полос. По сути, данная модель состоит из гидравлического плуга и гусеничного снегоболотохода ТГ-126-01 «Росомаха» (рис. 7).



Рис. 7. Гусеничный пожарный вездеход ГАЗ-34039
(Снегоболотоход ТГ-126-01 «Росомаха»)

Fig. 7. GAZ-34039 tracked all-terrain fire vehicle
(TG-126-01 «Wolverine» snow and swamp vehicle)

Можно отметить достаточную прочность данной конструкции вездехода, в основе которой используется усиленная задняя сторона с навеской от трактора МТЗ-82. Управление плугом осуществляется рычагами из кабины водителя. На задней стенке корпуса вездехода расположена цифровая камера, которая обеспечивает эффективную работу устройства. Конструкция вездехода носит инновационный характер и соответствует всем необходимым современным требованиям при осуществлении работ в лесном хозяйстве. Корпус вездехода выполнен из усиленного металла по толщине от 3 до 6 мм, имеет запатентованную защиту ленивцевого механизма от возможного выгиба при ударах и торсионную усиленную подвеску. На передней

части корпуса установлены электромеханические лебедка и оптика с защитными дугами, применяются светодиодные передние и задние фонари, что значительно улучшает обзор в темное время суток и в дымных и туманных условиях. При этом вездеход может перевозить до 12 человек с необходимым противопожарным лесным оборудованием. Вездеход запущен в серийное производство и доступен к покупке, существует возможность оснащения дополнительным оборудованием по желанию заказчика.

Еще одна модель научной разработки Иркутского завода гусеничной техники представлена уже на колесной базе с бескамерными шинами низкого давления в виде колесного вездехода АГ-30, который предназначен именно для субъектов лесного хозяйства и лесной промышленности. В основном он обеспечивает перевозку по труднодоступной лесной местности людей (до 8 человек) и необходимого противопожарного оборудования (рис. 8).



Рис. 8. Колесный вездеход АГ-30 с бескамерными шинами низкого давления, предназначен для субъектов лесного хозяйства и лесной промышленности

Fig. 8. Wheeled all-terrain vehicle AG-30 with low-pressure tubeless tires, intended for forestry and forest industry entities

Новизна данного вездехода состоит в улучшенных тепло- и шумоизоляции с применением современных и инновационных негорючих материалов, кожаной отделке передних сидений, подсветке салона на основе двух режимов контурного освещения. На данной модели отсутствуют зеркала заднего вида, которым пришли на замену широкоугольные цифровые камеры HD класса. Цифровая приборная панель, в которой отображены все необходимые индикации, интегрирована в руль, выполненный в виде штурвала с кожаной оплеткой. В верхней части на консоли представлена современная сенсорная мультимедийная система с возможностью управления агрегатируемой лебедкой и водооткачивающими помпами-насосами, счетчиком моточасов.

В качестве еще одной инновационной разработки можно отметить разработку совместного проекта ученых Сибирского государственного университета науки и технологии им. академика М.Ф. Решетнёва и Сибирского Федерального университета с индустриальным партнером АО НПП «Радиосвязь». Учеными представлена отечественная разработка в виде новейшего и не имеющего аналогов автономного передвижного мобильного комплекса управления тушением лесных пожаров (рис. 9).



Рис. 9. Разработка сибирских ученых «Автономный передвижной мобильный комплекс управления тушением лесных пожаров (АМФКУТЛП)»

Fig. 9. Invention of Siberian scientists «Autonomous mobile forest fire extinguishing control complex (AMFCUCTC)»

Мобильный противопожарный лесной комплекс предназначается для работы в труднодоступных и сложных климатических условиях, где отсутствуют каналы наземной и цифровой связи. Комплекс состоит из основной передвижной базы марки «Камаз», оснащается автономным источником радиосвязи и спутниковой связи в сочетании с беспилотным летательным аппаратом. На данный момент осуществляется опытная эксплуатация представленного комплекса в некоторых районах Красноярского края. С помощью передвижного мобильного комплекса возможно осуществить выявление очагов возгорания лесных пожаров и контролировать дальнейшее распространение пожаров [Шинкаренко и др., 2021; Шайтура и др., 2024].

Кризисные и санкционные условия определили переход всего промышленного комплекса на импортозамещающую продукцию. Интерес в соответствующем направлении проявляется и в лесном хозяйстве при профилактике и тушении лесных пожаров. Лесопромышленники и лесохозяйственники, а также государственные и муниципальные структуры рассматривают возможность приобретения и применения новейших отечественных разработок в данной области. Как было отмечено ранее, существует достаточное количество научных разработок, но далеко не все они готовы к эксплуатации, часть существует только в виде макетов и результатов интеллектуальной деятельности в виде различных моделей.

Обустройство противопожарной минерализованной полосы – достаточно трудоёмкий и финансово затратный процесс, требующий определённых ресурсов при создании и дальнейшем уходе за полосой. К ресурсам относят механические устройства и технику, человеческие ресурсы, топливо и необходимые материалы. Значительную часть расходов при обустройстве противопожарной минерализованной полосы составляют оплата труда работников, непосредственно осуществляющих полевые работы, затраты на ГСМ, расходы на текущий ремонт и проведение технического обслуживания [Попиков и др., 2017].

Изначально вся техника и механические устройства ставятся эксплуатирующей организацией на баланс, после этого ежегодно начисляются амортизационные отчисления для основных средств (тракторная техника и механические средства). ГСМ списываются по фактической себестоимости после выработки машинами и механизмами. Расчет необходимых трудозатрат рассчитывается в человеко-днях [Shanin et al., 2018].

Как было отмечено ранее, для обустройства противопожарной минерализованной полосы требуется тракторная техника (МТЗ 82, ДТ-75) с плугом (ПКЛ-70 или ПЛК-2.0) или экскаватор тракторного типа с мульчерной установкой (Impulse или Forster) [Чепелев, Орловский, 2022].

Как показывает практика, необходимая минимальная ширина противопожарной минерализованной полосы должна составлять не менее 1,5 м. Оптимальным условием для эффективной профилактики тушения лесных пожаров являются противопожарные полосы шириной 2–3 м, которые предотвращают перекидывание огня. Учитывая, что по рабочим характеристикам плуги могут за один проезд прокладывать минерализованную полосу шириной до 1,3 м, возьмем за необходимые расчеты 2 проходные линии (2,6 метра). Экскаватор, агрегатируемый с мульчерной установкой, может осуществлять обустройство 0,85 м противопожарной минерализованной полосы за один проход, соответственно, для обустройства противопожарной полосы требуется осуществить 3 прохода экскаватора с мульчером для обеспечения ширины полосы в 2,55 м при годовой загрузке в 130 дней.

В табл. 3 приведены основные результаты расчетов экономической эффективности по стандартным методиками оценки необходимых затрат, осуществляемых при проведении комплекса работ по профилактике и тушению лесных пожаров [Шанин, 2021].

Таблица 3

**Расчет экономической эффективности использования
типовых средства профилактики и тушения лесных пожаров**

**Calculation of the economic efficiency of using typical means of preventing
and extinguishing forest fires**

Показатели / Наименование техники	МТЗ 82	ДТ-75	ЛП ПКЛ-70	ЛП ПЛК-2.0	МТЗ 82 «Э»	Мульч. Impulse	Мульч. Forster
Балансовая стоимость при первичной постановке на учет, тыс. р.	2490,0	3120,0	149,0	157,8	4007,2	1950,0	2 690,0
Срок полезного использования, мес.	144	144	84	84	120	96	96
Норма амортизации (годовая), %	8,33	8,33	14,29	14,29	10,00	12,50	12,50
Амортизационные отчисления в год, тыс. р.	207,5	260,0	21,29	22,54	400,72	243,75	336,25
Норма отчислений на текущий ремонт и ТО, тыс. р.	80,93	101,4	8,30	8,79	156,28	95,06	131,14
ГСМ и расходные материалы, тыс. р.	112,1	140,4	11,49	12,17	216,39	131,63	181,58
Прочие текущие расходы при проведении полевых работ, тыс. р.	24,90	31,20	2,55	2,71	48,09	29,25	40,35
Итого машино-смен, тыс. р., в год	425,4	533,0	43,64	46,21	821,48	499,69	689,31

Как видно из табл. 3, наиболее затратными в эксплуатации будут мульчерные установки с функцией среза грунта в сцепке с экскаваторным трактором МТЗ 82, где общая сумма затрат на эксплуатацию данного трактора, включая амортизационные отчисления и топливо, составит 821,5 тыс. р. в год, что значительно дороже типовых МТЗ 82 (425,3 тыс. р. в год) и гусеничного ДТ-75 (533 тыс. р. в год). Также стоит учитывать эксплуатацию прицепных устройств. Стоимость машино-смен при использовании лесопожарного плуга ПКЛ-70 составит 43,6 тыс. р., лесопожарного плуга ПЛК-2.0 – 46,2 тыс. р. Рассматривая возможность обустройства противопожарных лесных полос мульчерными установками, можно заметить, что стоимость машино-смен при их использовании значительно превышает стандартные плуги. Это в первую очередь связано с дороговизной данных моделей, которые поставляются исключительно из-за рубежа. В то же время данные механизмы требуют более тщательного ремонта и подбора запчастей; очистка территории и срезание грунта при прокладке минерализованных полос осуществляется в 3 прохода.

Современные лесозаготовительные предприятия и субъекты лесного хозяйства в последнее время обращают внимание на инновационные разработки, которые могут быть применены в различных пожароопасных условиях. Инновационные разработки ученых в кооперации с промышленниками позиционируются более устойчивыми к механическим нагрузкам и имеющими повышенный срок эксплуатации. В табл. 4 представлены результаты расчета экономической эффективности использования инновационных технических средств при профилактике и тушении лесных пожаров. Стоимость некоторых образцов определялась исходя из стоимости используемой базы и примерной стоимости агрегатируемого оборудования по состоянию на 01 сентября 2024 г.

Наиболее оптимальными инновационными техническими средствами при профилактике и тушении лесных пожаров могут быть устройства, осуществляющие обустройство противопожарных лесных полос и одновременно тушение лесных пожаров. К этому типу устройств можно отнести лесопожарный грунтомет, разработанный учеными ВГЛТУ, который осуществляет тушение пожаров почвенным грунтом. При среднем уровне интенсивности работ в 130 дней в год стоимость машино-смен в сцепке с трактором Т-150К или его усовершенствованной модификации ХТА 200 составит 1696,8 тыс. р. в год. В то же время не всегда целесообразно тушить лесной пожар грунтом, необходимо использование водных ресурсов. Здесь больше подходит использование хорошо зарекомендовавших себя на лесных территориях технических решений на базе проходящих в трудно-

доступных местах форвардеров, а именно разработанный учеными ПетрГУ «Мобильный комплекс для тушения лесных пожаров». На форвардер для большей проходимости навешиваются цепи или гусеницы, что обеспечивает тушение лесного пожара водой в труднодоступных местах. Ежегодная стоимость машино-смен может составить 3726,9 тыс. р. в год, но стоит учитывать скорость передвижения при тушении лесных пожаров, около 26,5 км/час, что в сравнении с тракторами является преимуществом.

Таблица 4

Экономическая эффективность использования инновационных технических средств при профилактике и тушении лесных пожаров

**Economic efficiency of using innovative technical means
in forest fire prevention and extinguishing**

	Применение лесопожарного грунтомета (ЛГ)*		Применение МКТЛП* (Форвардер (Ам-кодор 2662-01))		МПБ*	ТГ-126-01 «Росомаха»	Колес-ный вез-деход АГ-30	АПМК УТЛП
	Трактор Т-150К	ЛГ	Фор-вардер	МКТЛП				
Балансовая стоимость при первичной постановке на учет, тыс. р.	8500,7	1193,0	24700,0	1370,5	15975,0	7800,0	9386,0	13250,0
Срок полезного использования, мес.	144	120	180	96	144	120	120	156
Норма амортизации (годовая), %	8,33	10,00	6,67	12,50	8,33	10,00	10,00	7,6
Амортизационные отчисления в год, тыс. р.	708,39	119,30	1646,7	171,3	1331,3	780,0	938,6	1019,2
Норма отчислений на текущий ремонт и ТО, тыс. р.	276,3	46,5	642,2	66,8	519,2	304,2	366,1	397,5
ГСМ и расходные материалы, тыс. р.	382,5	64,4	889,2	92,5	718,9	421,2	506,8	550,4
Прочие текущие расходы при проведении полевых работ, тыс. р.	85,0	14,3	197,6	20,5	159,8	93,6	112,6	122,3
Итого машино-смен, тыс. р. в год	1452,2	244,5	3375,7	351,2	2729,1	1599,0	1924,1	2089,4
Итого машино-смен применения всех ИУ, тыс. р. в год	1696,8		3726,9		13765,2 (Итого все устройства, машины и механизмы)			

Промышленные предприятия также разрабатывают инновационные технические решения в области профилактики и тушения лесных пожаров. Среди них можно отметить перспективную разработку на базе КамАЗ-43118 «Машина противопожарных барьеров» (МПБ) с интеграцией в конструкцию к действующей колесной базе гусеничного шасси. Стоимость машино-смен в год при эксплуатации такой машины может составить 2729,1 тыс. р. в год, при примерной скорости выполнения противопожарных работ в 31 км/ч, что также является преимуществом перед использованием тяжелой техники.

При использовании вездехода «Россомаха» стоимость его эксплуатации в год составит 1599 тыс. р. Колесный вездеход АГ-30 отличается хорошей проходимостью и может обеспечивать передвижение по болотистым местам, стоимость машино-смен данного вездехода составляет 1924,1 тыс. р. в год.

Для решения проблем, связанных с обеспечением связи при профилактике и тушении лесных пожаров, возможно применение автономного передвижного мобильного комплекса управления тушением лесных пожаров (АПМКУТЛП), который позволит обеспечить устойчивую наземную и спутниковую связь.

Обсуждение. Проанализировав и оценив основные механические и транспортные средства, применяемые при профилактике и тушении лесных пожаров, можно сделать вывод, что невозможно выделить какое-либо устройство или машину, позволяющую в отдельности выполнять задачи по предотвращению и тушению пожаров. Каждый вид техники имеет свои преимущества и недостатки. Типовые машины и противопожарные устройства используются достаточно длительный период времени, но принцип их работы ограничен по функциональному назначению. Имеющиеся инновационные технические решения, готовые к постановке в производство и выпускаемые мелкими сериями, также характеризуются рядом преимуществ, которые не обеспечивают типовые противопожарные средства.

При обустройстве противопожарных лесных полос требуется высокая скорость их построения с поддержанием необходимой ширины и глубины. В то же время требуется одновременная уборка сухой растительности путем перемалывания в щепу и перемешивания с верхним слоем грунта. Здесь наиболее эффективны лесные мульчерные установки, агрегатируемые на тракторный экскаватор. При проведении работ по недопущению распространения лесного пожара в качестве эффективного устройства

можно отметить лесопожарный грунтомет, засыпающий огонь верхним слоем почвенного грунта и способный параллельно прокладывать противопожарные полосы. В условиях плотной лесистости и верховых пожаров наиболее оптимальным будет применение мобильного комплекса для тушения лесных пожаров (МКТЛП) водой, запасы которой находятся в прицепном устройстве. Здесь же будет эффективным применение колесного вездехода АГ-30, способного обеспечить доставку лесных пожарных для тушения пожара ручным способом.

Заключение. В условиях осуществления оптимальных противопожарных профилактических мер и необходимости повышения эффективности тушения лесных пожаров следует осуществлять применение комплексного подхода, при котором параллельно используются все имеющиеся виды противопожарной техники. Только при сочетании применения типовых противопожарных устройств и новых научных разработок появится возможность повышения уровня эффективности противопожарных работ на лесных территориях и снижения гибели лесных ресурсов.

Субъектам лесного хозяйства и лесозаготовительным предприятиям необходимо осуществлять более тесное взаимодействие с ВУЗами и НИИ, разрабатывающими инновационные технологические решения, направленные на минимизацию влияния лесных пожаров на лесные территории и окружающую среду.

Сведения о финансировании исследования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-28-01856, <https://rscf.ru/project/23-28-01856/>.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Бартенев И.М., Драпалюк М.В., Гончаров П.Э., Гнусов М.А., Тамби А.А., Клубничкин В.Е. Комбинированный лесопожарный грунтомет и рекомендации по его применению // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2012. № 84. С. 174–184.

Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2022_/ (дата обращения: 07.08.2024).

Драпалюк М.В., Бартенев И.М., Гнусов М.А., Дручинин Д.Ю., Князев А.В. Математическая модель комбинированного грунтомета-полосопрокладывателя // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 4 (48). С. 97–106.

Дручинин Д.Ю., Гнусов М.А., Малюков С.В., Четверикова И.В. Особенности противопожарного обустройства лесов в Российской Федерации // Resources and Technology. 2020. Т. 17, № 2. С. 80–96.

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

Есков Д.В., Внуков Е.В., Ескова В.С. Грунтотематальная машина и технология для борьбы с лесными пожарами // Актуальные направления научных исследований ХХI века: теория и практика. 2018. Т. 6, № 4 (40). С. 155–159.

Зимарин С.В., Гнусов М.А., Попиков В.П., Шерстюков Н.А. Результаты экспериментальных исследований режимов работы лесопожарного полосопрокладывателя с гидроприводом вырезных дисковых рабочих органов // Лесотехнический журнал. 2021. Т. 11, № 1 (41). С. 155–162.

Малюков С.В., Панявина Е.А., Аксенов А.А. Анализ конструкций мульчеров и ротоваторов // Лесотехнический журнал. 2019. Т. 9, № 1 (33). С. 159–167.

Малюков С.В., Поздняков Е.В., Дегтярева С.И., Шавков М.В., Малюкова М.А., Шанин И.И., Арико С.Е. Эксплуатация почвообрабатывающих орудий в условиях нераскорчеванных вырубок европейской части России: анализ препятствий в виде пней и корней // Лесотехнический журнал. 2022. Т. 12, № 4 (48). С. 96–113.

Малюков С.В., Поздняков Е.В., Шавков М.В., Петков А.Ф., Шанин И.И., Болгов А.В. Анализ современных конструкций комбинированных почвообрабатывающих машин и агрегатов // Известия Нижневолжского агрониверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2023. № 2 (70). С. 523–534.

Попиков П.И., Дручинин Д.Ю., Коротких В.Н., Зимарин С.В., Шерстюков Н.А., Ступников Д.С. Моделирование процесса взаимодействия лесного дискового плуга с почвой при создании противопожарных полос // Resources and Technology. 2017. Т. 14, № 4. С. 17–31.

Скобцов И.Г., Галактионов О.Н., Клюев Г.В., Бошаков И.С. Компоновочная схема установки для пожаротушения на базе форвардера «Амкодор» // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2023а. № 63. С. 333–335.

Скобцов И.Г., Галактионов О.Н., Сапанкевич П.А. Интеграция дистанционно управляемых лафетных стволов в состав мобильного комплекса на базе форвардера для борьбы с лесными пожарами // Повышение эффективности лесного комплекса: мат. Девятой Всерос. нац. науч.-практ. конф. с междунар. уч. Петрозаводск, 2023б. С. 157–159.

Скобцов И.Г., Галактионов О.Н., Сулконен М.С. Исследование надёжности модульной системы пожаротушения на базе форвардера Амкодор-2661 // Resources and Technology. 2023с. Т. 20, № 4. С. 74–88.

Чепелев Н.И., Орловский С.Н. Плуг универсальный лесной ПУЛ-2 // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2022. № 4 (27). С. 142–146.

Шайтура С.В., Шайтура Н.С., Митрофанов Е.М., Мухин А.С., Устинов С.М. Применение наземных лазерных сканеров для мониторинга леса // Природоохранные устройства. 2024. № 4. С. 124–132.

Шанин И.И. Методика оценки обеспеченности инновациями на предприятиях и организациях лесопромышленного комплекса // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2021. Т. 9, № 3 (54). С. 130–141.

Шанин И.И., Лысич М.Н. Эффективные орудия и механизированные технические устройства, применяемые при профилактике и тушении лесных пожаров // Успехи современного естествознания. 2018. № 12-2. С. 403–410.

Шинкаренко С.С., Иванов Н.М., Берденгалиева А.Н. Пространственно-временная динамика выгоревших площадей на федеральных ООПТ юго-востока европейской России // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2021. Т. 6, № 3. С. 23–44.

Шур Ю.З., Степченко А.А., Горовая Е.Н., Шаповал Н.В., Шепелёва И.С. Совершенствование противопожарного обустройства лесов Российской Федерации // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2018. № 3-4. С. 54–65.

Щербаков Ю.О., Сало М.А., Иванов А.В. Моделирование запасов древостоев на основе данных спутниковой съемки и релаксационных площадок // Аграрный вестник Приморья. 2023. № 1 (29). С. 73–77.

Drapalyuk M.V., Bezrukova T.L., Shanin I.I., Bezrukov B.A. Methodology of probabilistic modelling of the current activity of industrial enterprises // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1333. Art. no. 072022.

Podolskaia E.S. Remote sensing data from space for road image recognition in the forestry // Forest Science Issues. 2023. Vol. 6, iss. 1. P. 90–104.

Shanin I.I., Shtondin A.A., Bezrukov B.A., Kirillova S.S. Approach to assessment of innovative development of enterprises timber processing complex // Advances in Economics, Business and Management Research. 2018. Vol. 61. P. 183–187.

References

Bartenev I.M., Drapalyuk M.V., Goncharov P.E., Gnusov M.A., Tambi A.A., Klubnickin V.E. Combined forest fire soil thrower and recommendations for its use. *Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University*, 2012, no. 84, pp. 174–184. (In Russ.)

Chepelev N.I., Orlovsky S.N. Universal Forest plow PUL-2. *Siberian fire and rescue bulletin*, 2022, no. 4 (27), pp. 142–146. (In Russ.)

Drapalyuk M.V., Bartenev I.M., Gnusov M.A., Druchinin D.Yu., Knyazev A.V. Mathematical model of a combined soil thrower-strip layer. *Systems. Methods. Technologies*, 2020, no. 4 (48), pp. 97–106. (In Russ.)

Drapalyuk M.V., Bezrukova T.L., Shanin I.I., Bezrukov B.A. Methodology of probabilistic modeling of the current activity of industrial enterprises. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1333, no. 072022.

Druchinin D.Yu., Gnutsov M.A., Malyukov S.V., Chetverikova I.V. Features of fire protection arrangement of forests in the Russian Federation. *Resources and Technology*, 2020, vol. 17, no. 2, pp. 80–96. (In Russ.)

Eskov D.V., Vnukov E.V., Eskova V.S. Soil throwing machine and technology for fighting forest fires. *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2018, vol. 6, no. 4 (40), pp. 155–159. (In Russ.)

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

Malyukov S.V., Panyavina E.A., Aksenov A.A. Analysis of the designs of mulchers and rotovators. *Forest Engineering Journal*, 2019, vol. 9, no. 1 (33), pp. 159–167. (In Russ.)

Malyukov S.V., Pozdnyakov E.V., Degtyareva S.I., Shavkov M.V., Malyukova M.A., Shanin I.I., Arikov S.E. Operation of tillage tools in the conditions of ungrown clearings in the European part of Russia: analysis of obstacles in the form of stumps and roots. *Forest Engineering Journal*, 2022, vol. 12, no. 4 (48), pp. 96–113. (In Russ.)

Malyukov S.V., Pozdnyakov E.V., Shavkov M.V., Petkov A.F., Shanin I.I., Bolgov A.V. Analysis of modern designs of combined tillage machines and units. *News of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education*, 2023, no. 2 (70), pp. 523–534. (In Russ.)

Podolskaia E.S. Remote sensing data from space for road image recognition in the forestry. *Forest Science Issues*, 2023, vol. 6, no. 1, pp. 90–104.

Popikov P.I., Druchinin D.Yu., Korotkikh V.N., Zimarin S.V., Sherstyukov N.A., Stupnikov D.S. Modeling the interaction process of a forestry disc plow with soil when creating firebreaks. *Resources and Technology*, 2017, vol. 14, no. 4, pp. 17–31. (In Russ.)

Shaitura S.V., Shaitura N.S., Mitrofanov E.M., Mukhin A.S., Ustinov S.M. Application of terrestrial laser scanners for forest monitoring. *Nature management*, 2024, no. 4, pp. 124–132. (In Russ.)

Shanin I.I. Methodology for assessing the level of innovation at enterprises and organizations of the forest industry complex. *Actual directions of scientific research of the 21st century: theory and practice*, 2021, vol. 9, No. 3 (54), pp. 130–141. (In Russ.)

Shanin I.I., Lysych M.N. Effective tools and mechanized technical devices used in the prevention and extinguishing of forest fires. *Advances in modern natural science*, 2018, no. 12-2, pp. 403–410. (In Russ.)

Shanin I.I., Shtondin A.A., Bezrukov B.A., Kirillova S.S. Approach to assessment of innovative development of enterprises timber processing complex. *Advances in Economics, Business and Management Research*, 2018, vol. 61, pp. 183–187.

Shcherbakov Yu.O., Salo M.A., Ivanov A.V. Modeling of timber stocks based on satellite imagery and relascopic sites. *Agrarian Bulletin of Primorye*, 2023, no. 1 (29), pp. 73–77. (In Russ.)

Shinkarenko S.S., Ivanov N.M., Berdengalieva A.N. Spatio-temporal dynamics of burnt areas in federal protected areas of the southeast of European Russia. Nature Conservation Research. Reserve science, 2021, vol. 6, no. 3, pp. 23-44. (In Russ.)

Skobtsov I.G., Galaktionov O.N., Klyuev G.V., Boshakov I.S. Layout diagram of a fire extinguishing installation based on the Amkodor Forwarder. Actual problems of the forestry complex, 2023a, no. 63, pp. 333–335. (In Russ.)

Skobtsov I.G., Galaktionov O.N., Sapankovich P.A. Integration of remotely controlled monitor nozzles into a mobile complex based on a forwarder for fighting forest fires. Increasing the efficiency of the forestry complex: proceedings of the Ninth All-Russ. nat. sci.-pract. conf. with int. part. Petrozavodsk, 2023b, pp. 157–159. (In Russ.)

Skobtsov I.G., Galaktionov O.N., Sulkonen M.S. Study of the reliability of a modular fire extinguishing system based on the Amkodor-2661 Forwarder. Resources and Technology, 2023c, vol. 20, no. 4, pp. 74–88. (In Russ.)

Shur Yu.Z., Stepchenko A.A., Gorovaya E.N., Shapoval N.V., Shepeleva I.S. Improving fire protection equipment of forests in the Russian Federation. Proceedings of the St. Petersburg Research Institute of Forestry, 2018, no. 3-4, pp. 54–65. (In Russ.)

Zimarin S.V., Gerasimov M.A., Popikov V.P., Sherstyukov N.A. Results of experimental studies of the operating modes of a forest fire strip paver with a hydraulic drive of cut-out disk working bodies. Forest Engineering Journal, 2021, vol. 11, no. 1 (41), pp. 155–162. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 25.11.2024

Шанин И.И., Штондин А.А. Эффективность применения типовых и инновационных разработок в области профилактики и тушения лесных пожаров // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 292–319. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.292-319

В сфере лесного хозяйства и лесной промышленности при осуществлении эколого-ориентированной и природоохранной деятельности существует определенная заинтересованность в применении эффективных мер по профилактике и тушению лесных пожаров. Ежегодные лесные пожары истощают лесные ресурсы на площади в несколько тысяч гектаров по всей стране. В целях эффективной локализации лесных пожаров и применения новейших, более рациональных мер по их профилактике необходимо осуществлять внедрение соответствующих технологических решений и использовать научные разработки в области инновационных машин и устройств, имеющих улучшенные технические характеристики. В статье представлены результаты анализа динамики лесных пожаров и возможности применения инновационных технических разработок при осуществлении работ в условиях пожароопасной обстановки на лесных территориях. Также представлена сформированная авторская модель протекания основных мероприятий по

профилактике и тушению лесных пожаров, состоящая из трех основных блоков (профилактики, контроля и мониторинга, локализации лесных пожаров). Проведена сравнительная оценка противопожарного механизированного оборудования, на основе которой проанализированы основные характеристики типовых используемых лесопожарных машин и механизмов, выполняющих противопожарные работы в лесном хозяйстве, в сравнении с инновационными техническими средствами при профилактике и тушении лесных пожаров. В статье проведены необходимые расчеты и дана оценка эффективности использования типовых и инновационных технических средств при профилактике и тушении лесных пожаров. По результатам исследования определены наиболее оптимальные и перспективные наземные разработки, как на колесном, гусеничном ходу, так и на бескамерных шинах низкого давления.

Ключевые слова: лесные пожары, минерализованные полосы, противопожарная лесная техника, лесопожарный грунтомет, пожарный вездеход, инновационные технические средства, машино-смены.

Shanin I.I., Shtondin A.A. Efficiency of application of standard and innovative developments in the field of prevention and extinguishing of forest fires. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 292–319 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.292-319

In the field of forestry and forest industry, when implementing environmentally friendly and nature conservation activities, there is a certain interest in the use of effective measures to prevent and extinguish forest fires. Annual forest fires deplete forest resources over an area of several thousand hectares throughout the country. In order to effectively localize forest fires and apply the latest, more rational measures to prevent them, it is necessary to implement appropriate technological solutions and use scientific developments in the field of innovative machines and devices that provide improved and technical characteristics. The article presents the results of the analysis of the dynamics of forest fires and the possibility of using innovative technical developments when carrying out work in fire-hazardous conditions in forest areas. It also presents the formed author's model of the course of the main measures to prevent and extinguish forest fires, consisting of three main blocks (prevention, control and monitoring, localization of forest fires). A comparative assessment of fire-fighting mechanized equipment was carried out, on the basis of which the main characteristics of typical forest fire-fighting machines and mechanisms used for fire-fighting work in forestry were analyzed in comparison with innovative technical means for the prevention and extinguishing of forest fires. The article contains the necessary calculations and an assessment of the efficiency of using typical and innovative technical means for the prevention and extinguishing of forest fires. Based on the results of the study, the most optimal and promising ground-based developments were determined, both on wheels, tracks, and on low-pressure tubeless tires.

К e y w o r d s : forest fires, mineralized strips, forest fire-fighting equipment, forest fire soil thrower, fire all-terrain vehicle, innovative technical means, machine shifts.

ШАНИН Игорь Игоревич – доцент кафедры экономики и финансов Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, кандидат экономических наук. SPIN-код: 4818-8159. ORCID: 0000-0003-4706-9868.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: kingoao@mail.ru

SHANIN Igor I. – PhD (Economical), Associate Professor of the Department of Economics and Finance, Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozova. SPIN-code: 4818-8159. ORCID: 0000-0003-4706-9868.

394087. Timiryazev str. 8. Voronezh. Russian Federation. E-mail: kingoao@mail.ru

ШТОНДИН Анатолий Александрович – доцент кафедры экономики и финансов Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г. Ф. Морозова, кандидат экономических наук. SPIN-код: 3880-7202. ORCID: 0000-0002-9924-2004.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия.

SHTONDIN Anatoly A. – PhD (Economical), Associate Professor of the Department of Economics and Finance, Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozova. SPIN-code: 3880-7202. ORCID: 0000-0002-9924-2004.

394087. Timiryazev str. 8. Voronezh. Russian Federation.

В.В. Сиваков, А.Н. Заикин

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОТЫ
ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН
В УСЛОВИЯХ ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Введение. Лесозаготовительные машины работают в тяжелых условиях. Для повышения эффективности их применения необходимо осуществлять планирование производственного процесса на основе моделирования режимов работы машин с учетом большого количества факторов: времени года, типа почвы, породного состава, объемов заготовки, характеристики хлыстов, дорожной сети, условий трелевки. Немаловажным фактором достижения высокой экономической эффективности техники является оперативный мониторинг состояния узлов и агрегатов машин и своевременное выполнение необходимых корректирующих действий по поддержанию их в рабочем состоянии или ремонта.

Цель работы – проанализировать перспективные направления применения цифровых технологий для повышения эффективности лесозаготовительных машин как в области контроля рабочих процессов, так и в области контроля их технического состояния.

Материалы и методы. В статье приведены основные направления применения цифровых технологий в области влияния на показатели производительности машин конкретных условий работы, а также возможности повышения их эффективности путем применения как дистанционных методов управления машиной, так и искусственного интеллекта, берущего на себя контроль выполнения части рабочих процессов. Проанализированы ряд работ российских и иностранных исследователей, касающиеся вопросов повышения эффективности работы лесозаготовительной техники и организации контроля ее технического состояния.

Анализ. Как показал анализ литературных источников, повышение эффективности лесозаготовительных машин на основе внедрения цифровых технологий является популярным. Так, авторами [Guerra et al., 2024] было проведено исследование лесозаготовительных машин – харвестеров и форвардеров – с целью определения влияния на показатели производительности машин ряда параметров конкретных участков, например, морфологии мест-

ности, типа почвы, состояния влажной почвы и погодных условий. Для повышения эффективности работы данные о производительности машин в автоматическом режиме отправлялись в облачную систему управления парком машин (FMS), при этом интервал обработки данных варьировался от ежечасного, ежедневного, еженедельного до ежемесячного. В результате работы определена целесообразность представления набора данных в виде параметров трех блоков: машина, окружающая среда, климат.

Дальнейшее развитие систем искусственного интеллекта подразумевает создание комплекса лесозаготовительных машин, работающих автономно, без участия человека. Однако на современном этапе достаточно сложно обеспечить такую работу машин в связи с большим разнообразием рельефа местности, деревьев, почвенных и климатических условий, поэтому переходным вариантом работы можно считать возможность дистанционного управления машинами, например, на вывозке леса форвардерами [Lundbäck et al., 2024]. Так, было проведено исследование [Lundbäck et al., 2022] по моделированию автономных перевозок форвардерами с расстоянием транспортировки от 20 до 1500 м с дистанционным управлением во время погрузки и разгрузки. Установлено, что оптимальное количество операторов составляло семь, на десять экспедиторов, что снижает затраты на 7% по сравнению со стандартной вывозкой древесины. При росте расстояния транспортировки более 500 м необходимое количество телекоммуникационных устройств снижается до пяти или шести, потенциальное снижение затрат достигает 15%.

Для изучения возможности удаленного управления лесозаготовительными машинами было проведено исследование [Kim Gyun-Hyung et al., 2021], заключающееся в разработке системы телеуправления лесозаготовительными машинами с использованием изображений с рабочего места оператора. Для передачи изображения с видеокамер, установленных на лесозаготовительной машине и передачи управляющих команд для управления лесозаготовительной машиной, использовался Wi-Fi с частотой 5,8 ГГц. Команды управления передавались на машину посредством беспроводного подключения шин CAN.

В результате исследований установлено, что общая задержка включала задержку беспроводной связи и время, необходимое для правильного форматирования данных для передачи по Wi-Fi. Задержка преобразования CAN в Ethernet и Ethernet в CAN для передачи данных по шине CAN и задержка, связанная с кодированием/декодированием передаваемых изображений, составили 0,213 и 119,457 мс соответственно, при беспроводной связи максимальная задержка составила 3,506 мс.

Полевые испытания, проведенные на расстоянии более 350 м на относительно ровной поверхности, показали, что оператор может дистанционно управлять всеми приводами и функциями машины. Однако применение такой системы в реальных производственных условиях, с учетом удаленного расположения и возможного ослабления сигнала деревьями, требует проведения дополнительных исследований.

Одновременно с цифровизацией работы лесозаготовительных машин большое внимание уделяется и технике, применяемой для транспортировки древесины. Например, для повышения производительности машин на вывозке леса [Bacescu et al., 2024] исследовали возможность использования стандартизованных данных SAE J1939 от лесозаготовительных машин для улучшения процесса принятия решений и обеспечения устойчивости лесохозяйственных операций, в частности, осуществлении операции трелевки трелевочными тракторами при работе на участках с большими уклонами на северо-востоке Италии в альпийских лесах. В автоматическом режиме определялись этапы работы, их продолжительность, был проведен расчет расхода топлива и созданы модели производства и расхода топлива за рабочий цикл с учетом расстояния трелевки и уклона местности. Результаты показали, что более 82% рабочих циклов были успешно идентифицированы с точностью 60–70% в определении рабочих элементов внутри циклов. Такая высокая скорость идентификации позволяет операторам машин выявлять узкие места и повышать эффективность, прогнозировать будущие эксплуатационные воздействия и затраты на основе статистического анализа, реализованного с использованием больших данных.

В настоящее время в скандинавских странах разрабатываются решения, основанные на применении на лесозаготовках одномашинной системы с применением харвардеров вместо традиционной двухмашинной системы с харвестером и форвардером [Kärhä et al., 2018; Lundqvist et al., 2022; Lundqvist et al., 2023]. Проведенная оценка возможности применения харвардеров в Швеции показала возможность снижения общих затрат на величину около 3% при условии заготовки 50% от общего объема работ. Для повышения эффективности харвардеров [Lundqvist et al., 2023] предлагается увеличение объема лесозаготовок с использованием харвардеров, а также широкая автоматизация их работы.

Автоматизация работы операторов харвестеров и форвардеров является приоритетной для повышения эффективности лесозаготовок. Так, [Szewczyk et al., 2020] проведены исследования умственной нагрузки операторов харвестеров от увеличения уклона местности для разработки оптимальных графи-

ков их работы и отдыха. Проводились измерения активности глаз оператора при работе на уклонах 9%, 23% и 47%. Установлено, что увеличение уклона местности, на которой работает харвестер, значительно увеличивает умственную нагрузку (до 22%), что требует соответствующего графика отдыха.

Результаты исследования. Одним из направлений повышения эффективности работы оператора харвестера, снижения его утомляемости является широкое внедрение машинного зрения, позволяющее в автоматическом режиме контролировать безопасность процесса лесозаготовок, нахождение в опасных зонах [Сиваков, Заикин, 2024; Sivakov et al., 2024a], а также определять породу древесины с применением нейронных сетей, что позволяет снизить умственную нагрузку на оператора [Жук и др., 2023; Говядин и др., 2024; Svoikin et al., 2023a, b].

Важным аспектом, от которого зависит эффективность лесозаготовок, является планирование работ [Labelle, Kemmerer, 2022; Sforza et al., 2024], определяющее необходимое количество машин [Spinelli et al., 2010; Lundqvist et al., 2022; Silva et al., 2022], а также получение данных от используемых харвестеров для уточнения планов [Rukomojnikov, Sergeeva, 2024; Sergeeva et al., 2024; Silva et al., 2024].

Для эффективной работы необходимо как учитывать результаты процесса (количество сортиментов, их объем, диаметр сортиментов, породу), так и контролировать техническое состояние машин и технологического оборудования. Современные машины (харвестеры, форвардеры) оборудованы бортовой системой диагностирования с цифровой шиной данных CAN, позволяющей достаточно просто подключать дополнительные электронные системы, оборудованные датчиками.

Рассматривая бортовую систему диагностирования, необходимо отметить, что ранее для доступа к данным, хранящимся в блоке управления машины, требовалось физическое подключение диагностического сканера, подключаемого к диагностическому разъему машины. Такой способ организации работы имеет ряд недостатков, к основному из которых можно отнести низкую оперативность получения данных о состоянии машины.

Развитие компьютерных сетей, беспроводных технологий передачи данных привело к появлению интернета вещей IoT [Kolberg, Zühlke, 2015; Gavrilović, Mishra, 2021], позволяющему организовать оперативный мониторинг состояния машины (при условии установки надежного и скоростного соединения посредством беспроводных сетей передачи данных).

Поступление большого объема разнообразных данных [Ehrlich-Sommer et al., 2024] позволяет говорить о так называемых «больших данных» (Big

Data), для хранения которых необходимо использовать базы данных. Информация, передаваемая с применяемых машин (технические и производственные параметры), поступает на сервер и заносится в базу данных, обрабатывается и далее поступает к владельцу машин, где используется для планирования лесозаготовительных работ, технического обслуживания и ремонта (рис. 1). Такая информация дает возможность: определить тенденции изменения состояния контролируемого узла и принять своевременное решение по проведению его корректировки (регулировки) или ремонта, а также изменить производственные планы [Заикин и др., 2023, 2024; Сиваков, 2024; Hernandez-Matias et al., 2023; Sivakov et al., 2024b].



Рис. 1. Алгоритм функционирования информационной системы без модуля моделирования работ

Fig. 1. Algorithm of the information system functioning without the work modeling module

Рассматривая используемые лесозаготовительные машины, необходимо отметить, что в настоящее время в РФ применяется техника зарубежного производства (John Deere, Ponsse, Komatsu и др.), в которой используется собственное программное обеспечение [Сиваков и др., 2023]. Результаты работы харвестера хранятся в файле стандарта STM [Жук и др., 2021]. Учитывая зависимость зарубежного программного обеспечения от внешнеполитических рисков и необходимость достижения технологиче-

ского суверенитета РФ, необходимы альтернативные разработки отечественного программного обеспечения, использующего данные стандарта в качестве входных данных о работе технологического оборудования. Также необходимо передавать данные с датчиков, используемых в электронных системах машины.

Алгоритм функционирования такой информационной системы должен включать в себя специализированное программное обеспечение, позволяющее осуществлять моделирование и на его основе планирование режимов работы лесозаготовительных машин и оборудования с учетом их технического состояния и природно-производственных условий эксплуатации. Производственные (ПрД) и технические (ТехД) данные с применяемых машин (харвестеров, форвардеров, сортиментовозов и другой техники) с учетом привязки к координатам из ГИС по каналам данных поступают на сервер (в качестве сервера может выступать как сервер производителя техники, так и сервер предприятия), попадают в базу данных, обрабатываются и на основании анализа фактические результаты сравниваются с планируемыми, при необходимости производится корректировка планируемых работ (рис. 2).

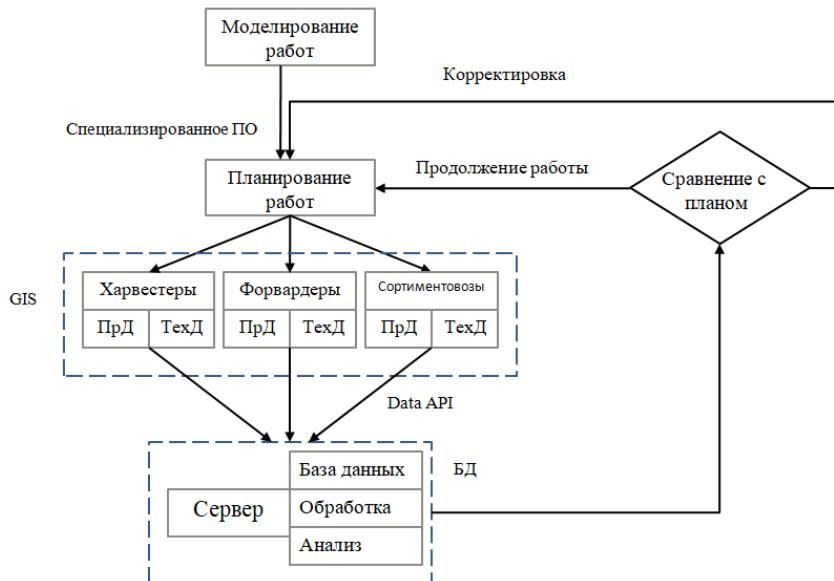


Рис. 2. Алгоритм функционирования комплексной информационной системы
Fig. 2. Algorithm of functioning of the complex information system

Работа лесозаготовительных машин достаточно сильно отличается от работы сельскохозяйственных машин ввиду удаленности лесосек от зоны покрытия сотовой сети, посредством которой осуществляется передача информации с машины на сервер компании или сервер производителя (рис. 3), поэтому при работе в условиях лесосеки и отсутствия связи с сервером целесообразно создание локальной беспроводной сети машин, работающих на лесосеке. Для этого необходима установка Wi-Fi модулей на машинах. Учитывая, что машины могут быть удалены друг от друга на достаточно большие расстояния, целесообразно создание базовой сети на основе отдельных модулей с автономным питанием, например, от солнечных батарей. Перемещение машин в этом случае не будет приводить к потере связи машин между собой.

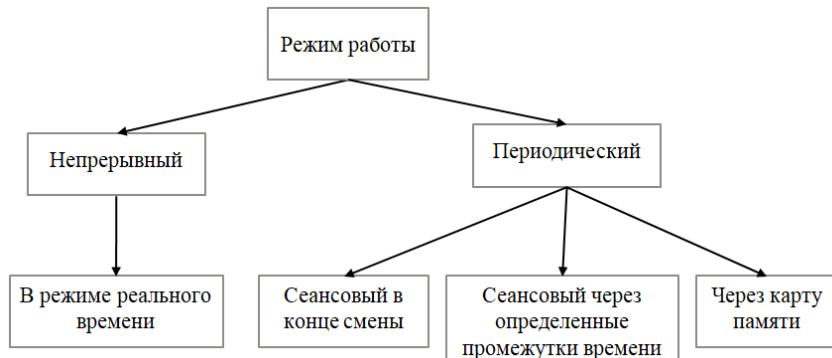


Рис. 3. Варианты организации передачи данных с лесозаготовительных машин на лесосеке

Fig. 3. Options for organizing data transfer from logging machines at the harvesting area

Передача данных на сервер может быть организована посредством установки на одну из машин комплекта спутникового интернета, позволяющего использовать его магистральный канал для передачи данных на сервер компании или производителя, а также применения БПЛА с установленным модулем ретрансляции.

Заключение. На основании проведенных исследований установлено, что вопросам цифровизации работы лесозаготовительных машин, в том числе моделированию особенностей их применения [Proto et al., 2020; Sperandio et al., 2023], а также управлению сервисным обслуживанием лесоза-

готовительных машин уделяется большое внимание. Исследуются технологии удаленного управления машинами, анализа эффективности их деятельности, а также возможности применения алгоритмов искусственного интеллекта для снижения нагрузки на оператора машин [Thaker, 2024]. Функционирование информационных систем, применяемых на лесозаготовительных машинах, без модуля моделирования режимов их работы является недостаточным. В современных условиях при моделировании и, на его основе, планировании режимов работы машин недостаточно учитывать только природно-производственные условия, необходимо также учитывать техническое состояние машин. Для этого требуется осуществлять постоянный мониторинг технического состояния узлов и агрегатов машин и оперативно передавать полученную информацию на сервер предприятия.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Гоядин И.К., Чубинский А.Н., Алексеев А.С. Метод измерения диаметров деревьев на основе технологий искусственного интеллекта // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 249. С. 177–194. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.177-194.

Жук К.Д., Угрюмов С.А., Свойкин Ф.В. Статистическая оценка размерных характеристик лесоматериалов с использованием данных стм-файлов многооперационных лесных машин // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2021. № 235. С. 137–149. DOI: 10.21266/2079-4304.2021.235.137-149.

Жук К.Д., Угрюмов С.А., Свойкин Ф.В. Распознавание пород деревьев в процессе лесозаготовки с применением методов машинного обучения // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. Вып. 242. С. 167–178. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.242.167-178.

Заикин А.Н., Сиваков В.В., Новикова Т.П., Зеликов В.А., Стасюк В.В., Чуйков А.С. Программное обеспечение для управления системой технического обслуживания и ремонта лесных машин: оценка применимости // Лесотехнический журнал. 2023. Т. 13, № 2(50). С. 105–127. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.2/6.

Заикин А.Н., Сиваков В.В., Зеликов В.А., Чуйков А.С., Новиков А.И., Стасюк В.В. Автоматизированное оперативное управление лесосечными работами: методологический анализ // Лесотехнический журнал. 2024. Т. 14, № 2(54). С. 204–226. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2024.2/12.

Сиваков В.В. Цифровизация управления системой технического обслуживания и ремонта лесозаготовительной техники // Хвойные бореальной зоны. 2024. Т. 42, № 1. С. 64–71. DOI: 10.53374/1993-0135-2024-1-64-71.

Сиваков В.В., Заикин А.Н., Новикова Т.П., Зеликов В.А., Стасюк В.В., Чуйков А.С. Цифровизация системы организации рабочих процессов лесозаготовительных

машин: оценка эффективности на примере «Ponsse», «Komatsu» и «John Deere» // Лесотехнический журнал. 2023. Т. 13, № 3(51). С. 200–218. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.3/14.

Сиваков В.В., Заикин А.Н. Повышение эффективности обучения сотрудников предприятий лесного комплекса в условиях цифровизации // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 248. С. 243–256. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.248.243-256.

Bacescu N., Piol O., Talbot B., Marchi L., Grigolato S. Modelling skidding extraction in mountainous forest through engine data acquisition and analysis (preprint). 2024. DOI: 10.21203/rs.3.rs-4613216/v1.

Ehrlich-Sommer F., Hoenigsberger F., Gollob C., Nothdurft A., Stampfer K., Holzinger A. Sensors for Digital Transformation in Smart Forestry // Sensors. 2024. Vol. 24. Art. no. 798. DOI: 10.3390/s24030798.

Gavrilović N., Mishra A. Software architecture of the internet of things (IoT) for smart city, healthcare and agriculture: analysis and improvement directions // J. Ambient Intell Human Comput. 2021. No. 12. P. 1315–1336. DOI: 10.1007/s12652-020-02197-3.

Guerra F., Udalí A., Wagner T., Marinello F., Grigolato S. Opportunity to integrate machine management data, soil, terrain and climatic variables to estimate tree harvester and forwarder performance // Annals of Forest Research. 2024. Vol. 67, no. 1. DOI: 10.15287/afr.2024.3338.

Hernandez-Matias J., Ríos J., Clavijo M., Villaverde S.J., Idoipe A. Methodology and architecture for the implementation of TPM 4.0 in small and medium-sized companies // Dyna (Bilbao). 2023. Vol. 98. P. 351–355. DOI: 10.6036/10878.

Kärhä K., Poikela A., Palander T. Productivity and Costs of Harwarder Systems in Industrial Roundwood Thinning // Croatian Journal of Forest Engineering. 2018. Vol. 39. P. 23–33.

Kim Gyun-Hyung, Kim Ki-Duck, Lee Hyeon-Seung, Choi Yunsung, Mun Ho-Seong, Oh Jae-Heun, Shin Beom-Soo. Development of Wi-Fi-Based Teleoperation System for Forest Harvester // Journal of Biosystems Engineering. 2021. Vol. 46. P. 206–216. DOI: 10.1007/s42853-021-00100-2.

Kolberg D., Zühlke D. Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies // IFAC-Papers On Line. 2015. Vol. 48, iss. 3. P. 1870-1875. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.359.

Labelle E., Kemmerer J. Business Process Reengineering of a Large-Scale Public Forest Enterprise Through Harvester Data Integration // Croatian journal of forest engineering. 2022. Vol. 43. DOI: 10.5552/crojfe.2022.1129.

Lundbäck M., Häggström C., Fjeld D., Lindroos O., Nordfell T. The economic potential of semi-automated tele-extraction of roundwood in Sweden // International Journal of Forest Engineering. 2022. Vol. 33. P. 1–18. DOI: 10.1080/14942119.2022.2103784.

Lundbäck M., Lindroos O., Servin M. Rubber-Tracked Forwarders—Productivity and Cost Efficiency Potentials // Forests. 2024. Vol. 15. Art. no. 284. DOI: 10.3390/fl15020284.

Lundqvist R., Rönnqvist M., Flisberg P., Jönsson P., Lindroos O. Comparison of modeling approaches for evaluation of machine fleets in central Sweden forest operations // International Journal of Forest Engineering. 2022. Vol. 34. P. 1–12. DOI: 10.1080/14942119.2022.2102346.

Lundqvist R., Rönnqvist M., Flisberg P., Jönsson P., Lindroos O. Country-wide analysis of the potential use of harwarders for final fellings in Sweden // Scandinavian Journal of Forest Research. 2023. Vol. 38. P. 1–16. DOI: 10.1080/02827581.2023.2168045.

Proto A., Sperandio G., Costa C., Maesano M., Antonucci F., Macri G., Mugnozza G., Zimbalatti G. A Three-Step Neural Network Artificial Intelligence Modeling Approach for Time, Productivity and Costs Prediction: A Case Study in Italian Forestry // Croatian journal of forest engineering. 2020. Vol. 41, iss. 1. 10.5552/crojfe.2020.611.

Rukomojnikov K., Sergeeva T. Simulation modeling of logging harvester movements during selective logging // Journal of Applied Engineering Science. 2024. Vol. 22. P. 1–8. DOI: 10.5937/jaes0-50146.

Sergeeva T., Gilyazova T., Rukomojnikov K., Tsarev E., Petuhov I., Anisimov P. Modeling of labor costs during the operation of a forest harvester // Agrarian Scientific Journal. 2024. Vol. 4. P. 128–135. DOI: 10.28983/asj.y2024i4pp128-135.

Sforza F., Starke M., Dietsch P., Thuer P., Lingua E., Ziesak M. Maximizing the economic benefit for cable yarding timber harvesting operations by spatially optimizing tree selection // European Journal of Forest Research. 2024. Vol. 144. P. 831-850. DOI: 10.1007/s10342-024-01700-1.

Silva A., Cardoso M., Gomes R., Schettini B., Minette L., Nunes I., Villanova P. Forest extraction management with the indicator of overall efficiency of forest machines (OEFM) // Revista Árvore. 2022. Vol. 46, iss. 6. DOI: 10.1590/1806-908820220000018.

Sivakov V., Buglaev A., Zaikin A., Orekhovskaya A., Nurullin A., Razetdinov I. Improving the training of employees of logging enterprises in the field of labor protection // EDP Sciences - Web of Conferences. 2024a. Vol. 486. Art. no. 04007. DOI: 10.1051/e3sconf/202448604007.

Sivakov V., Zaikin A., Borovaya K., Andronov A., Akhmadiev A., Sakhapov R. Improving service agricultural and forestry machinery // BIO WEB OF CONFERENCES. IV International Conference on Agricultural Engineering and Green Infrastructure for Sustainable Development (AEGISD-IV 2024). Les Ulis, 2024b. Art. no. 01005.

Sperandio G., Ortenzi L., Spinelli R., Magagnotti N., Figorilli S., Acampora A., Costa C. A multi-step modelling approach to evaluate the fuel consumption, emissions, and costs in forest operations // European Journal of Forest Research. 2023. Vol. 143. P. 1–15. DOI: 10.1007/s10342-023-01624-2.

Spinelli R., Magagnotti N., Picchi G. Deploying Mechanized Cut-to-Length Technology in Italy: Fleet Size, Annual Usage, and Costs // International Journal of Forest Engineering. 2010. Vol. 21. P. 23–31. DOI: 10.1080/14942119.2010.10702595.

Svoikin F., Zhuk K., Svoikin V., Ugryumov S., Bacherikov I. Stem segmentation for sustainable forest management task // E3s web of conferences. 2023a. Vol. 390. Art. no. 07038. DOI: 10.1051/e3sconf/202339007038.

Svoikin F., Zhuk K., Svoikin V., Ugryumov S., Bacherikov I., Daniela V., Ryapukhin A. Classification of Tree Species in the Process of Timber-Harvesting Operations Using Machine-Learning Methods // Inventions. 2023b. Vol. 8, no. 2. Art. no. 57. DOI: 10.3390/inventions8020057.

Szewczyk G., Spinelli R., Magagnotti N., Tylek P., Sowa J., Rudy P., Gaj-Gielarowiec D. The mental workload of harvester operators working in steep terrain conditions // Silva Fennica. 2020. Vol. 54, iss. 3. Art. no. 10355. DOI: 10.14214/sf.10355.

Thaker R. Advancements in Forestry Robotics: Autonomous Navigation, Sensing, and AI-Driven Applications for Precision Forestry and Forest Inventory Management // International Journal of Innovative Research and Creative Technology. 2024. Vol. 10, iss. 4. P. 1–7. DOI: 10.5281/zenodo.14001694.

References

Bacescu N., Piol O., Talbot B., Marchi L., Grigolato S. Modelling skidding extraction in mountainous forest though engine data acquisition and analysis (preprint). 2024. DOI: 10.21203/rs.3.rs-4613216/v1.

Ehrlich-Sommer F., Hoenigsberger F., Gollob C., Nothdurft A., Stampfer K., Holzinger A. Sensors for Digital Transformation in Smart Forestry. *Sensors*, 2024, vol. 24, art. no. 798. DOI: org/10.3390/s24030798.

Gavrilović N., Mishra A. Software architecture of the internet of things (IoT) for smart city, healthcare and agriculture: analysis and improvement directions. *J. Ambient Intell Human Comput.*, 2021, no. 12, pp. 1315–1336. DOI: 10.1007/s12652-020-02197-3.

Govyadin I.K., Chubinsky A.N., Alekseev A.S. Method for measuring tree diameters based on artificial intelligence technologies. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 249, pp. 177–194. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.177-194. (In Russ.)

Guerra F., Udalí A., Wagner T., Marinello F., Grigolato S. Opportunity to integrate machine management data, soil, terrain and climatic variables to estimate tree harvester and forwarder performance. *Annals of Forest Research*, 2024, vol. 67, no. 1. DOI: 10.15287/afr.2024.3338.

Hernandez-Matias J., Ríos J., Clavijo M., Villaverde S.J., Idoipe A. Methodology and architecture for the implementation of TPM 4.0 in small and medium-sized companies. *Dyna (Bilbao)*, 2023, vol. 98, pp. 351–355. DOI: 10.6036/10878.

Kärhä K., Poikela A., Palander T. Productivity and Costs of Harwarder Systems in Industrial Roundwood Thinning. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2018, vol. 39, pp. 23–33.

Kim Gyun-Hyung, Kim Ki-Duck, Lee Hyeon-Seung, Choi Yunsung, Mun Ho-Seong, Oh Jae-Heun, Shin Beom-Soo. Development of Wi-Fi-Based Teleoperation System for Forest Harvester. *Journal of Biosystems Engineering*, 2021, vol. 46, pp. 206–216. DOI: 10.1007/s42853-021-00100-2.

Kolberg D., Zühlke D. Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies. *IFAC-Papers On Line*, 2015, vol. 48, iss. 3, pp. 1870–1875. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.359.

Labelle E., Kemmerer J. Business Process Reengineering of a Large-Scale Public Forest Enterprise Through Harvester Data Integration. *Croatian journal of forest engineering*, 2022, vol. 43. DOI: 10.5552/crojfe.2022.1129.

Lundbäck M., Häggström C., Fjeld D., Lindroos O., Nordfjell T. The economic potential of semi-automated tele-extraction of roundwood in Sweden. *International Journal of Forest Engineering*, 2022, vol. 33, pp. 1–18. DOI: 10.1080/14942119.2022.2103784.

Lundbäck M., Lindroos O., Servin M. Rubber-Tracked Forwarders–Productivity and Cost Efficiency Potentials. *Forests*, 2024, vol. 15, art. no. 284. DOI: 10.3390/f15020284.

Lundqvist R., Rönnqvist M., Flisberg P., Jönsson P., Lindroos O. Country-wide analysis of the potential use of harwarders for final fellings in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2023, vol. 38, pp. 1–16. DOI: 10.1080/02827581.2023.2168045.

Lundqvist R., Rönnqvist M., Flisberg P., Jönsson P., Lindroos O. Comparison of modeling approaches for evaluation of machine fleets in central Sweden forest operations. *International Journal of Forest Engineering*, 2022, vol. 34, pp. 1-12. DOI: 10.1080/14942119.2022.2102346.

Proto A., Sperandio G., Costa C., Maesano M., Antonucci F., Macri G., Mugnozza G., Zimbalatti G. A Three-Step Neural Network Artificial Intelligence Modeling Approach for Time, Productivity and Costs Prediction: A Case Study in Italian Forestry. *Croatian journal of forest engineering*, 2020, vol. 41, iss. 1. DOI: 10.5552/crojfe.2020.611.

Rukomojnikov K., Sergeeva T. Simulation modeling of logging harvester movements during selective logging. *Journal of Applied Engineering Science*, 2024, vol. 22, pp. 1-8. DOI: 10.5937/jaes0-50146.

Sergeeva T., Gilyazova T., Rukomojnikov K., Tsarev E., Petuhov I., Anisimov P. Modeling of labor costs during the operation of a forest harvester. *Agrarian Scientific Journal*, 2024, vol. 4, pp. 128-135. DOI: 10.28983/asj.y2024i4pp128-135.

Sforza F., Starke M., Dietsch P., Thuer P., Lingua E., Ziesak M. Maximizing the economic benefit for cable yarding timber harvesting operations by spatially optimizing tree selection. *European Journal of Forest Research*, 2024, vol. 144, pp. 831-850. DOI: 10.1007/s10342-024-01700-1.

Silva A., Cardoso M., Gomes R., Schettini B., Minette L., Nunes I., Villanova P. Forest extraction management with the indicator of overall efficiency of forest

machines (OEFM). *Revista Árvore*, 2022, vol. 46, iss. 6. DOI: 10.1590/1806-908820220000018.

Sivakov V.V. Digitalisation of the management system of maintenance and repair of forestry machines. *Coniferous trees of the boreal zone*, 2024, vol. 42, no. 1, pp. 64–71. DOI: 10.53374/1993-0135-2024-1-64-71. (In Russ.)

Sivakov V.V., Zaikin A.N., Novikova T.P., Zelikov V.A., Stasyuk V.V., Chuikov A.S. Digitalization of the workflow management system of logging machines: efficiency assessment using the example of «Ponsse», «Komatsu», and «John Deere». *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], 2023, vol. 13, no. 3 (51), pp. 200-218. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.3/14. (In Russ.)

Sivakov V.V., Zaikin A.N. Increasing the effectiveness of training employees of forestry enterprises in the conditions of digitization. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 248, pp. 243–256. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.248.243-256. (In Russ.)

Sivakov V., Buglaev A., Zaikin A., Orekhovskaya A., Nurullin A., Razetdinov I. Improving the training of employees of logging enterprises in the field of labor protection. *EDP Sciences – Web of Conferences*, 2024a, vol. 486, art. no. 04007. DOI: 10.1051/e3sconf/202448604007.

Sivakov V., Zaikin A., Borovaya K., Andronov A., Akhmadiev A., Sakhapov R. Improving service agricultural and forestry machinery. *BIO WEB OF CONFERENCES. IV International Conference on Agricultural Engineering and Green Infrastructure for Sustainable Development (AEGISD-IV 2024)*. Les Ulis, 2024b, art. no. 01005.

Sperandio G., Ortenzi L., Spinelli R., Magagnotti N., Figorilli S., Acampora A., Costa C. A multi-step modelling approach to evaluate the fuel consumption, emissions, and costs in forest operations. *European Journal of Forest Research*, 2023, vol. 143, pp. 1-15. DOI: 10.1007/s10342-023-01624-2.

Spinelli R., Magagnotti N., Picchi G. Deploying Mechanized Cut-to-Length Technology in Italy: Fleet Size, Annual Usage, and Costs. *International Journal of Forest Engineering*, 2010, vol. 21, pp. 23-31. DOI: 10.1080/14942119.2010.10702595.

Svoikin F., Zhuk K., Svoikin V., Ugryumov S., Bacherikov I. Stem segmentation for sustainable forest management task. *E3s web of conferences*, 2023a, vol. 390, art. no. 07038. DOI: 10.1051/e3sconf/202339007038.

Svoikin F., Zhuk K., Svoikin V., Ugryumov S., Bacherikov I., Daniela V., Ryapukhin A. Classification of Tree Species in the Process of Timber-Harvesting Operations Using Machine-Learning Methods. *Inventions*, 2023b, vol. 8, no. 2, art. no. 57. DOI: 10.3390/inventions8020057.

Szewczyk G., Spinelli R., Magagnotti N., Tylek P., Sowa J., Rudy P., Gaj-Gielarowiec D. The mental workload of harvester operators working in steep terrain conditions. *Silva Fennica*, 2020, vol. 54, iss. 3, art. no. 10355. DOI: 10.14214/sf.10355.

Thaker R. Advancements in Forestry Robotics: Autonomous Navigation, Sensing, and AI-Driven Applications for Precision Forestry and Forest Inventory Management. *International Journal of Innovative Research and Creative Technology*, 2024, vol. 10, iss. 4, pp. 1–7. DOI: 10.5281/zenodo.14001694.

Zaikin A.N., Sivakov V.V., Novikova T.P., Zelikov V.A., Stasyuk V.V., Chuikov A.S. Software for managing the system of maintenance and repair of forest machines: assessment of applicability. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], 2023, vol. 13, no. 2 (50), pp. 105–127. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.2/6. (In Russ.)

Zaikin A.N., Sivakov V.V., Zelikov V.A., Chuikov A.S., Novikov A.I., Stasyuk V.V. Automatized management of logging operations: a methodological analysis. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], 2024, vol. 14, no. 2 (54), pp. 204–226. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2024.2/12. (In Russ.)

Zhuk K.D., Uglyumov S.A., Svoikin F.V. Statistical evaluation of the dimensional characteristics of timber products using data from stm-files of multioperation forest machines. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2021, iss. 235, pp. 137–149. DOI: 10.21266/2079-4304.2021.235.137-149. (In Russ.)

Zhuk K.D., Uglyumov S.A., Svoikin F.V. Classification of tree species in the process of logging using machine learning methods. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2023, iss. 242, pp. 167–178. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.242.167-178. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 26.11.2024

Сиваков В.В., Заикин А.Н. Совершенствование работы лесозаготовительных машин в условиях внедрения цифровых технологий // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 320–335. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.320-335

Широкое внедрение цифровых технологий в хозяйственную деятельность человека, в том числе и на лесозаготовках, является актуальным трендом развития. При организации работы лесозаготовительных машин следует учитывать не только их технические характеристики, но и их возможность адаптации в единое цифровое пространство. Обзор отечественных и зарубежных научно-технических источников показал, что вопросам совершенствования процесса лесозаготовок уделяется большое внимание, многие исследователи считают цифровизацию работы лесозаготовительных машин одним из основных направлений деятельности. Развитие систем искусственного интеллекта подразумевает создание комплекса лесозаготовительных машин, работающих автономно, без участия человека, как при заготовке древесины, так и на ее вывозке. Однако на современном этапе развития обойтись без участия человека невозможно, поэтому рассматриваются решения, направленные на повышение

эффективности работы оператора харвестера, снижение его утомляемости путем автоматизации части выполняемых работ, в частности, внедрение машинного зрения, позволяющее в автоматическом режиме контролировать безопасность процесса лесозаготовок, нахождение в опасных зонах, определять породу древесины с применением нейронных сетей для снижения умственной нагрузки на оператора. Важным аспектом повышения эффективности лесозаготовок является планирование работ с применением информационной системы, которое как учитывает результаты работы машин (диаметр и количество сортиментов, их объем, породу), так и контролирует техническое состояние машин и технологического оборудования. Алгоритм функционирования информационной системы должен включать в себя специализированное программное обеспечение, позволяющее осуществлять моделирование и на его основе планирование режимов работы лесозаготовительных машин и оборудования с учетом их технического состояния и природно-производственных условий эксплуатации. Для учета особенностей работы лесозаготовительных машин ввиду удаленности лесосек от зоны покрытия сотовой сети предлагаются решения по передаче необходимой информации на сервер компании.

Ключевые слова: цифровизация, информационные технологии, лесозаготовки, лесозаготовительные машины, режимы работы машин.

Sivakov V.V., Zaikin A.N. Improving the operation of forestry machines under the conditions of digital technologies implementation. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 320–335 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.320-335

The widespread introduction of digital technologies into human economic activities, including logging, is an actual development trend. When organizing the work of logging machines, it is necessary to take into account not only their technical characteristics, but also their ability to adapt to a single digital space. A review of domestic and foreign scientific and technical sources has shown that much attention is paid to the issues of improving the logging process, many researchers consider the digitalization of logging machine operation as one of the main activities. The development of artificial intelligence systems implies the creation of a set of logging machines that work autonomously, without human participation, both in timber harvesting and its removal. However, at the current stage of development, it is impossible to do without human participation, therefore, the considered solutions are aimed at improving the efficiency of the harvester operator, reducing his fatigue by automating some of the work performed, in particular, the introduction of machine vision, which allows automatic control of the safety of the logging process, presence in dangerous areas, determine the species of wood with the use of neural networks to reduce the mental load on the operator. An important aspect of improving the efficiency of logging is work planning with the use of an information system, which

takes into account both the results of machine operation (diameter and number of assortments, their volume, species) and controls the technical condition of machines and technological equipment. The algorithm of the information system functioning should include specialized software that allows modeling and on its basis planning of operation modes of logging machines and equipment taking into account their technical condition and natural-production operating conditions. Solutions to transfer the necessary information to the company's server to take into account the peculiarities of logging machines operation due to the remoteness of harvesting areas from the cellular network coverage area are proposed in the paper.

Ключевые слова: цифровизация, информационные технологии, лесозаготовка, лесозаготовительные машины, режимы работы машин.

СИВАКОВ Владимир Викторович – доцент кафедры транспортно-технологических машин и сервиса Брянского государственного инженерно-технологического университета, кандидат технических наук. SPIN-код: 1350-3778. ORCID: 0000-0002-0175-9030.

241037, пр. Станке Димитрова, д. 3, г. Брянск, Россия. E-mail: sv@bgitu.ru

SIVAKOV Vladimir V. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Transport and Technological Machines and Service, Bryansk State Engineering-technological University. SPIN-code: 1350-3778. ORCID: 0000-0002-0175-9030.

241037. Stanke Dimitrov av. 3. Bryansk. Russia. E-mail: sv@bgitu.ru

ЗАИКИН Анатолий Николаевич – профессор кафедры транспортно-технологических машин и сервиса Брянского государственного инженерно-технологического университета, доктор технических наук. SPIN-код: 2009-4260. ORCID: 0000-0002-1831-6893.

241037, пр. Станке Димитрова, д. 3, г. Брянск, Россия. E-mail: zaikin.anatolij@yandex.ru

ZAIKIN Anatoly N. – DSc (Technical), Professor of the Department of Transport and Technological Machines and Service, Bryansk State Engineering-technological University. SPIN-code: 2009-4260. ORCID: 0000-0002-1831-6893.

241037. Stanke Dimitrov av. 3. Bryansk. Russia. E-mail: zaikin.anatolij@yandex.ru

**В.В. Трубников, В.А. Марков, С.В. Ганин, С.А. Блинов,
А.М. Левитский, А.В. Трофимов, И.А. Зверев**

АНАЛИЗ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ДЕТАЛЕЙ ЛЕСНЫХ МАШИН

Введение. Защита металла от коррозии – важнейшая задача для современной лесной промышленности, что связано, в первую очередь, с суровыми условиями эксплуатации техники. Отслоение краски от корпусных и несущих элементов, повышенная влажность, абразивное воздействие и перемены температуры окружающей среды являются основными причинами появления коррозии. Совокупное воздействие перечисленных факторов ведет к интенсивным окислительным реакциям, вызывающим разрушение металла. Решением может служить как создание нового коррозионностойкого материала, так и нанесение защитных покрытий на уже существующие. Ввиду того, что для каждой задачи требуется свой материал, нанесение защитных покрытий выглядит перспективнее и экономически целесообразнее.

Существует множество способов нанесения покрытий, однако из всех вариантов предпочтительными являются те, которые не оказывают термического воздействия на материал изделия, например холодное газодинамическое напыление (ХГДН) [Katanoda et al., 2007]. Технология реализуется в двух вариантах: ХГДН с высоким давлением (для менее пластичных металлов) и ХГДН с низким давлением (для пластичных металлов [Katanoda et al., 2007; Li et al., 2007; Lee et al., 2009; De Force et al., 2011; Koh et al., 2012; Champagne, Helfritch, 2016].

Суть метода заключается в использовании кинетической энергии частиц при соударении их с подложкой, при этом частицы не расплавляются, а налипают на материал [Алхимов и др., 2000; Алхимов и др., 2010; Assadi et al., 2003; Jodoin et al., 2006; King et al., 2010; Ghelichi et al., 2011]. Формируется сплошное, беспористое покрытие [Li et al., 2009, 2014; Rahmati, Ghaei, 2014].

Материалы и методика исследования. Для нанесения коррозионностойких порошковых покрытий было изготовлено 32 образца размером 100×20×3 мм из стали марки Ст3сп. Химический состав стали приведен в табл. 1.

Для нанесения на образцы защитных покрытий использовалась установка ХГДН с низким давлением «Димет-405» (рис. 1), активно использующаяся в промышленности и научно-исследовательских работах [Балданов и др., 2019; Павлов, 2023].

Таблица 1

Химический состав стали марки Ст3сп

Chemical composition of steel grade Ст3сп

Содержание элементов, масс. %							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
0,165	0,205	0,410	0,006	0,004	0,032	0,040	0,011



Рис. 1. Установка холодного газодинамического напыления с низким давлением «Димет-405»

Fig. 1. Low-pressure cold gas dynamic spraying unit «Dimet-405»

При проведении исследования применялись 4 вида покрытия, нанесенные порошками фирмы «Димет» на основе: меди – С-01-01; цинка – Z-00-11; никеля – N3-00-02; алюминия с добавлением цинка – А-80-13. В литературе встречаются данные, что при использовании смеси алюминиевого и цинкового порошков стойкость к коррозии возрастает в разы [Геращенков, 2011]. Добавление Al_2O_3 в смесь для ХГДН повышает адгезию и помогает в формировании более плотного и сплошного покрытия [Schmidt et al., 2009]. В состав представленных смесей помимо основного металла также включён электрокорунд.

Для определения формы и размеров частиц порошков проведен морфологический анализ с использованием сканирующего электронного микроскопа ZeissSupra 55VP. Съемку проводили с применением детектора SE и увеличением 1510 крат. С целью оценки распределения частиц порошков по размеру контролировался гранулометрический состав (лазерный гранулометр FritschAnalysette 22 NanoTecplus).

Результаты анализов приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Морфология частиц (увеличение $\times 1.5K$)
Morphology of particles (magnification $\times 1.5K$)

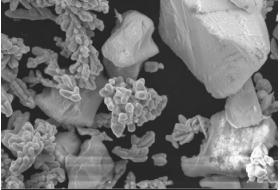
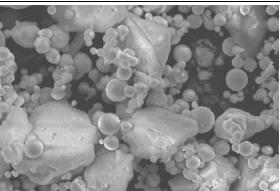
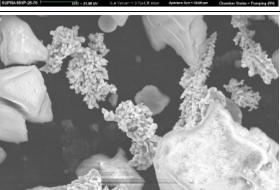
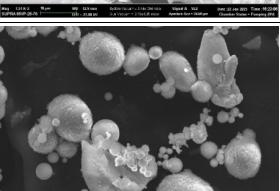
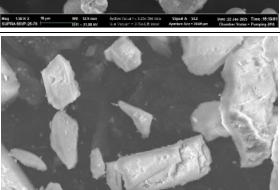
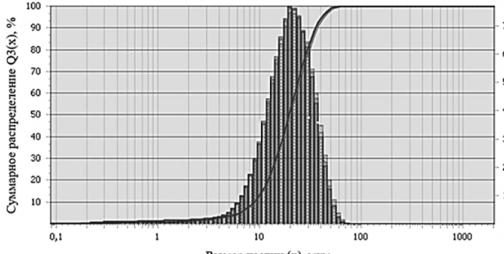
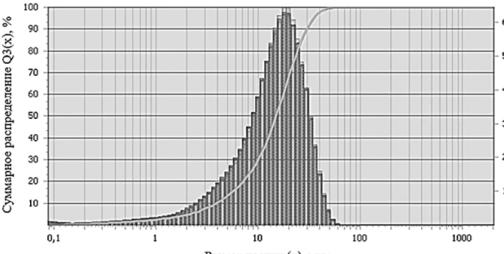
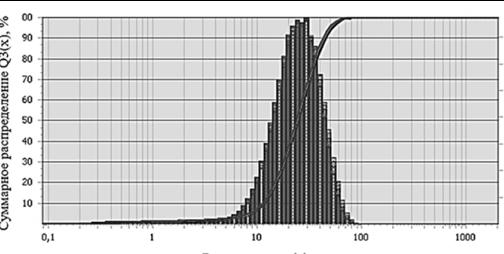
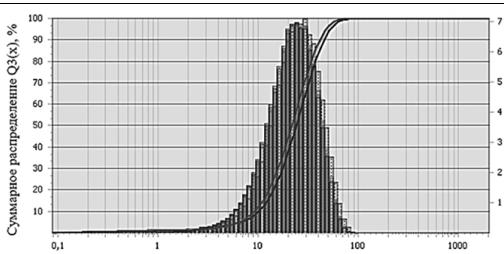
№ п/п	Марка порошка	Фото частиц	Форма частиц
1	C-01-01		Дендритная (частицы меди)/ осколочная (частицы корунда)
2	Z-00-11		Сферическая (частицы цинка)/ осколочная (частицы корунда)
3	N3-00-02		Дендритная (частицы никеля)/ осколочная (частицы корунда)
4	A-80-13		Сферическая (частицы алюминия и цинка)/ осколочная (частицы корунда)
5	K-00-04-02		Осколочная (частицы корунда)

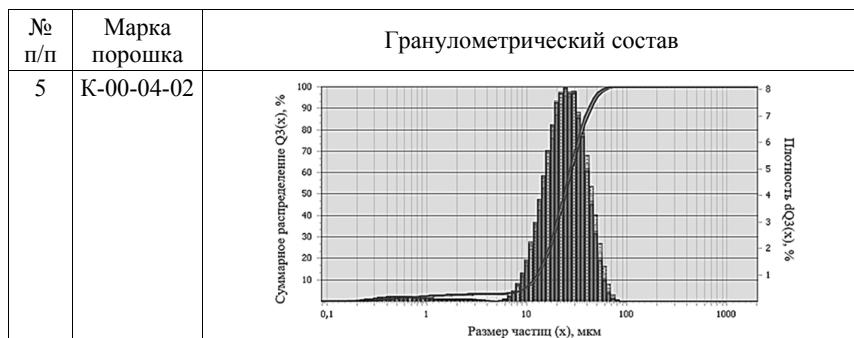
Таблица 3

Гранулометрический состав порошков

Granulometric composition of powders

№ п/п	Марка порошка	Гранулометрический состав	
1	C-01-01		
2	Z-00-11		
3	N3-00-02		
4	A-80-13		

Окончание табл. 3



Изготовленные образцы обезжиривались, после чего помещались в камеру, оснащенную вытяжной системой Циклон. При помощи установки «Димет-405» производилась абразивная обработка поверхностей порошком электрокорунда К-00-04-02 с целью придания образцам необходимой шероховатости ($R_a = 1,534$ мкм). Нанесение покрытий осуществлялось по режимам, рекомендованным производителем, с помощью регулятора мощности нагревателя и регулятора скорости подачи материала.

Параметры процесса нанесения покрытий отображены в табл. 4. Обработанные образцы представлены на рис. 2.

Таблица 4

Технологические режимы нанесения покрытий

Technological modes of coating application

Материал покрытия	Порошок, используемый для покрытия	Температурный режим	Режим расхода порошка
Cu	C-01-01	3	6
Zn	Z-00-11	3	6
Ni	N3-00-02	5	6
Al, Zn	A-80-13	3	6

Изготовленные образцы были подвергнуты коррозионным испытаниям в трех различных агрессивных средах: нейтральном соляном тумане, морской воде и нейтральном соляном тумане – воздухе.

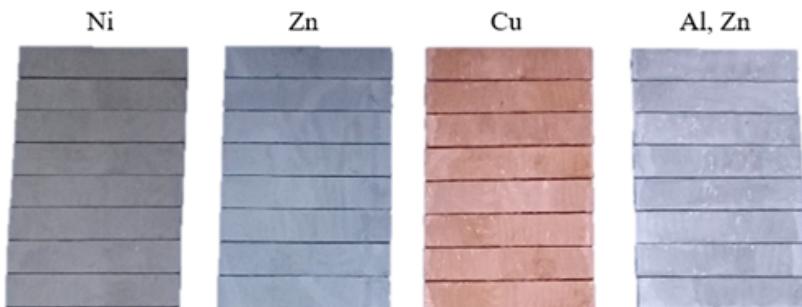


Рис. 2. Общий вид изготовленных образцов вида Ст3сп + ХГДН
 Fig. 2. General view of the manufactured samples Ct3sp + CGDS

Испытания при воздействии нейтрального соляного тумана. Ускорение коррозионного процесса обеспечивается повышением температуры окружающей среды и введением в атмосферу раствора хлористого натрия в концентрации 50 ± 1 г/дм³. Режим для распыления соляного тумана – 5 минут распыления тумана каждые 15 минут. Продолжительность испытания – 720 ч. Температура испытания – 35 ± 5 °С.

Циклические испытания: нейтральный соляной туман – воздух. Самыми опасными являются условия воздействия, при которых наблюдается постоянная смена электролита. Например, на причальных сооружениях, в зоне переменного уровня воды, наблюдается больший уровень коррозии, чем в части, постоянно находящейся под водой. Наиболее показательным является циклическое испытание, сущность которого заключается в ускорении коррозионного процесса повышением температуры окружающей среды с введением в атмосферу раствора хлористого натрия концентрацией 50 ± 1 г/дм³ и сушкой при нормальных условиях. Режим для распыления соляного тумана – 5 минут распыления тумана каждые 15 минут. Температура испытания – 35 ± 5 °С. Каждые 3 дня образцы извлекались из камеры и располагались на подставках до полного высыхания влаги. Продолжительность испытания – 720 ч.

Испытания в морской воде. Испытание в морской воде заключается в экспонировании образцов в морской воде (3%-й р-р NaCl) с последующей оценкой их коррозионной стойкости. Образцы погружаются в ванну с морской водой. Продолжительность испытания – 720 ч.

Лучшее покрытие определялось по результатам коррозионных испытаний и металлографического анализа.

Результаты исследования. После проведения коррозионных испытаний первоначально осуществлялся визуальный контроль масштабов коррозионного поражения металла с целью предварительной оценки эффектив-

ности использующихся покрытий. На рис. 3 показаны образцы после проведения коррозионных испытаний.

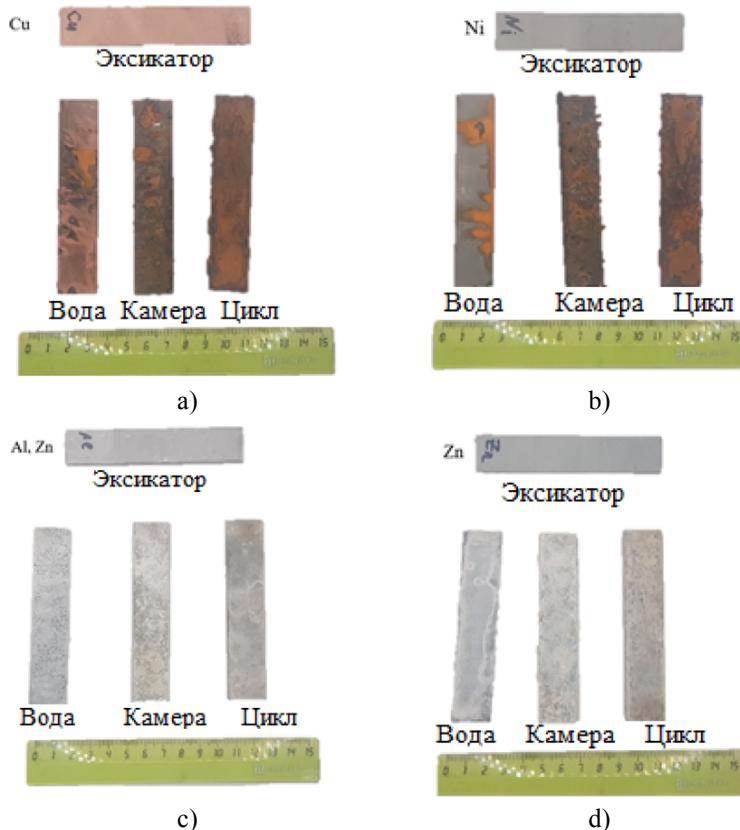


Рис. 3. Общий вид образцов:
а – образцы Ст3 + ХГДН С-01-01; б – образцы Ст3 + ХГДН Н3-00-02;
с – образцы Ст3 + ХГДН А-80-13; д – образцы Ст3 + ХГДН Z-00-11

Fig. 3. General view of the samples:
a – samples Ct3 + CGDS C-01-01; b – samples Ct3 + CGDS N3-00-02;
c – samples Ct3 + CGDS A-80-13; d – samples Ct3 + CGDS Z-00-11

Макроанализ образцов показал, что наилучшей коррозионной стойкостью обладают образцы с покрытием на основе цинка (Z-00-11) и алюминия с цинком (A-80-13). Образцы с покрытием на основе меди (C-01-01) и никеля (N3-00-02) отличаются гораздо более существенным коррозионным разрушением вплоть до частичного отслоения покрытия.

Для определения наиболее эффективного защитного покрытия производились замеры массы образцов до (m_0) и после (m_1) проведения коррозионных испытаний (для каждого из трех видов). Определялись значения коррозионных потерь M (1):

$$M = \frac{m_0 - m_1}{A}, \text{ г/см}^2, \quad (1)$$

где A – площадь образца, см^2 .

Результаты расчета коррозионных потерь представлены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты определения коррозионных потерь исследуемых образцов

Results of determination of corrosion losses of the studied samples

№ обр.	Тип покрытия	Коррозионные потери ($\Delta m / A$), г/см ²		
		Соляной туман	Соляной туман – воздух	Морская вода
1	Без покрытия	$25,89 \cdot 10^{-5}$	$26,93 \cdot 10^{-5}$	$2,18 \cdot 10^{-5}$
2		$20,34 \cdot 10^{-5}$	$31,48 \cdot 10^{-5}$	$2,46 \cdot 10^{-5}$
3		$22,76 \cdot 10^{-5}$	$29,72 \cdot 10^{-5}$	$3,15 \cdot 10^{-5}$
4		$28,91 \cdot 10^{-5}$	$27,84 \cdot 10^{-5}$	$2,87 \cdot 10^{-5}$
5		$26,47 \cdot 10^{-5}$	$30,49 \cdot 10^{-5}$	$2,56 \cdot 10^{-5}$
6	Ni	$3,57 \cdot 10^{-5}$	$14,78 \cdot 10^{-5}$	$1,69 \cdot 10^{-5}$
7		$6,86 \cdot 10^{-5}$	$16,56 \cdot 10^{-5}$	$1,48 \cdot 10^{-5}$
8		$11,73 \cdot 10^{-5}$	$20,64 \cdot 10^{-5}$	$1,33 \cdot 10^{-5}$
9		$9,67 \cdot 10^{-5}$	$18,88 \cdot 10^{-5}$	$1,75 \cdot 10^{-5}$
10		$8,15 \cdot 10^{-5}$	$17,71 \cdot 10^{-5}$	$0,94 \cdot 10^{-5}$
11	Zn	$2,72 \cdot 10^{-5}$	$3,62 \cdot 10^{-5}$	$1,04 \cdot 10^{-5}$
12		$4,95 \cdot 10^{-5}$	$4,88 \cdot 10^{-5}$	$0,95 \cdot 10^{-5}$
13		$3,49 \cdot 10^{-5}$	$4,06 \cdot 10^{-5}$	$0,88 \cdot 10^{-5}$
14		$4,33 \cdot 10^{-5}$	$3,82 \cdot 10^{-5}$	$1,02 \cdot 10^{-5}$
15		$3,58 \cdot 10^{-5}$	$4,72 \cdot 10^{-5}$	$1,95 \cdot 10^{-5}$
16	Cu	$8,34 \cdot 10^{-5}$	$15,51 \cdot 10^{-5}$	$1,88 \cdot 10^{-5}$
17		$7,73 \cdot 10^{-5}$	$17,74 \cdot 10^{-5}$	$1,66 \cdot 10^{-5}$
18		$10,72 \cdot 10^{-5}$	$21,77 \cdot 10^{-5}$	$1,87 \cdot 10^{-5}$
19		$9,57 \cdot 10^{-5}$	$19,36 \cdot 10^{-5}$	$1,42 \cdot 10^{-5}$
20		$11,88 \cdot 10^{-5}$	$20,48 \cdot 10^{-5}$	$1,74 \cdot 10^{-5}$
21	Al, Zn	$2,96 \cdot 10^{-5}$	$2,74 \cdot 10^{-5}$	$0,71 \cdot 10^{-5}$
22		$3,36 \cdot 10^{-5}$	$3,24 \cdot 10^{-5}$	$0,85 \cdot 10^{-5}$
23		$2,24 \cdot 10^{-5}$	$3,15 \cdot 10^{-5}$	$0,58 \cdot 10^{-5}$
24		$2,66 \cdot 10^{-5}$	$2,84 \cdot 10^{-5}$	$0,67 \cdot 10^{-5}$
25		$3,25 \cdot 10^{-5}$	$3,11 \cdot 10^{-5}$	$0,92 \cdot 10^{-5}$

По полученным значениям коррозионных потерь массы образцов была проведена статистическая обработка данных, согласно методике, изложенной в ГОСТ 9.502-82. Результаты статистической обработки приведены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты статистической обработки результатов коррозионных испытаний

Results of statistical processing of corrosion tests results

Тип покрытия	Вид испытания	Статистические показатели						
		\bar{x}	σ_n	E	$\sigma_{\bar{x}}$	$\pm\Delta x$	Z	ΔZ
Без покрытия	Соляной туман	24,874	3,354	13,5	1,5	3,19	–	–
	Соляной туман – воздух	29,292	1,877	6,4	0,84	1,79	–	–
	Морская вода	2,644	0,375	14,2	0,17	0,36	–	–
Ni	Соляной туман	7,996	3,068	38,4	1,37	2,92	67,8	12,5
	Соляной туман – воздух	17,714	2,228	12,5	0,99	2,12	39,5	8,1
	Морская вода	1,438	0,325	22,6	0,15	0,31	45,6	13,8
Zn	Соляной туман	3,814	0,853	22,4	0,38	0,81	86,9	2,9
	Соляной туман – воздух	4,220	0,555	13,1	0,25	0,53	83,0	3,0
	Морская вода	1,168	0,442	37,8	0,19	0,42	55,8	17,0
Cu	Соляной туман	9,648	1,697	17,6	0,76	1,62	61,2	8,2
	Соляной туман – воздух	18,972	2,437	12,8	1,09	2,32	35,23	8,8
	Морская вода	1,714	0,188	10,9	0,08	0,18	35,17	11,1
Al, Zn	Соляной туман	2,894	0,455	15,7	0,20	0,43	88,4	2,3
	Соляной туман – воздух	3,016	0,214	7,1	0,09	0,20	89,7	0,9
	Морская вода	0,746	0,137	18,4	0,06	0,13	71,8	6,3

Примечание: \bar{x} – среднеарифметическое значение коррозионных потерь; σ_n – среднеквадратичное отклонение отдельного измерения; E – коэффициент вариации; $\sigma_{\bar{x}}$ – среднеквадратичное отклонение среднеарифметического значения; $\pm\Delta x$ – доверительные границы; Z – защитная способность покрытия; ΔZ – точность определения защитной способности покрытия

Из результатов статистической обработки видно, что все четыре типа рассматриваемых покрытий способствуют защите металла от коррозии. Например, при испытании в нейтральном соляном тумане среднеарифме-

тическое значение коррозионных потерь образцов без покрытия составило $29,292 \cdot 10^{-5}$ г/см², а у образцов с нанесенным защитным слоем оно находится в диапазоне $3,016 \dots 18,972 \cdot 10^{-5}$ г/см².

Результаты статистической обработки результатов коррозионных испытаний показали, что наилучшей защитной способностью обладают покрытия на основе цинка (Z-00-11) и алюминия с цинком (A-80-13). При этом покрытие A-80-13 обладает несколько большей защитной способностью.

Для определения лучшего из двух наиболее эффективных покрытий воспользуемся методом сравнения средних с использованием квантилей распределения Стьюдента. Учитывая, что наибольшие коррозионные потери отмечаются в результате циклических испытаний, то расчет произведем для этого их вида.

Расчетное значение критерия Стьюдента составит (2):

$$t_{\text{расч}} = \frac{\bar{x}_{\text{Zn}} - \bar{x}_{\text{Al, Zn}}}{\sqrt{\frac{\sigma_{n\text{Zn}}^2}{n} + \frac{\sigma_{n\text{Al, Zn}}^2}{n}}} = \frac{4,220 - 3,016}{\sqrt{\frac{0,555^2}{5} + \frac{0,214^2}{5}}} = 4,526. \quad (2)$$

Число степеней свободы равно (3):

$$f = \frac{\left(\frac{\sigma_{n\text{Zn}}^2}{n} + \frac{\sigma_{n\text{Al, Zn}}^2}{n} \right)^2}{\frac{\left(\frac{\sigma_{n\text{Zn}}^2}{n} \right)^2}{n+1} + \frac{\left(\frac{\sigma_{n\text{Al, Zn}}^2}{n} \right)^2}{n+1}} - 2 = \frac{\left(\frac{0,555^2}{5} + \frac{0,214^2}{5} \right)^2}{\frac{\left(0,555^2 \right)^2}{6} + \frac{\left(0,214^2 \right)^2}{6}} - 2 = 5,8. \quad (3)$$

Табличное значение критерия Стьюдента при числе степеней свободы $f = 5$ и уровне значимости $p = 0,05$ составляет $t_{\text{табл.}} = 2,571$.

$$t_{\text{расч.}} = 4,526 > t_{\text{табл.}} = 2,571.$$

Разница между защитными покрытиями A-80-13 и Z-00-11 является статистически значимой. Наилучшей защитной способностью обладает покрытие на основе алюминия с цинком.

Помимо статистической обработки экспериментальных данных коррозионных испытаний был проведен металлографический анализ. Шлифовка и полировка образцов проводилась на установке SAPHIR 560 с использованием шлифовальных бумаг и полировальных алмазных суспензий. Металлографический анализ образцов производился на микроскопе Leica DMI 5000, оснащенном системой анализа изображений Thixomet. Результаты металлографического исследования представлены в табл. 7–10.

Результаты металлографического анализа образцов с медным покрытием

Results of metallographic analysis of copper-coated samples

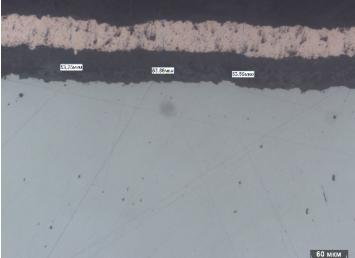
Исходный образец		Средняя толщина слоя составила 56,08 мкм. Покрытие нанесено равномерно.
Испытания при воздействии нейтрального соляного тумана		Средняя толщина слоя составила 53,65 мкм. Под покрытием наблюдается слой окислов. Это указывает на наличие сквозных дефектов в покрытии.
Циклические испытания «нейтральный соляной туман – воздух»		Средняя толщина слоя составила 132,11 мкм. Под покрытием наблюдается слой окислов. Это указывает на наличие сквозных дефектов в покрытии.
Испытание в морской воде		Средняя толщина слоя составила 53,66 мкм. Под покрытием наблюдается равномерный слой окислов. Причина его образования – несплошность покрытия.

Таблица 8

Результаты металлографического анализа образцов с цинковым покрытием

Results of metallographic analysis of zinc-coated samples

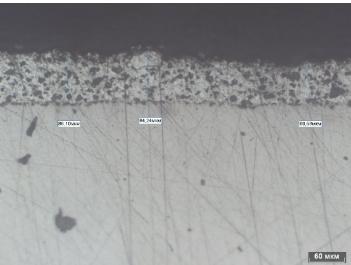
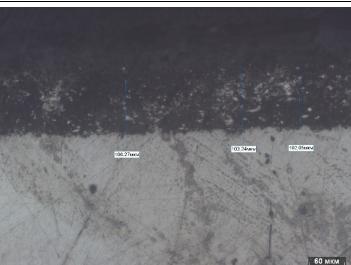
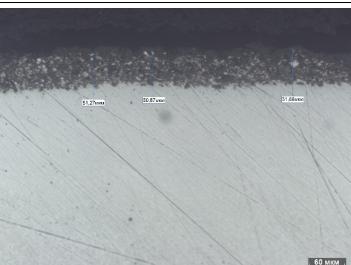
Исходный образец		Средняя толщина слоя составила 79,96 мкм. Покрытие нанесено равномерно.
Испытания при воздействии нейтрально-го соляного тумана		Средняя толщина слоя составила 98,05 мкм. Следов коррозии стали нет. Заметно небольшое истончение покрытия, что является следствием взаимодействия цинка с коррозионной средой.
Циклические испытания «нейтральный соляной туман – воздух»		Средняя толщина слоя составила 103,85 мкм. Следов коррозии стали нет. Заметно небольшое истончение покрытия, что свидетельствует о взаимодействии цинка с коррозионной средой.
Испытание в морской воде		Средняя толщина слоя составила 51,27 мкм. Следов коррозии стали нет. Наблюдается сильное истончение покрытия.

Таблица 9

Результаты металлографического анализа образцов с никелевым покрытием

Results of metallographic analysis of nickel-coated samples

Исходный образец		Средняя толщина слоя составила 31,02 мкм. Покрытие нанесено неравномерно.
Испытания при воздействии нейтрально-го соляного тумана		Средняя толщина слоя 26,91 мкм. В покрытии наблюдаются сквозные дефекты. Также отчетливо виден слой окислов под покрытием.
Циклические испытания «нейтраль-ный соляной туман – воз-дух»		Средняя толщина слоя составила 43,26 мкм. Наблюдается отслоение покрытия. Образование окислов под покрытием могло привести к его частичному отслоению.
Испытание в морской воде		Средняя толщина слоя составила 16,75 мкм. Наблюдается слой окислов под покрытием.

Таблица 10

Результаты металлографического анализа образцов с покрытием на основе алюминия и цинка

Results of metallographic analysis of samples with aluminum and zinc coating

Исходный образец		Средняя толщина слоя составила 164,14 мкм. Покрытие нанесено равномерно.
Испытания при воздействии нейтрально-го соляного тумана		Средняя толщина слоя составила 125,25 мкм. Заметно небольшое истончение покрытия. Сквозных дефектов в покрытии нет. Покрытие плотно прилегает к стали.
Циклические испытания «нейтральный соляной туман – воз- дух»		Средняя толщина слоя составила 196,19 мкм. Заметно небольшое истончение покрытия. Сквозных дефектов в покрытии нет. Покрытие плотно прилегает к стали.
Испытание в морской воде		Средняя толщина слоя составила 91,02 мкм. Заметно небольшое истончение покрытия. Сквозных дефектов в покрытии нет. Покрытие плотно прилегает к стали.

Заключение. Наилучшую коррозионную стойкость во всех испытаниях показали образцы с покрытиями на основе цинка (Z-00-11) и алюминия с цинком (A-80-13), поскольку у них значения коррозионных потерь существенно меньше, чем у образцов с покрытиями на основе меди и никеля. Например, при испытании в нейтральном соляном тумане среднеаифметическое значение коррозионных потерь образцов с цинковым и алюминиево-цинковым покрытиями составило $3,814 \cdot 10^{-5}$ и $2,894 \cdot 10^{-5}$ г/см² соответственно, у образцов с медным и никелевым покрытиями – $9,648 \cdot 10^{-5}$ и $7,996 \cdot 10^{-5}$ г/см² соответственно.

Результаты металлографического анализа показали, что применяемая технология нанесения покрытия обеспечивает формирование толстого сплошного покрытия именно в сочетании с алюминиевой и цинковой порошковыми смесями. На образцах с покрытиями на основе цинка и алюминия с цинком не было выявлено очагов коррозии стали после завершения испытаний, а коррозионные потери были вызваны истончением защитных покрытий в результате воздействия агрессивной среды. При этом на остальных образцах присутствуют явные очаги коррозии стали. Наилучшей защитной способностью обладает покрытие A-80-13.

Полученные результаты могут быть объяснены тем, что цинк и алюминий являются протекторами, т. е. обладают высокой химической активностью, благодаря чему именно они вступают в окислительно-восстановительные реакции. Это приводит к образованию прочных и сплошных оксидных пленок, которые предохраняют материал от дальнейшего взаимодействия с агрессивной средой.

Результаты исследования показали, что для стальных элементов конструкции лесных машин наиболее предпочтительными являются композиционные покрытия на основе цинка и алюминия.

Вклад авторов. Трубников В.В.: постановка цели и задач исследования, проведение эксперимента, обработка экспериментальных данных (40%); Марков В.А.: проведение эксперимента, обработка экспериментальных данных (10%); Ганин С.В.: проведение эксперимента, металлографический анализ (10%); Блинов С.А.: проведение эксперимента, подготовка образцов (10%); Левитский А.М.: проведение эксперимента, подготовка образцов (10%); Трофимов А.В.: обработка экспериментальных данных (10%); Зверев И.А.: обработка экспериментальных данных, общее руководство работой (10%).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Алхимов А.П., Гулидов А.И., Косарев В.Ф., Нестерович Н.И. Особенности деформирования микрочастиц при ударе о твердую преграду // Прикладная механика и техническая физика. 2000. Т. 41, №1. С. 204–209.
- Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Фомин В.М. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика. М.: Физматлит, 2010. 536 с.
- Балданов К.П., Бураев М.К., Рязанов П.Г. К расчету параметров холодного газодинамического напыления деталей машин с использованием установки ДИ-МЕТ-405 // Вестник ВСГУТУ. 2019. № 1(72). С. 69–73.
- Геращенков Д.А. Износостойкий сплав на основе алюминия для наноструктурированных покрытий: пат. 2413024 Рос. Федерация; заявл. 16.11.09; опубл. 27.02.11.
- Павлов И.С. Определение влияния технологических параметров режимов напыления на структуру и свойства функциональных покрытий на основе Al2O3 и Cu, полученных методом холодного газодинамического напыления низкого давления // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. №4 (130). С. 1–15.
- Assadi H., Gartner F., Stoltenhoff T., Kreye H. Bonding mechanism in cold gas spraying // Acta Materialia. 2003. Vol. 51, no. 15. P. 4379–4394.
- Champagne V., Helfritch D. The unique abilities of cold spray deposition // International Materials Reviews. 2016. Vol. 61 (7). P. 437–455. DOI: 10.1080/09506608.2016.1194948.
- De Force B., Eden T., Potter J. Cold spray Al-5% Mg coatings for the corrosion protection of magnesium alloys // Journal of Thermal Spray Technology. 2011. Vol. 20, no. 6. P. 1352–1358.
- Ghelichi R., Bagherifard S., Guagliano M., Verani M. Numerical simulation of cold spray coating // Surface and Coatings Technology. 2011. Vol. 205. P. 5294–5301.
- Jodoin B., Raletz F., Vardelle M. Cold spray modeling and validation using an optical diagnostic method // Surface and Coatings Technology. 2006. Vol. 200, iss. 14–15. P. 4424–4432.
- Katanoda H., Fukuhara M., Iino N. Numerical study of combination parameters for particle impact velocity and temperature in cold spray // Journal of Thermal Spray Technology. 2007. Vol. 16, no. 5–6. P. 627–633. DOI: 10.1007/s11666-007-9087-7.
- King P., Bae G., Zahiri S., Jahedi M., Lee C. An experimental and finite element study of cold spray copper impact onto two aluminum substrates // Journal of Thermal Spray Technology. 2010. Vol. 19, no. 3. P. 620–634.
- Koh P.K., Cheang P., Loke K., Yu S., Siao Ming Ang A. Deposition of amorphous aluminium powder using cold spray // Thermal Spray 2012: Proceedings from the Int. Thermal Spray Conf. and Exposition. Houston, 2012. P. 22–24.
- Lee K.A., Jung D.J., Park D.Y., Kang W.G., Lee J.K., Kim H.J. Study on the fabrication and physical properties of cold sprayed, Cu-based amorphous coating // Journal of Physics: Conference Series. 2009. Vol. 144. P. 12–15.

Li C.-J., Yang G.-J., Gao P.-H., Ma J., Wang Y.-Y., Li C.-X. Characterization of nanostructured WC-codeposited by cold spraying // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2007. Vol. 16, no. 5–6. P. 1011–1020.

Li W.Y., Zhang C., Li C.J., Liao H.L. Modelling aspects of high velocity impact of particles in cold spraying by explicit finite element analysis // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2009. Vol. 18, no. 5–6. P. 921–933.

Li W.Y., Zhang D.D., Huang C.J., Yin S., Yu M., Wang F.F., Liao H.L. Modelling of impact behaviour of cold spray particles: review // *Surface Engineering*. 2014. Vol. 30, no. 5. P. 299–308.

Rahmati S., Ghaei A. The use of particle/substrate material models in simulation of cold-gas dynamic-spray process // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2014. Vol. 23, no. 3. P. 530–540.

Schmidt T., Assadi H., Gärtner F., Richter H., Stoltenhoff T., Kreye H., Klassen T. From particle acceleration to impact and bonding in cold spraying // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2009. Vol. 18, no. 5–6. P. 794–808.

References

Alkhimov A.P., Gulidov A.I., Kosarev V.F., Nesterovich N.I. Features of microparticle deformation upon impact with a solid barrier. *Applied Mechanics and Technical Physics*, 2000, vol. 41, no. 1, pp. 204–209. (In Russ.)

Alkhimov A.P., Klinkov S.V., Kosarev V.F., Fomin V.M. Cold gas-dynamic spraying. Theory and practice. Moscow: Fizmatlit, 2010. 536 p. (In Russ.)

Assadi H., Gartner F., Stoltenhoff T., Kreye H. Bonding mechanism in cold gas spraying. *Acta Materialia*, 2003, vol. 51, no. 15, pp. 4379–4394.

Baldanov K.P., Buraev M.K., Ryazanov P.G. On the calculation of parameters of cold gas-dynamic spraying of machine parts using the DIMET-405 installation. *Bulletin of VSGUTU*, 2019, no. 1(72), pp. 69–73. (In Russ.)

Champagne V., Helfritch D. The unique abilities of cold spray deposition. *International Materials Reviews*, 2016, vol. 61 (7), pp. 437–455. DOI: 10.1080/09506608.2016.1194948.

De Force B., Eden T., Potter J. Cold spray Al-5% Mg coatings for the corrosion protection of magnesium alloys. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2011, vol. 20, no. 6, pp. 1352–1358.

Gerashchenkov D.A. Wear- and corrosion-resistant aluminum-based alloy for nanostructured coatings: patent 2413024 Russian Federation; decl. 11/16/09; publ. 02/27/11. (In Russ.)

Ghelichi R., Bagherifard S., Guagliano M., Verani M. Numerical simulation of cold spray coating. *Surface and Coatings Technology*, 2011, vol. 205, pp. 5294–5301.

Jodoin B., Raletz F., Vardelle M. Cold spray modeling and validation using an optical diagnostic method. *Surface and Coatings Technology*, 2006, vol. 200, iss. 14–15, pp. 4424–4432.

Katanoda H., Fukuhara M., Iino N. Numerical study of combination parameters for particle impact velocity and temperature in cold spray. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2007, vol. 16, no. 5–6, pp. 627–633. DOI: 10.1007/s11666-007-9087-7.

King P., Bae G., Zahiri S., Jahedi M., Lee C. An experimental and finite element study of cold spray copper impact onto two aluminum substrates. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2010, vol. 19, no. 3, pp. 620–634.

Koh P.K., Cheang P., Loke K., Yu S., Siao Ming Ang A. Deposition of amorphous aluminium powder using cold spray. *Thermal Spray 2012: Proceedings from the Int. Thermal Spray Conf. and Exposition*. Houston, 2012, pp. 22–24.

Lee K.A., Jung D.J., Park D.Y., Kang W.G., Lee J.K., Kim H.J. Study on the fabrication and physical properties of cold sprayed, Cu-based amorphous coating. *Journal of Physics: Conference Series*, 2009, vol. 144, pp. 12–15.

Li C.-J., Yang G.-J., Gao P.-H., Ma J., Wang Y.-Y., Li C.-X. Characterization of nanostructured WC-codedeposited by cold spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2007, vol. 16, no. 5–6, pp. 1011–1020.

Li W.Y., Zhang C., Li C.J., Liao H.L. Modelling aspects of high velocity impact of particles in cold spraying by explicit finite element analysis. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2009, vol. 18, no. 5–6, pp. 921–933.

Li W.Y., Zhang D.D., Huang C.J., Yin S., Yu M., Wang F.F., Liao H.L. Modelling of impact behaviour of cold spray particles: review. *Surface Engineering*, 2014, vol. 30, no. 5, pp. 299–308.

Pavlov I.S. Determination of the influence of technological parameters of spraying modes on the structure and properties of functional coatings based on Al₂O₃ and Cu obtained by the method of cold gas-dynamic low-pressure spraying. *International Research Journal*, 2023, no. 4 (130), pp. 1–15. (In Russ.)

Rahmati S., Ghaei A. The use of particle/substrate material models in simulation of cold-gas dynamic-spray process. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2014, vol. 23, no. 3, pp. 530–540.

Schmidt T., Assadi H., Gärtnert F., Richter H., Stoltenhoff T., Kreye H., Klassen T. From particle acceleration to impact and bonding in cold spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2009, vol. 18, no. 5–6, pp. 794–808.

Материал поступил в редакцию 17.11.2024

Трубников В.В., Марков В.А., Ганин С.В., Блинов С.А., Левитский А.М., Трофимов А.В., Зверев И.А. Анализ коррозионной стойкости порошковых покрытий для защиты деталей лесных машин // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 336–356. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.336-356

В статье рассматривается эффективность использования защитных коррозионностойких порошковых покрытий, нанесенных на стальные элементы конструкции лесных машин методом холодного газодинамического напыления

(ХГДН). Для нанесения защитных покрытий было изготовлено 32 образца размером 100×20×3 мм из стали марки Ст3сп. В качестве оборудования для напыления использовалась установка ХГДН с низким давлением «Димет-405». В исследовании были рассмотрены 4 вида покрытия: на основе меди – С-01-01; цинка – Z-00-11; никеля – N3-00-02; алюминия с добавлением цинка – А-80-13. Для каждого вида порошкового покрытия был произведен морфологический анализ частиц и определен гранулометрический состав. Полученные образцы испытывались в условиях: соляного тумана, соляного тумана и воздуха и морской воды. Продолжительность коррозионных испытаний составила 720 ч. По результатам испытаний определялись значения коррозионных потерь образцов. Была произведена статистическая обработка полученных данных. Кроме того, был проведен металлографический анализ образцов. Наилучшую коррозионную стойкость во всех испытаниях показали образцы с покрытиями на основе цинка (Z-00-11) и алюминия с цинком (А-80-13). Результаты металлографического анализа показали, что на образцах с покрытиями на основе цинка и алюминия с цинком не было выявлено очагов коррозии стали после завершения испытаний, а коррозионные потери были вызваны истощением защитных покрытий в результате воздействия агрессивной среды. При этом на остальных образцах присутствуют явные очаги коррозии стали. Результаты исследования показали, что для стальных элементов конструкции лесных машин наиболее предпочтительными являются композиционные покрытия на основе цинка и алюминия.

Ключевые слова: коррозия, коррозионные испытания, холодное газодинамическое напыление, коррозионностойкие покрытия, лесное машиностроение.

Trubnikov V.V., Markov V.A., Ganin S.V., Blinov S.A., Levitsky A.M., Trofimov A.V., Zverev I.A. Analysis of corrosion resistance of powder coatings for protection of forestry machine parts. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 336–356 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.336-356

The article considers the efficiency of using protective corrosion-resistant powder coatings applied to steel structural elements of forestry machines by cold gas-dynamic spraying (CGDS). To apply the protective coatings, 32 samples measuring 100×20×3 mm were made of Ст3сп steel. A low-pressure CGDS unit «Димет-405» was used for spraying. The study considered 4 types of coating: copper-based – С-01-01; zinc – Z-00-11; nickel – N3-00-02; aluminum with added zinc – А-80-13. For each type of powder coating, a morphological analysis of the particles was performed and the granulometric composition was determined. The resulting samples were tested under the following conditions: salt fog, salt fog and air, and sea water. The duration of corrosion tests was 720 hours. Based on the test results, the values of corrosion losses of the samples were determined. The obtained data were statistically processed. In addition, a metallographic analysis of the samples was carried out. The best corrosion resistance in all tests was

shown by samples with zinc-based (Z-00-11) and aluminum-zinc (A-80-13) coatings. The results of the metallographic analysis showed that no steel corrosion centers were detected on the samples with zinc-based and aluminum-zinc coatings after the tests were completed, and the corrosion losses were caused by the thinning of the protective coatings as a result of exposure to an aggressive environment. At the same time, obvious steel corrosion centers were present on the remaining samples. The results of the study showed that composite coatings based on zinc and aluminum are the most preferable for steel structural elements of forestry machines.

Keywords: corrosion, corrosion testing, cold gas dynamic spraying, corrosion-resistant coatings, forestry engineering.

ТРУБНИКОВ Виктор Валерьевич – соискатель Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна. SPIN-код: 3756-3397.

191186, ул. Большая Морская, д. 18, Санкт-Петербург, Россия.

TRUBNIKOV Viktor V. – PhD candidate of the Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. SPIN-code: 3756-3397.

191186. Bolshaya Morskaya str. 18. St. Petersburg. Russia.

МАРКОВ Виктор Александрович – доцент кафедры машин автоматизированных систем Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, кандидат технических наук. SPIN-код: 1503-7932.

191186, ул. Большая Морская, д. 18, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: mactor85@mail.ru

MARKOV Viktor A. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Machines and Automated Systems of the Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. SPIN-code: 1503-7932.

191186. Bolshaya Morskaya str. 18. St. Petersburg. Russia. E-mail: mactor85@mail.ru

ГАНИН Сергей Владимирович – директор Высшей школы физики и технологий материалов Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, кандидат технических наук, доцент. SPIN-код: 8871-2200.

194021, ул. Политехническая, д. 19, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: ganin_sv@spbstu.ru

GANIN Sergey V. – PhD (Technical), Director of the Higher School of Physics and Materials Technology of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Associate Professor. SPIN-code: 8871-2200.

194021. Politekhnicheskaya str. 19. St. Petersburg. Russia. E-mail: ganin_sv@spbstu.ru

БЛИНОВ Святослав Алексеевич – инженер Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. SPIN-код: 9757-7380.

194021, ул. Политехническая, д. 19, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: blinov_sa@spbstu.ru

BLINOV Svyatoslav A. – engineer at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. SPIN-code: 9757-7380.

194021. Politekhnicheskaya str. 19. St. Petersburg. Russia. E-mail: blinov_sa@spbstu.ru

ЛЕВИТСКИЙ Алексей Максимович – инженер Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. SPIN-код: 2037-3169.

194021, ул. Политехническая, д. 19, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: levitskij_am@spbstu.ru

LEVITSKY Alexey M. – engineer at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. SPIN-code: 2037-3169.

194021. Politekhnicheskaya str. 19. St. Petersburg. Russia. E-mail: levitskij_am@spbstu.ru

ТРОФИМОВ Александр Викторович – доцент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук, доцент. SPIN-код: 8933-0230.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: agregat9@yandex.ru

TROFIMOV Alexandr V. – PhD (Technical), Associate Professor of Forestry engineering, service and repair department, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 8933-0230.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: agregat9@yandex.ru

ЗВЕРЕВ Игорь Андреевич – доцент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук. SPIN-код: 1126-2121. ORCID: 0000-0002-8163-7489.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: igorzv1997@gmail.com

ZVEREV Igor A. – PhD (Technical), Associate Professor of Forestry engineering, service and repair department, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 1126-2121. ORCID: 0000-0002-8163-7489.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: igorzv1997@gmail.com

4. ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ, ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЕРЕВОПЕРЕРАБОТКИ

УДК 674.048.5

С.Г. Елисеев, Д.В. Дук, В.Н. Ермолин

ФОРМИРОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОЙ ТЕКСТУРЫ ДРЕВЕСИНЫ ЛИСТВЕННЫХ РАССЕЯННО-СОСУДИСТЫХ ПОРОД ЗА СЧЕТ ЛАЗЕРНОЙ ПЕРФОРАЦИИ

Введение. Использование экологически безопасных материалов природного происхождения в строительстве, производстве мебели и предметов интерьера с каждым годом только возрастает. На этом фоне древесина выгодно отличается не только доступностью ресурса, но и достаточно высокими свойствами в сравнении с другими материалами. В производстве мебели и отделочных материалов важным требованием к используемому сырью является внешний вид древесины. При этом эстетически ценные породы древесины, как правило, представлены экзотическими импортными породами либо твердолиственными породами, произрастающими на территории РФ, запасы которых ограничены, поэтому стоимость такой древесины достаточно высока. Использование ценных пород древесины отрицательно сказывается на итоговой себестоимости изделий, и такие товары, как правило, мало представлены в среднем ценовом диапазоне. В то же время даже при использовании ценных пород древесины производителям приходится экспериментировать с различными вариантами сложной отделки, чтобы создать элемент новизны материала.

Большим потенциалом для производства отделочных материалов и предметов интерьера обладает древесина таких распространенных в РФ пород, как береза (*Betula pubescens* Ehrh.) и осина (*Populus tremula* L.). Древесина данных пород имеет достаточно высокие физико-механические свойства, широко доступна, имеет относительно невысокую стоимость за единицу объема. Недостатком указанных пород, который существенно ограничивает их использование, является бледная окраска и невыразительная текстура древесины.

К настоящему времени накоплен обширный опыт в области технологий повышения декоративных свойств древесины, включающий прямое окрашивание путем поверхностного нанесения красителя методом печати [Чимирис, 1997; Беляев и др., 1998; Демина, 2015], браширования [Сафин, Белякова, 2012; Вернигорова, Саденко, 2015; Барташевич и др., 2018; Buksans et al., 2021], пневматическим распылением (сухое, полусухое) [Беляев и др., 1998; Вернигорова, Саденко, 2015], вальцами [Беляев и др., 1998], за счет погружения в ванну с красителем [Беляев и др., 1998; Трубников, 2009; Вернигорова, Саденко, 2015], сквозным пропитыванием в автоклаве [Беляев и др., 1999; Li et al., 2018b; Bahcavandzief, Mihajlovski, 2021], путем торцовой пропитки отдельных сортиментов [Шмидт, 1915; Урецкий и др., 2002; Соколов и др., 2012; Медведев и др., 2021; Саерова и др., 2021], пропитки через ввинченные в древесину штуцеры [Липшанс, Маковскис, 2009], за счет воздействия растворов химически активных веществ, таких как бура, хлористый аммоний, сульфат железа, хлорид железа, медного купороса, двухэтапной обработкой раствором п-фенилендиамина или о-фенилендиамина с последующим окрашиванием солями металлов [Липшанс, Маковскис, 2009; Соколов и др., 2012; Jaxel et al., 2020], термической [Усачев, 2002; Липшанс, Маковскис, 2009; Тарбеева, Рублева, 2020; Baydal et al., 2014], механической и механохимической обработки древесины [Шмидт, 1915; Черненко, Бернат, 1968; Усачев, 2002; Золотарчук и др., 2003; Липшанс, Маковскис, 2009; Трубников, 2009; Кирилина, Ветошкин, 2015; Намятов и др., 2015; Li et al., 2018a; Kudela et al., 2020; Bahcavandzief, Mihajlovski, 2021].

Большинство приведенных выше методов облагораживания древесины, получивших широкое распространение, относятся к поверхностной отделке древесины. К недостаткам таких вариантов отделки можно отнести невозможность в дальнейшем подвергать механической обработке или изготавливать из них фрезерованные изделия сложной формы. Также при эксплуатации поверхностный декоративный слой может легко стираться.

Рассмотренные выше методы повышения декоративных свойств древесины на всю толщину заготовок в большинстве своем не имеют промышленного применения, поскольку сложны, непроизводительны, не обеспечивают стабильного результата в рамках серийного производства. Также при сквозном окрашивании предъявляются высокие требования к проницаемости древесины, которая может иметь низкие значения в силу природных особенностей породы (ядро, спелая древесина) или развития различных пороков, которые могут вызывать снижение проницаемости (ложное ядро, побурение и др.).

Ранее нами была исследована возможность повышения декоративных свойств древесины пихты сибирской за счет ее перфорации лазером и последующего избирательного окрашивания красителем в автоклаве [Ермолин и др., 2022; Елисеев и др., 2023]. Предлагаемая технология основана на прожигании в древесине глубоких или даже сквозных каналов по заранее разработанной схеме и последующей пропитке перфорированной древесины текстильным красителем. В перфорированной древесине краситель прежде всего проникает в прожжённые лазером каналы и затем окрашивает прилегающую древесину. Это позволяет обеспечить локальное окрашивание древесины и создать чередование окрашенных и не окрашенных зон, тем самым формируя искусственную текстуру древесины. Диаметр прожигаемых отверстий составляет около 0,2 мм, поэтому они слабо различимы невооруженным глазом на фоне окрашенной древесины, а при финальной отделке изделий становятся совершенно незаметными.

С учетом вышеизложенного было выдвинуто предположение, что описанный метод избирательного окрашивания древесины может быть применен и при формировании искусственной текстуры рассеянно-сосудистых пород, имеющих относительно высокую проницаемость древесины, таких как береза и осина. При этом использование древесины с большей плотностью, чем у пихты (*Abies sibirica* Ledeb.) также будет способствовать получению стабильно малых диаметров лазерных перфораций [Nath et al., 2020].

Материалы и методика исследования. На первом этапе исследований необходимо было установить особенности распространения пропиточно-го раствора в древесине в зависимости от вида древесной породы и структурного направления. Для этих целей из березовых и осиновых пиломатериалов размерами $3000 \times 150 \times 40$ мм с исходной влажностью 9–10% были изготовлены образцы размерами $300 \times 150 \times 40$ мм (вдоль волокон×ширина×толщина). В полученных образцах производилась перфорация древесины лазером с использованием полупромышленного лазерного гравера CERTON 4040 Standard. На середине длины образцов при помощи лазера прожигалось 10 отверстий, расположенных в один ряд поперек волокон. Расстояние между отверстиями составляло 15 мм, диаметр прожигаемых отверстий – около 0,2 мм (рис. 1). Расстояние между отверстиями определялось исходя из полученных предварительных данных по ширине распространения фронта пропитки поперек волокон. Глубина прожигаемых отверстий составляла 20 мм.

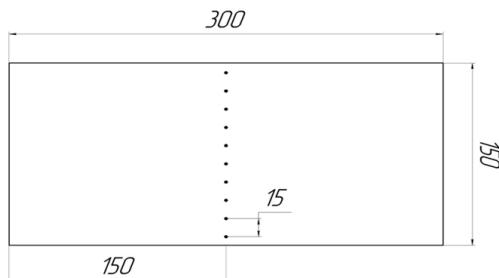


Рис. 1. Схема размещения прожигаемых каналов в образцах древесины

Fig. 1. Pattern of laser-cut slots in wood samples

Поскольку древесина березы и осины имеет относительно высокую поперечную проницаемость, для предотвращения пропитки образцов сплошным фронтом с поверхности перед лазерной перфорацией все поверхности образцов гидроизолировались при помощи нанесения одного слоя ПФ-115 (универсальная алкидная эмаль, предназначена для внутренних и внешних работ, устойчива к воздействию воды, бытовых моющих средств и технических масел), расход – 90–120 гр/м².

После перфорации лазером образцы древесины пропитывались в автоклаве при избыточном давлении 3% раствором кислотного металлокомплексного красителя «Совелан коричневый М». Данный краситель обладает высокой светостойкостью и надежно фиксируется в древесине, не вымываясь даже при непосредственном контакте с водой.

Определение оптимальных режимных параметров пропитки производилось в соответствии с двухфакторным планом эксперимента. Режимные параметры пропитки варьировались в следующих значениях: избыточное давление – 0,1; 0,2; 0,3 МПа, продолжительность пропитки – 10; 20; 30 мин. После пропитывания образцы выдерживались в комнатных условиях в течение 24 ч. После выдержки образцы помещались в сушильный шкаф, где высушивались до 9±3%.

Для проявления локально окрашенных участков древесины высушенные образцы строгались на рейсмусовом станке на глубину 2 мм. После этого при помощи микроскопа МБС-10, оснащенного камерой Scopetek DCM-310, с использованием программного обеспечения ScopePhoto производилось измерение длины и ширины фронта пропитки с точностью до 0,1 мм.

Результаты исследования. Опытные пропитки перфорированной древесины березы показали следующие результаты (табл. 1, рис. 2).

Таблица 1

Продвижение фронта пропитки в древесине березы вдоль волокон

The advance of the impregnation front in birch wood along the fibers

Давление, МПа	Время, мин	Количество измерений, ед.	Средние значения, мм	Среднеквадратичное отклонение	Коэффициент вариации, %	Точность, %
0,1	10	45	119,7	36,5	30,5	4,55
0,1	20	45	179,3	59,7	33,3	4,96
0,1	30	45	199,8	56,0	28	4,17
0,2	10	45	174,3	40,3	23,1	3,44
0,2	20	45	261,3	33,4	12,8	1,91
0,2	30	45	277,5	24,3	8,7	1,30
0,3	10	45	186,1	42,2	22,6	3,37
0,3	20	45	277,7	32,2	11,6	1,73
0,3	30	45	291,5	14,6	5	0,75

Наименьшие значения фронта пропитки вдоль волокон ожидаемо наблюдались при давлении 0,1 МПа, в то время как при давлении 0,2–0,3 МПа размер окрашенных участков был примерно в 1,5 раза больше. Сравнение размеров пропитанных участков при давлениях пропитки 0,2 и 0,3 МПа по всем продолжительностям пропитки показало незначительные различия в пределах 5–7%, однако сопоставление выборок с использованием критерия Стьюдента достоверность различия показателей не подтвердило. В целом при всех вариантах пропитки основная площадь окрашенного участка формировалась в первые 10–20 минут пропитки. Пропитка же от 20 до 30 минут обеспечивала незначительное увеличение пропитанного участка в пределах 5–6%. Отдельно необходимо отметить, что на части пропитанных образцов наблюдалось эксцентричное окрашивание относительно прожжённого лазером отверстия (рис. 3).

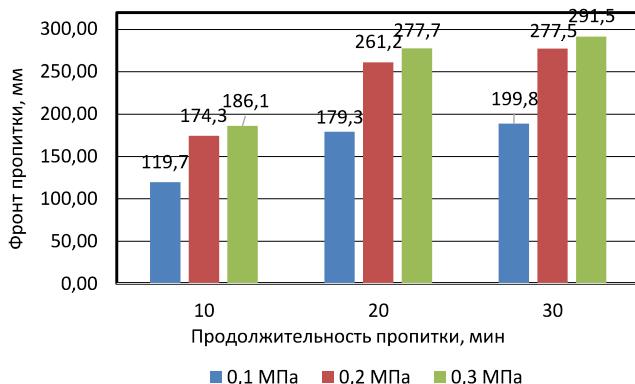


Рис. 2. Пропитка древесины березы вдоль волокон

Fig. 2. Impregnation of birch wood along the fibers



Рис. 3. Образец древесины березы с эксцентричной локализацией окрашенных зон

Fig. 3. A sample of birch wood with an eccentric localization of colored zones

Измерение окрашенных зон в древесине березы поперек волокон выявило следующее (табл. 2, рис. 4). В среднем ширина пропитанных участков поперек волокон составила от 1,06 до 1,55 мм. Наименьшие значения ширины пропитанных зон (аналогично пропитке вдоль волокон) наблюдались при давлении 0,1 МПа и продолжительности пропитки 10 мин, а наибольшие – при 30 мин и давлении 0,3 МПа. При 10-минутной пропитке разница между 0,2 МПа и 0,3 МПа достигала 10%, а при 20–30-минутной пропитке разница уже находилась в пределах точности опыта (не более 2%). При этом за первые 10 минут пропитки окрашивалось от 70% до 90% итоговой ширины окрашенной зоны.

Таблица 2

Продвижение фронта пропитки в древесине березы поперек волокон

The advance of the impregnation front in birch wood across the fibers

Давление, МПа	Время, мин	Количество измерений, ед.	Средние значения, мм	Среднеквадратичное отклонение	Коэффициент вариации, %	Точность, %
0,1	10	45	1,06	0,083	7,92	1,18
0,1	20	45	1,23	0,036	2,95	0,44
0,1	30	45	1,36	0,112	8,30	1,24
0,2	10	45	1,29	0,073	5,72	0,85
0,2	20	45	1,46	0,162	11,15	1,66
0,2	30	45	1,52	0,136	8,98	1,34
0,3	10	45	1,42	0,093	6,55	0,98
0,3	20	45	1,47	0,076	5,18	0,77
0,3	30	45	1,55	0,112	7,28	1,08

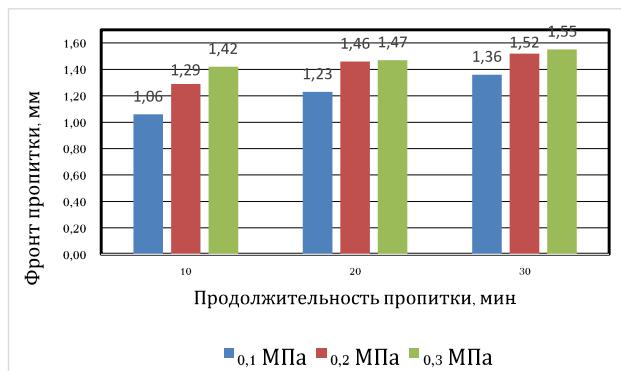


Рис. 4. Пропитка древесины березы поперек волокон

Fig. 4. Impregnation of birch wood across the fibers

Пропитка перфорированной осиновой древесины показала резкое различие размеров окрашенных зон в заболонной и спелодревесной частях образцов (рис. 5). Размер окрашенных зон вдоль волокон в заболонной древесине составил от 124,4 до 236,9 мм, в то время как в спелой древесине окрашенные участки были в 10–15 раз меньше – от 9,8 до 23,94 мм. Поперечные размеры окрашенных зон в заболони и спелой древесине отличались на 0,04–0,12 мм (от 3 до 11%). С учетом полученных данных был сделан промежуточный вы-

вод, что из-за резких различий проницаемости древесины осины заболонной и спелодревесных частей древесина данной породы мало подходит для контролируемого формирования текстуры древесины путем лазерной перфорации без дифференциации древесины по проницаемости. С учетом того, что в производственных условиях изготовление заготовок только из заболонной или из спелой древесины практически невозможно, то использование осиновой древесины для этих целей малоприменимо. Поэтому в дальнейших исследованиях как более перспективное сырье для реализации разрабатывающейся технологии использовалась только древесина березы.



Рис. 5. Локально окрашенный образец осины, состоящий из заболонной (верхняя половина) и спелодревесной (нижняя половина) частей

Fig. 5. Locally colored aspen sample consisting of sapwood (upper half) and ripe wood (lower half) parts

Для оценки влияния варьируемых параметров процесса пропитки древесины березы в соответствии с планом двухфакторного эксперимента (табл. 3) были построены диаграммы влияния входных параметров пропитки на выходные параметры – размеры локально окрашиваемых зон (рис. 6).

Таблица 3

Уровни варьирования двухфакторного эксперимента

Levels of variation of the two-factor experiment

№	Фактор	обозначение	Уровни варьирования		
			-1	0	1
1	Давление, МПа	P/ Factor A	0,1	0,2	0,3
2	Продолжительность пропитки, мин	T/ Factor B	10	20	30

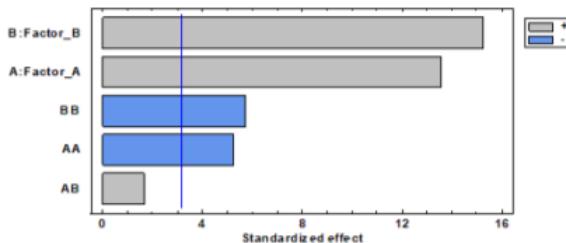


Рис. 6. Уровни влияния факторов на продвижение фронта пропитки вдоль волокон древесины березы

Fig. 6. Levels of influence of factors on the advance of the impregnation front along the fibers birch wood

Из анализа диаграммы, представленной на рис. 6, мы видим, что при пропитке древесины березы на размер фронта пропитки равное влияние оказывают как продолжительность пропитки, так и параметры давления.

Для выбора оптимальных параметров автоклавной пропитки перфорированной древесины березы в зависимости от требуемых размеров окрашиваемых зон была построена поверхность отклика, представленная на рис. 7, описываемая уравнением регрессии (1)

$$\begin{aligned}
 \text{Var_1} = & -137,508 + 1447,03 * \text{Factor_A} + 16,045 * \text{Factor_B} - \\
 & - 2865,4 * \text{Factor_A}^2 + 6,335 * \text{Factor_A} * \text{Factor_B} - \\
 & - 0,31248 * \text{Factor_B}^2
 \end{aligned} \quad (1)$$

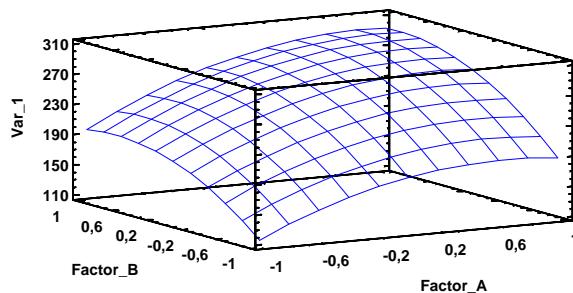


Рис. 7. Поверхность отклика выходного параметра:
 Factor_A – давление, МПа; Factor_B – время пропитки, мин;
 Var_1 – фронт пропитки

Fig. 7. The response surface of the output parameter:
 Factor_A – pressure, MPa; Factor_B – impregnation time, min;
 Var_1 – impregnation front

Для аprobации полученных данных было решено провести опытные пропитки древесины березы. Для проектирования рисунка и подбора режимных параметров пропитки использовали уравнение регрессии, полученное на основе проведенных экспериментальных исследований.

Пропитка образцов осуществлялась по ранее описанной методике текстильным красителем. Отличительной особенностью процесса подготовки образцов была иная схема размещения прожигаемых отверстий. Размещение прожигаемых отверстий определялось с учетом запроектированного рисунка. Режимные параметры пропитки определялись в соответствии с запроектированными размерами пропитываемых зон.

Полученные в ходе опытной пропитки результаты показали (рис. 8), что несмотря на достаточно высокую изменчивость локальной проницаемости древесины березы, в общем и целом с определенными допусками разрабатываемая технология позволяет создавать природоподобный рисунок с заданной конфигурацией.

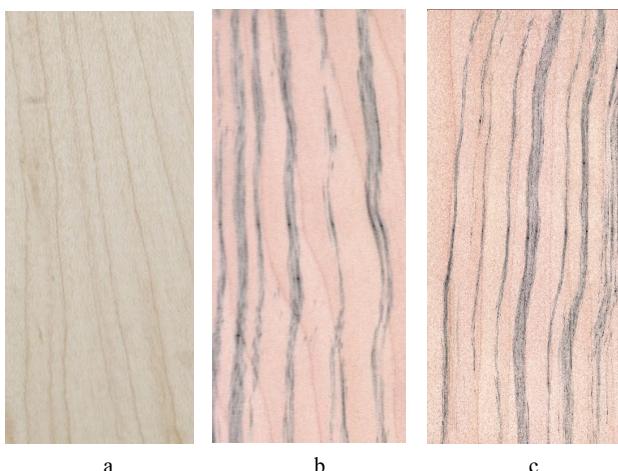


Рис. 8. Древесина березы: а – натуральный внешний вид; б, с – с искусственной текстурой, сформированной за счет лазерной перфорации и пропитки красителем

Fig. 8. Birch wood: a – natural appearance; b, c – with an artificial texture formed by laser perforation and dye impregnation

Заключение. На основании проведенных исследований установлена возможность формирования искусственной текстуры древесины березы за счет применения лазерной перфорации и последующей автоклавной пропитки древесины красителем.

В ходе исследований определено, что предлагаемая технология не подходит для управляемого формирования искусственной текстуры древесины осины из-за резкого различия проницаемости заболонной и спелодревесной частей ствола дерева.

Для древесины березы получены зависимости, которые позволяют проектировать искусственную текстуру древесины с учетом размещения прожигаемых каналов и режимных параметров пропитки древесины.

Разрабатываемая технология может быть с успехом применена в производстве погонажных изделий, строганого шпона, различных элементов отделки и предметов интерьера.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографические ссылки

Барташевич А.А., Игнатович Л.В., Шетыко С.В., Гайдук С.С. Декорирование элементов мебели и столярно-строительных изделий методом тиснения текстуры древесины и имитацией резьбы // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2018. № 2. С. 197–203.

Беляев Е.Ю., Суходолова А.П., Соколов В.Л., Ермолин В.Н. Исследование крашения древесины. 1. Крашение водными растворами аминов // Химия растительного сырья. 1998. № 3. С. 55–57.

Беляев Е.Ю., Ермолин В.Н., Мелешко А.В., Соколов В.Л. Крашение древесины // Химия растительного сырья. 1999. № 2. С. 5–18.

Вернигорова В.Н., Саденко С.М. Технология и оборудование защитно-декоративных покрытий древесины и древесных материалов: учеб. пособ. Пенза: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2015. 296 с.

Демина С.С. Современная технология декорирования методом ультрафиолетовой печати на древесине и композиционных древесинных материалах // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2015. №42. С. 42–44.

Елисеев С.Г., Ермолин В.Н., Дук Д.В. Применение лазерной перфорации для повышения декоративных свойств древесины пихты сибирской (*Abies sibirica*) // ИВУЗ. Лесной журнал. 2023. № 5(395). С. 151–163. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-151-163.

Ермолин В.Н., Елисеев С.Г., Дук Д.В. Способ формирования текстуры древесины. Патент № 2764696С1 Российская Федерация, МПК B27K 3/08, № 2021113108; заявл. 05.05.2021; опубл. 19.01.2022. Бюл. № 2. 7 с.

Золотарчук С.В., Кушитин А.С., Гупало О.П. Применение водорастворимых красителей для крашения древесины мягких лиственных пород // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2003. № 7. С. 108–109.

Кирилина А.В., Ветошкин Ю.И. Художественно-декоративный вид отделки деталей из древесины лиственных пород методом тиснения // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. С. 262.

Липшанс Э., Маковскис Я. Способ окрашивания круглого лесоматериала. Патент № 2375171С2 Российская Федерация, МПК B27K 5/02, № 2007104971/02; заявл. 09.02.2007; опубл. 10.12.2009. Бюл. № 34. 5 с.

Медведев И.Н., Паринов Д.А., Шамаев В.А. Сквозная пропитка древесины с торца под давлением различными составами // Современные машины, оборудование и ИТ-решения лесопромышленного комплекса: теория и практика: мат. Всерос. науч.-практ. конф. Воронеж, 2021. С. 245–249. DOI: 10.34220/MMEITSIC2021_245-249.

Намятов А.В., Баяндин М.А., Ермолин В.Н. Получение криволинейных заготовок из древесины березы с высокими декоративными свойствами // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 8-2. С. 301–304. DOI: 10.12737/15542.

Саерова К.В., Шайхутдинова А.Р., Сафин Р.Р. Искусственное состаривание древесины методом браширования // Научные исследования и разработки в области дизайна и технологий: мат. Всерос. науч.-практ. конф. Кострома, 2021. Ч. 1. С. 146–148.

Сафин Р.Р., Белякова Е.А. Усовершенствование технологии термомодификации древесины ВIKOS-ТМТ // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15, № 13. С. 134–136.

Соколов В.Л., Баяндин М.А., Звонарева П.П. Способ облагораживания древесины. Патент № 2470770С1 Российская Федерация, МПК B27K 5/02, B27K 3/08, № 2011128459/13; заявл. 08.07.2011; опубл. 27.12.2012. Бюл. № 36. 5 с.

Тарбееева Н.А., Рублева О.А. Обоснование технологических возможностей способа упрочняющей декоративной обработки низкотоварной древесины // Лесотехнический журнал. 2020. Т. 10, № 3. С. 145–154. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.3/14.

Трубников Н.А. Разработка технологии улучшения текстуры древесины мягких лиственных пород избирательным окрашиванием и прессованием: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2009. 166 с.

Урецкий Е.Е., Довгань А.С., Калугин В.А., Катульский Э.Ю. Устройство для пропитки древесины. Патент на полезную модель № 24415U1 Российская Федерация, МПК B27K 3/08, № 2002107807/20; заявл. 01.04.2002; опубл. 10.08.2002. Бюл. № 22. 12 с.

Усачев С.В. Способ окрашивания древесины. Патент № 2194613С1 Российская Федерация, МПК B27K 5/02, B44D 5/00, D06P 3/60, № 2001119669/04; заявл. 16.07.2001; опубл. 20.12.2002. Бюл. № 35. 7 с.

Черненко С.А., Бернат И.А. Облагораживание древесины березы красителями методом торцевой пропитки под давлением. М.: ЦНИИ информации и

техн.-экон. исследований по лесной, целлюлозно-бум. и деревообрабатывающей пром-сти, 1968. 20 с.

Чимирис Ю.В. Способ облагораживания деревянных заготовок. Патент № 2099180С1 Российская Федерация, МПК B27K 5/00, B27K 9/00, №95116984/04; заявл. 05.10.1995; опубл. 20.12.1997. Бюл. № 8. 5 с.

Шмидть В. Протрава или окрашивания дерева в различные цвета и подделка под благородные по испытанным рецептам: руководство для мастерских и школ / под ред. К. Маркграфа. М.: Издательство А. Ф. Суховой, 1915. 28 с.

Bahchevandziew K., Mihajlovski N. Surface retention of polyurethane and acrylic coatings on impregnated spruce wood (*Picea abies* Karst) and comparison with some wood preservatives // Baltic Forestry. 2021. Vol. 27, no. 2. P. 266-270. DOI: 10.46490/BF223.

Baysal E., Degirmentepe S., Simsek H. Some surface properties of thermally modified scots pine after artificial weathering // Maderas. Ciencia y tecnología. 2014. Vol. 16, no. 3. P. 355–364. DOI: 10.4067/s0718-221x2014005000028.

Buksans E., Laiveniece L., Lubinskis V. Solid wood surface modification by charring and its impact on reaction to fire performance // Engineering for Rural Development. 2021. Vol. 20, no. 26. P. 899–905. DOI: 10.22616/ERDev.2021.20.TF203.

Jaxel J., Liebner F.W., Hansmann C. Solvent-free dyeing of solid wood in water-saturated supercritical carbon dioxide // ACS Sustainable Chemistry & Engineering. 2020. Vol. 8, no. 14. P. 5446–5451. DOI: 10.3390/coatings10010077.

Kúdela J., Kubovský I., Andrejko M. Surface properties of beech wood after CO₂ laser engraving // Coatings. 2020. Vol. 10, iss. 1. Art. no. 77. DOI: 10.3390/coatings10010077.

Li R., Xu W., Wang X.D.A., Wang C.G. Modeling and predicting of the color changes of wood surface during CO₂ laser modification // Journal of Cleaner Production. 2018a. Vol. 183. P. 818–823. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.194.

Li Y.B., Shen J., Wang J.X., Deng F.J. Study on decorative properties of poplar wood impregnated with low molecular weight UF resin // Forest Engineering. 2018b. Vol. 34, iss. 1. P. 36–40. DOI: 10.5555/20183154218.

Nath S., Waugh D., Ormondroyd G., Spear M., Pitman A., Sahoo S., Curling S., Mason P. CO₂ laser interactions with wood tissues during single pulse laser-incision // Optics & Laser Technology. 2020. Vol. 126. Art. no. 106069. DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106069.

References

Bahchevandziew K., Mihajlovski N. Surface retention of polyurethane and acrylic coatings on impregnated spruce wood (*Picea abies* Karst) and comparison with some wood preservatives. *Baltic Forestry*, 2021, vol. 27, no. 2, pp. 266-270. DOI: 10.46490/BF223.

Bartashevich A.A., Ignatovich L.V., Shet'ko S.V., Gayduk S.S. Decoration of furniture elements and joinery products by stamping wood texture and imitation carving. *Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, nature management and processing of renewable resources*, 2018, no. 2, pp. 197–203. (In Russ.)

Baysal E., Degirmentepe S., Simsek H. Some surface properties of thermally modified scots pine after artificial weathering. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 2014, vol. 16, no. 3, pp. 355–364. DOI: 10.4067/s0718-221x2014005000028

Belyaev E.Yu., Suhodolova A.P., Sokolov V.L., Ermolin V.N. Study of wood dyeing. 1. Dyeing with aqueous solutions of amines. *Chemistry of vegetable raw materials*, 1998, no. 3, pp. 55–57. (In Russ.)

Belyaev E.Yu., Ermolin V.N., Meleshko A.V., Sokolov V.L. Wood dyeing. *Chemistry of plant raw materials*, 1999, no. 2, pp. 5–18. (In Russ.)

Buksans E., Laiveniece L., Lubinskis V. Solid wood surface modification by charring and its impact on reaction to fire performance. *Engineering for Rural Development*, 2021, vol. 20, no. 26, pp. 899–905. DOI: 10.22616/ERDev.2021.20.TF203.

Chernenko S.A., Bernat I.A. Refinement of birch wood with dyes by the method of end impregnation under pressure. Moscow: Central scientific research. in-t of information and techn.-econ. research on the forest, pulp-paper and woodworking industry, 1968. 20 p. (In Russ.)

Chimiris Yu.V. Sposob oblagonazhivaniya derevyannykh zagotovok. Patent № 2099180C1 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B27K 5/00, B27K 9/00, №95116984/04; decl. 05.10.1995; publ. 20.12.1997. Bull. № 8. 5 p. (In Russ.)

Demina S.S. Modern technology of decoration by the method of ultraviolet printing on wood and composite wood materials. *Actual problems of the forest complex*, 2015, no. 42, pp. 42–44. (In Russ.)

Eliseev S.G., Ermolin V.N., Duk D.V. The use of laser perforation to enhance the decorative properties of Siberian fir wood (*Abies sibirica*). *IVUZ. Forestry journal*, 2023, no. № 5(395), pp. 151–163. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-151-163. (In Russ.)

Ermolin V.N., Eliseev S.G., Duk D.V. Sposob formirovaniya tekstury drevesiny. Patent № 2764696C1 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B27K 3/08, № 2021113108; decl. 05.05.2021; publ. 19.01.2022. Bull. № 2. 7 p. (In Russ.)

Jaxel J., Liebner F.W., Hansmann C. Solvent-free dyeing of solid wood in water-saturated supercritical carbon dioxide. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, vol. 8, no. 14, pp. 5446–5451. DOI: 10.3390/coatings10010077.

Kirilina A.V., Vetoshkin Yu.I. Artistic and decorative type of finishing of hardwood parts by embossing. *Modern problems of science and education*, 2015, no. 1-1, pp. 262. (In Russ.)

Kúdelá J., Kubovský I., Andrejko M. Surface properties of beech wood after CO₂ laser engraving. *Coatings*, 2020, vol. 10, no. 1, art.no. 77. DOI: 10.3390/coatings10010077.

Li R., Xu W., Wang X.D.A., Wang C.G. Modeling and predicting of the color changes of wood surface during CO₂ laser modification. *Journal of Cleaner Production*, 2018a, vol. 183, pp. 818–823. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.194.

Li Y.B., Shen J., Wang J.X., Deng F.J. Study on decorative properties of poplar wood impregnated with low molecular weight UF resin. *Forest Engineering*, 2018b, vol. 34, no. 1, pp. 36–40. DOI: 10.5555/20183154218.

Lipshans E., Makovskis Ya. Sposob okrashivaniya kruglogo lesomateriala. Patent № 2375171C2 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B27K 5/02, № 2007104971/02; decl. 09.02.2007; publ. 10.12.2009. Bull. № 34. 5 p. (In Russ.)

Medvedev I.N., Parinov D.A., Shamaev V.A. Through impregnation of wood from the end face under pressure with various compositions. *Modern machines, equipment and IT solutions of the timber industry complex: theory and practice*: mat. of All-Russ. sci.-pract. conf. Voronezh, 2021, pp. 245–249. DOI: 10.34220/MMEITSIC2021_245-249. (In Russ.)

Namyatov A.V., Bayandin M.A., Ermolin V.N. Obtaining curved billets from birch wood with high decorative properties. *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2015, vol. 3, no. 8-2, pp. 301–304. DOI: 10.12737/15542. (In Russ.)

Nath S., Waugh D., Ormondroyd G., Spear M., Pitman A., Sahoo S., Curling S., Mason CO₂ laser interactions with wood tissues during single pulse laser-incision. *Optics & Laser Technology*, 2020, vol. 126, art. no. 106069. DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106069.

Saerova K.V., Shaykhutdinova A.R., Safin R.R. Artificial aging of wood by brushing. *Research and development in the field of design and technology*: mat. of All-Russ. sci.-pract. conf. Kostroma, 2021, vol. 1, pp. 146–148. (In Russ.)

Safin R.R., Belyakova E.A. Improvement of BIOS-TMT wood thermomodification technology. *Bulletin of Kazan Technological University*, 2012, vol. 15, no. 13, pp. 134–136. (In Russ.)

Shmidt V. Mordant or staining wood in various colors and forgery for noble ones according to proven recipes: a guide for workshops and schools / ed. K. Markgraf. Moscow: Izdatel'stvo A. F. Sukhovoy, 1915. 28 p. (In Russ.)

Sokolov V.L., Bayandin M.A., Zvonareva P.P. Sposob oblagorazhivaniya drevesiny. Patent № 2470770C1 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B27K 5/02, B27K 3/08, № 2011128459/13; decl. 08.07.2011; publ. 27.12.2012. Bull. № 36. 5 p. (In Russ.)

Tarbeeva N.A., Rubleva O.A. Substantiation of technological possibilities of the method of reinforcing decorative processing of low-grade wood. *IVUZ. Forestry journal*, 2020, vol. 10, no. 3, pp. 145–154. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.3/14. (In Russ.)

Trubnikov N.A. Development of technology for improving the texture of soft hardwood by selective staining and pressing: diss. ... Candidate of Technical Sciences. Voronezh, 2009. 166 p. (In Russ.)

Uretskiy E.E., Dovgan' A.S., Kalugin V.A., Katul'skiy E.Yu. Ustroystvo dlya propitki drevesiny. Patent na poleznuyu model' № 24415U1 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B27K 3/08, № 2002107807/20; decl. 01.04.2002; publ. 10.08.2002. Bull. no. 22. 12 p. (In Russ.)

Usachev S.V. Sposob okrashivaniya drevesiny. Patent № 2194613C1 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B27K 5/02, B44D 5/00, D06P 3/60, №2001119669/04; decl. 16.07.2001; publ. 20.12.2002. Bull. № 35. 7 p. (In Russ.)

Vernigorova V.N., Sadenko S.M. Technology and equipment of protective and decorative coatings of wood and wood materials: textbook. Penza: Penza State University of Architecture and Construction, 2015. 296 p. (In Russ.)

Zolotarchuk S.V., Kushpit A.S., Gupalo O.P. Application of water-soluble dyes for dyeing soft hardwood wood. Actual problems of the forest complex, 2003, no. 7, pp. 108–109. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 05.12.2024

Елисеев С.Г., Ермолин В.Н., Дук Д.В. Формирование искусственной текстуры древесины лиственных рассеянно-сосудистых пород за счет лазерной перфорации // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 357–374. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.357-374

Береза и осина являются наиболее распространенными лиственными породами на территории Российской Федерации. К недостаткам указанных пород можно отнести бледную окраску и невыразительную текстуру древесины. Одним из вариантов облагораживания такой древесины является формирование искусственной текстуры, которая обеспечит повышение декоративных свойств древесины, что позволит использовать ее в том числе для производства отделочных материалов и предметов интерьера, к которым предъявляются повышенные требования в части эстетических свойств. В представленной работе исследована возможность формирования искусственной текстуры древесины березы и осины за счет ее перфорации лазером с последующей автоклавной пропиткой текстильным красителем. Предлагаемый способ заключается в прожигании лазером каналов в древесине по специальной схеме (зависит от проекта текстуры) через которые при автоклавной пропитке происходит локальное окрашивание древесины. Текстура формируется за счет чередования окрашенных и не окрашенных участков на всю толщину заготовок. В целях обеспечения регулируемых размеров окрашиваемых локальных участков в древесине в работе исследованы особенности распространения пропиточного раствора в перфорированной лазером древесине. В ходе исследований установлено, что древесина осины из-за различной проницаемости спелой древесины и заболони мало пригодна для контролируемого формирования текстуры по предлагаемой технологии. Для древесины березы подтверждена возможность управляемого формирования

искусственной текстуры древесины за счет лазерной перфорации с последующей ее пропиткой текстильным красителем. Получены зависимости формирования размеров окрашенных зон, прилегающих к лазерным перфорациям, от структурного направления, давления и продолжительности автоклавной пропитки красителем.

Ключевые слова: береза, осина, пропитка, лазер, текстура, искусственная текстура, крашение древесины.

Eliseev S.G., Duk D.V., Ermolin V.N. Formation of artificial wood texture of deciduous diffuse vascular rocks due to laser perforation. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 357–374 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.357-374

Birch and aspen are the most common hardwoods in the Russian Federation. The disadvantages of these breeds include the pale color and featureless texture of the wood. One of the ways to refine such wood is to form an artificial texture. The artificial texture will provide an increase in the decorative properties of wood, which will expand the scope of its use, including for the production of finishing materials and interior items, which are subject to increased requirements in terms of aesthetic properties. In the presented work, the possibility of forming an artificial texture of birch and aspen wood due to its laser perforation followed by autoclave impregnation with a textile dye is investigated. The proposed method consists in laser-burning channels in wood according to a special scheme (depending on the texture design) through which local staining of wood occurs during autoclave impregnation. The texture is formed by alternating colored and unpainted areas over the entire thickness of the workpieces. In order to ensure the adjustable size of the local areas to be painted in wood, the paper examines the distribution features of the impregnation solution in laser-perforated wood. In the course of research, it was found that aspen wood, due to the different permeability of ripe wood and sapwood, is not suitable for controlled texture formation using the proposed technology. For birch wood, the possibility of controlled formation of artificial wood texture by laser perforation followed by its impregnation with textile dye has been confirmed. The dependences of the formation of the sizes of the colored zones adjacent to the laser perforations are obtained depending on the structural direction, pressure and duration of autoclave impregnation with the dye.

Keywords: birch, aspen, impregnating, laser, texture, artificial texture, wood dying.

ЕЛИСЕЕВ Сергей Геннадьевич – старший преподаватель Сибирского государственного университета науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва, кандидат технических наук. ResearcherID: ABF-2131-2020. ORCID: 0000-0002-7746-0158.

660031, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия. E-mail: s-555s@yandex.ru

ELISEEV Sergey G. – PhD (Technical), Senior Lecturer of the Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. ResearcherID: ABF-2131-2020. ORCID: 0000-0002-7746-0158.

660031. Av. named after the newspaper «Krasnoyarsk Worker», 31. Krasnoyarsk. Russia. E-mail: s-555s@yandex.ru

ДУК Данил Владимирович – лаборант, аспирант Сибирского государственного университета науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва. ResearcherID: AIF-4170-2022. ORCID 0000-0001-9821-0927.

660031, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия. E-mail: daniel211199ler@mail.ru

DUK Danil V. – laboratory assistant, PhD student, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. ResearcherID: AIF-4170-2022. ORCID: 0000-0001-9821-0927.

660031. Av. named after the newspaper «Krasnoyarsk Worker», 31. Krasnoyarsk. Russia. E-mail: daniel211199ler@mail.ru

ЕРМОЛИН Владимир Николаевич – профессор Сибирского государственного университета науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва, доктор технических наук. ResearcherID: X-9597-2019. ORCID: 0000-0002-2113-4142

660031, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия. E-mail: vnermolin@yandex.ru

ERMOLIN Vladimir N. – DSc (Technical), Professor of the Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. ResearcherID: X-9597-2019. ORCID: 0000-0002-2113-4142.

660031. Av. named after the newspaper «Krasnoyarsk Worker», 31. Krasnoyarsk. Russia. E-mail: vnermolin@yandex.ru

А.А. Богомолов, Е.И. Молодых, Е.А. Галкина, О.А. Куницкая,
А.А. Хохлов, Ю.Л. Пушков, Н.Д. Горюнов, А.В. Андронов, Е.Г. Хитров

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ
ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ КОРЫ ДРЕВЕСИНЫ
НА СНИМКЕ ПОПЕРЕЧНОГО РАСПИЛА**

Введение. Наличие точных сведений о предмете труда позволяет принимать эффективные решения, относящиеся к выполнению самых различных операций лесоскладских работ. Информация о коре, на которую может приходиться до 20% объема сортимента, уточняет квадратиметрическую оценку лесоматериалов, поступающих на предприятие, на стадии сортировки и может в дальнейшем использоваться при оптимизации планирования производственного цикла. С учетом качественных и размерных характеристик предмета труда становится возможным назначить оптимальную схему переработки сортиментов и производства продукции [Беляев, 2023]. Важно, что сведения о толщине коры также позволяют настроить окорочное оборудование и минимизировать долю образующихся отходов в случае индивидуальной окорки, а в случае групповой окорки – точнее планировать время обработки и повысить качество лесоматериалов после нее [Kunickaya et al., 2022].

Вместе с тем доля объема, приходящегося на кору, а также толщина коры отличаются изменчивостью даже для лесоматериалов одной породы древесины. Изменчивая форма поперечного сечения ствола дерева дополнительно усложняет определение и оценку доли коры. Способы определения характеристик коры на лесоматериалах нуждаются в дальнейшем совершенствовании [Беляев, 2023].

С развитием цифровых технологий были решены многие актуальные задачи лесного комплекса. В частности, представлены решения в области автоматизированного определения размерных и качественных характеристик лесоматериалов на основе обработки цифровых снимков [Kunickaya et al., 2022; Wang et al., 2024]. На настоящем этапе стали доступны инструменты искусственного интеллекта и глубокого обучения, способные справляться с нетривиальными задачами распознавания особенностей предмета труда, изученные, в основном, за рубежом. Подобные решения обладают потенци-

алом для автоматической сегментации и оценки характеристик коры по снимкам, однако современное состояние проблематики требует дальнейшей проработки [Robert et al., 2020; Kim et al., 2022; Han et al., 2023; Wang, 2024]. Таким образом, авторы полагают, что исследования, направленные на подготовку инновационных решений, использующих глубокое обучение, актуальны с точки зрения замещения импортных технологий и повышения эффективности лесопромышленного комплекса нашей страны.

Целью исследования является разработка и апробация архитектуры модели глубокого обучения на основе сверточной искусственной нейронной сети для определения доли коры на цифровом снимке поперечного распила древесины.

Методология и методы исследования. Результаты работы получены с использованием методов технического зрения и глубокого обучения. При разработке архитектуры модели использована справочная документация искусственных нейронных сетей Faster R-CNN, RPN, Mask R-CNN, Segment Anything. При программной реализации модели в исследовательских целях использованы модели искусственных нейронных сетей с открытым исходным кодом Mask R-CNN и Segment Anything. Обучение и валидация модели проведены с использованием авторского набора цифровых снимков поперечных распилов лесоматериалов, доступного в репозитории [Инструменты..., 2025]. Для проведения экспериментов реализован стенд, программная часть которого выполнена на языке Python в фрейм-ворке Pytorch [Инструменты..., 2025]; аппаратная часть стенда включала в себя графическую карту Nvidia GeForce RTX 4060 с поддержкой технологии CUDA 11.3.

Результаты исследования. Разработка модели глубокого обучения. Изложим основные этапы разработки и особенности модели глубокого обучения в нашем исследовании. Применительно к решаемой технологической задаче определения коры модель для сегментации изображения должна отвечать следующим требованиям:

- обоснованное сочетание скорости распознавания и качества работы модели;
- возможность имплементировать обученные модели на вычислительных машинах слабой мощности, в том числе без использования графических процессоров (GPU).

Обозначенным требованиям потенциально отвечает ряд моделей машинного обучения семейства R-CNN, в частности, модификация Faster R-CNN, архитектура которой схематично представлена на рис. 1.

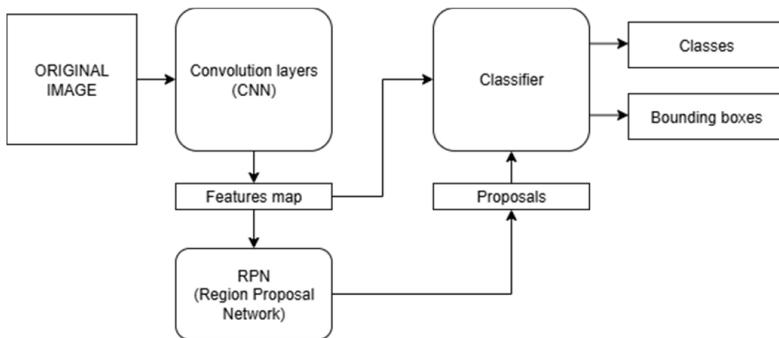


Рис. 1. Архитектура модели Faster R-CNN [The Faster..., 2025]

Fig. 1. Architecture of the Faster R-CNN model

Основные структурные элементы в схеме, приведенной на рис. 1, следующие [The Faster..., 2025]:

- Convolution layers (CNN) – предобученная сверточная сеть (например, ResNet50/100), предназначенная для извлечения высокоуровневых признаков из входного изображения и генерации карты признаков (features map);
- RPN (Region Proposal Network) – отдельная сеть для генерации «кандидатов на объекты» непосредственно из карты признаков;
- Classifier (Классификатор) предназначен для предсказания классов объектов и уточнения координат ограничительных рамок при помощи регрессии.

В свою очередь, сеть RPN, определяющая вероятные объекты на исходном изображении, имеет структуру, представленную на рис. 2.

Принцип работы сети RPN можно свести к следующим основным этапам [Region..., 2025]:

- Генерация карты признаков на основе исходного изображения;
- Обработка карты признаков методом скользящего окна. Для каждого окна размером $n \times n$ генерируется по 3 вариации базовых рамок (Anchor Box) с соотношениями сторон 1:1, 1:2, 2:1 соответственно с тремя масштабами – 128, 256, 512;
- Локализация и классификация объектов при помощи слоев классификации и регрессии в областях, выделенных ограничительными рамками. Классификатор вычисляет оценку метрики IoU (Intersection over Union) соответствия значений Anchor Boxes с истинными значениями (Ground Truth Boxes), на основании которой относит объект к переднему (Foreground) или заднему (Background) классу.

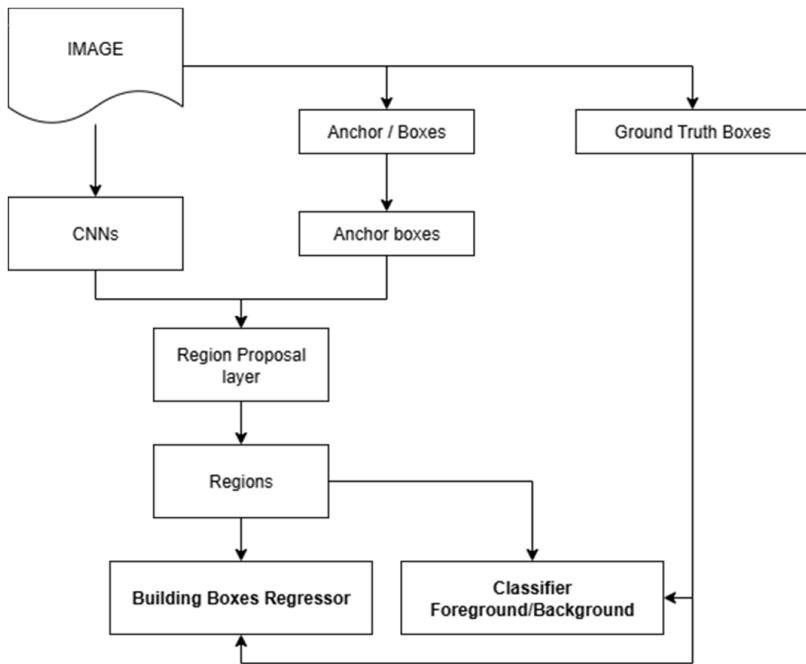


Рис. 2. Архитектура сети RPN [Region..., 2025]

Fig. 2. RPN network architecture

Функция потерь модели RPN представляется формулой:

$$L(\{p_i\}, \{t_i\}) = \frac{1}{N_{cls}} \sum_i L_{cls}(p_i, p_i^*) + \lambda \frac{1}{N_{reg}} \sum_i p_i^*(p_i, p_i^*), \quad (1)$$

где i – индекс опорной (базовой) точки; p – вероятность того, что область принадлежит объекту либо нет; t – вектор из 4 координат прогнозируемой ограничительной рамки; $*$ – индекс истинных меток; L – функция потерь классификатора, представляющая собой логарифмические потери по двум классам; N_{cls} , N_{reg} – коэффициенты нормализации; λ – 10 (по умолчанию), параметр, позволяющий масштабировать функции потерь классификатора и регрессора.

Приведем пример результата работы модели Faster R-CNN с отрисовкой обнаруженных ограничительных рамок (рис. 3).

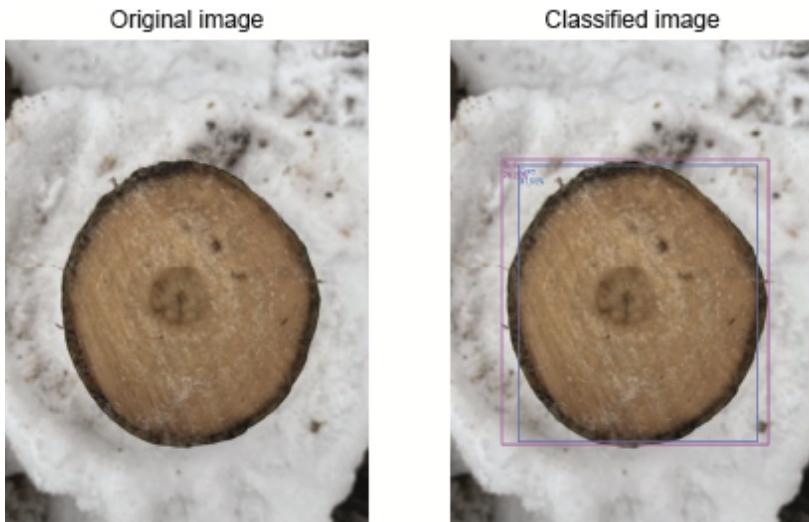


Рис. 3. Пример результатов работы Faster R-CNN
(класс Bark – внешняя рамка, класс Core – внутренняя рамка)

Fig. 3. Example of Faster R-CNN results
(Bark class – outer frame, Core class – inner frame)

Для решения практической задачи обработки снимков поперечных распилов древесины исходное «базовое» решение Faster R-CNN требует модификации, поскольку результатом работы модели, помимо показателей принадлежности искомого объекта к тому или иному классу (непосредственно сегментация поперечного сечения сортимента) и ограничительных рамок (bounding boxes), обозначающих его местоположение на снимке, должна быть также форма и площадь этого объекта, выделенная в отдельный регион-маску, которая и будет использоваться для последующей оценки доли коры.

При разработке программного решения, отвечающего этим требованиям, использована модификация семейства R-CNN – Mask R-CNN [What..., 2025], включающая в себя функционал Faster R-CNN и расширенная за счет добавления ветки прогнозирования масок сегментации в каждой области интереса (RoI), которая, в свою очередь, работает параллельно с основным механизмом классификации ограничительных рамок (схема на рис. 4). Ветка представляет собой сеть FCN (Fully Convolutional Networks), применяемую к каждой области интереса (RoI) и попиксельно предсказывающую маску сегментации. Маски предсказываются независимо от «зна-

ния» класса и среди них выбирается маска, получившая большую оценку (IoU) в независимом классификаторе.

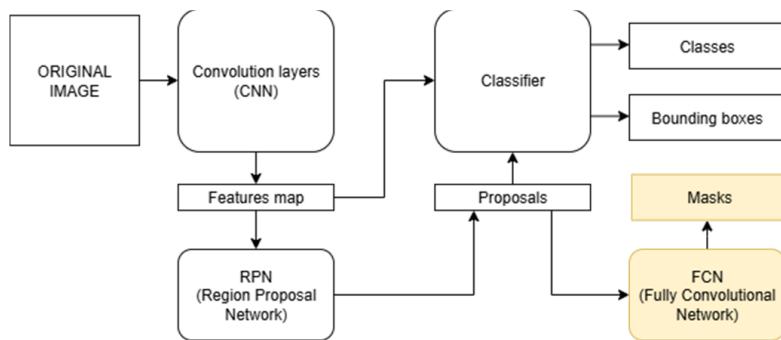


Рис. 4. Архитектура сети Mask R-CNN [What..., 2025]
Fig. 4. Mask R-CNN network architecture

Пример результатов работы модели Mask R-CNN проиллюстрирован на рис. 5.

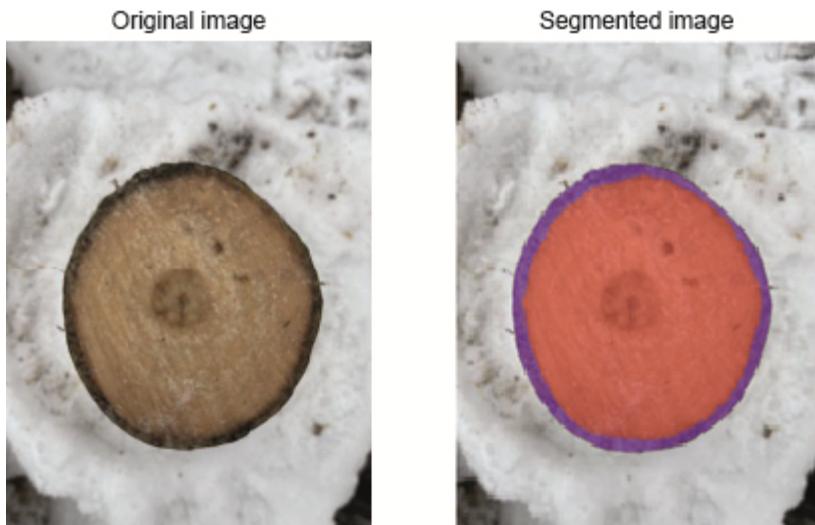


Рис. 5. Результат работы сегментации снимка с использованием сети-модификации Mask R-CNN
Fig. 5. Image segmentation results using a modified Mask R-CNN network

Результаты разведочных опытов показали, что модель Mask R-CNN принципиально справляется с сегментацией снимка и классификацией областей найденного объекта. Дальнейшая модификация программного решения, направленная на повышение качества распознавания, выполнена на основе эвристического подхода с идеей улучшить генерацию карты признаков Features map при помощи более «мощной» модели. Для этого модель Mask R-CNN была интегрирована в общий стек с моделью Segment Anything (SAM) [What..., 2025], а функции генерации карты признаков переданы блоку Encoder. При этом, поскольку модель Mask R-CNN обладает функционалом блоков memory attention сети SAM, последние из стека были удалены для оптимизации решения в плане требуемого объема памяти. Схемы оригинальной модели SAM и полученной модификации проиллюстрированы на рис. 6, 7 соответственно.

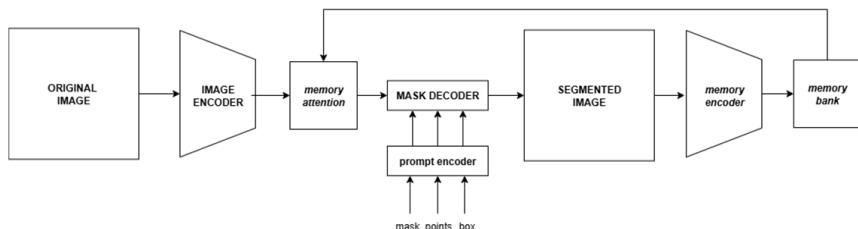


Рис. 6. Оригинальная архитектура модели Segment Anything [What..., 2025]
Fig. 6. Original architecture of the Segment Anything model

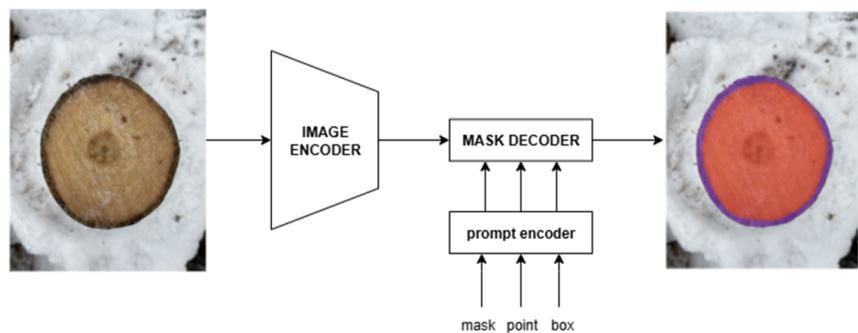


Рис. 7. Оптимизированная архитектура модели Segment Anything для семантической сегментации снимков
Fig. 7. Optimized architecture of the Segment Anything model for semantic image segmentation

В представленном стеке допустима интеграция сети Mask R-CNN в различные версии SAM, отличающиеся числом обучаемых параметров, что позволяет экспериментально изучить связь их числа и метрик качества распознавания областей поперечного распила.

Результаты экспериментов. Эксперименты выполнены с интеграцией сети Mask R-CNN в SAM с числом обучаемых параметров, указанным в табл. 1.

Таблица 1
Данные эксперимента с экспертной разметкой

Experimental data with expert labeling

Модель SAM	Полновесная версия	Без модулей внимания
Tiny	38 962 498	31 655 586
Small	46 060 354	38 753 442
Large	224 446 642	217 139 730

Схема сети Mask R-CNN с указанием числа обучаемых параметров структурных элементов приведена на рис. 8.

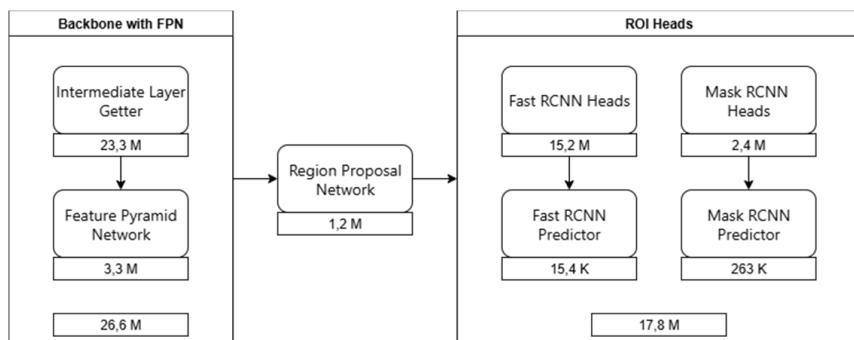


Рис. 8. Структура сети Mask R-CNN и число обучаемых параметров
Fig. 8. Mask R-CNN network structure and the number of trainable parameters

Для обучения и валидации моделей использованы авторские снимки поперечного распила круглых лесоматериалов с экспертной разметкой областей, относящихся к коре и древесине [Инструменты..., 2025]. Характер динамики функций потерь при обучении и валидации полученного моделированного решения проиллюстрирован на рис. 9.

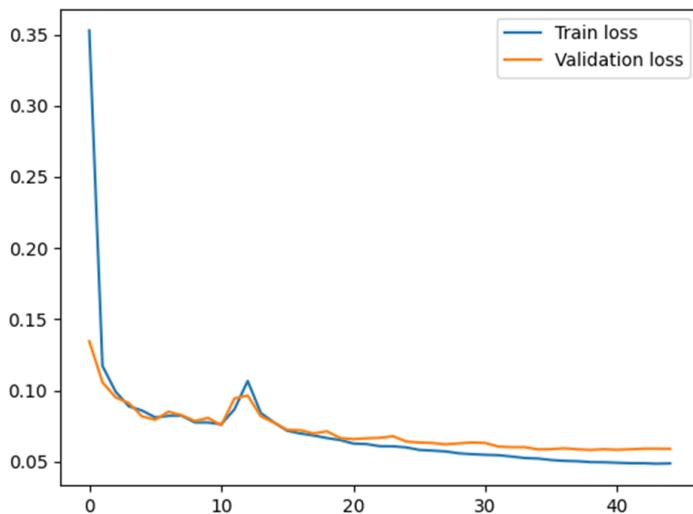


Рис. 9. Динамика функции потерь модели (аугментированные данные, выборка train – 864 образца, выборка validation – 216 образцов)

Fig. 9. Dynamics of the model loss function (augmented data, train sample – 864 samples, validation sample – 216 samples)

Примеров результатов экспериментов приведен в табл. 2.

Таблица 2

**Пример распознавания коры на снимке
для стеков с различными моделями SAM + Faster R-CNN**

**Example of cortex recognition in an image
for stacks with different SAM + Faster R-CNN models**

Модель	Tiny	Small	Large
Время выполнения, с	4	7	31
Кора, %	9,63	13,41	14,31
Метрика точности Precision	0,883	0,963	0,985

Заключение. Измеренные значения метрики точности Precision при валидации показывают, что предлагаемая архитектура информационной модели глубокого обучения позволяет успешно решать задачу сегментации и определения доли коры на снимках.

Результаты экспериментов с информационной моделью глубокого обучения позволяют оценить связь ее архитектуры и числа обучаемых параметров с результатами определения доли коры на снимках сортиментов: при переходе от модели с числом весов 38 млн до модели с 217 млн весов отмечается стабилизация метрики Precision. В связи с этим целесообразно выполнить дальнейшие исследования по поиску оптимального числа обучаемых параметров, обеспечивающего наилучшее сочетание точности и скорости обработки снимков.

Проведенные эксперименты и результаты измерения времени обработки снимков показали, что представленный стенд позволяет проводить исследования в области цифровой обработки снимков сортиментов, проходящих операции лесопереработки, и может использоваться в дальнейших исследованиях, направленных на разработку и настройку алгоритмов технического зрения, предназначенных для определения доли и толщины коры по снимкам сортиментов для получения уточненной информации о показателях предмета труда в режиме реального времени.

Вклад авторов. Богомолов А.А.: разработка информационной модели, программная реализация (55%); Молодых Е.И.: настройка и реализация алгоритмов распознавания (10%); Галкина Е.А.: реализация алгоритмов распознавания (5%); Куницкая О.А.: экспертная разметка экспериментальных данных (5%); Хохлов А.А.: реализация алгоритмов распознавания (5%); Пушкиов Ю.Л.: первичная обработка экспериментальных данных (5%); Горюнов Н.Д.: первичная обработка экспериментальных данных (5%); Андронов А.В.: руководство экспериментальной частью работы (5%); Хитров Е.Г.: общее руководство работой (5%).

Благодарности. Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-16-00092.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Беляев Н.Л. Повышение точности цифрового учёта круглых лесоматериалов: дис. ... канд. техн. наук. Петрозаводск: ПетрГУ, 2023. 163 с.

Инструменты библиотеки OPENCV для выявления коры на торцевом снимке поперечного спила дерева. URL: <https://clck.ru/3Es7QJ> (дата обращения: 01.02.2025).

The Faster R-CNN model is based on the Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks paper. URL: clck.ru/3PpfEE (дата обращения: 01.02.2025).

Han S., Jiang X., Wu Z. An Improved YOLOv5 Algorithm for Wood Defect Detection Based on Attention // *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 71800-71810. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3293864

Kim T.K., Hong J., Ryu D., Kim S., Byeon S.Y., Huh W., Kim K., Baek G.H., Kim H.S. Identifying and extracting bark key features of 42 tree species using convolutional neural networks and class activation mapping // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. Art. no. 4772. DOI: 10.1038/s41598-022-08571-9.

Kunickaya O., Pomiguev A., Kruchinin I., Storodubtseva T., Voronova A., Levushkin D., Borisov V., Ivanov V. Analysis of modern wood processing techniques in timber terminals // *Central European Forestry Journal*. 2022. Vol. 68(1). P. 51–59.

Region Proposal Network (RPN): A Complete Guide. URL: clck.ru/3PpfF3 (дата обращения: 01.02.2025).

Robert M., Dallaire P., Giguère Ph. Tree bark re-identification using a deep-learning feature descriptor // 17th Conference on Computer and Robot Vision (CRV). 2020. P. 25–32. DOI: 10.1109/CRV50864.2020.00012.

Wang R., Chen Y., Liang F., Wang B., Mou X., Zhang G. BPN-YOLO: A Novel Method for Wood Defect Detection Based on YOLOv7 // *Forests*. 2024. Vol. 15(7). Art. no. 1096. DOI: 10.3390/f15071096.

What is Mask R-CNN and how does it work? URL: clck.ru/3PpfGp (дата обращения: 01.02.2025).

References

Beliaev N.L. Povyshenie tochnosti tsifrovogo ucheta kruglykh lesomaterialov: Diss. ... Cand. Tech. Sci. Petrozavodsk: PetrGU, 2023. 163 p. (In Russ.)

The Faster R-CNN model is based on the Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks paper. URL: clck.ru/3PpfEE (accessed February 01, 2025).

Han S., Jiang X., Wu Z. An Improved YOLOv5 Algorithm for Wood Defect Detection Based on Attention. *IEEE Access*, 2023, vol. 11, pp. 71800–71810. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3293864

Kim T.K., Hong J., Ryu D., Kim S., Byeon S.Y., Huh W., Kim K., Baek G.H., Kim H.S. Identifying and extracting bark key features of 42 tree species using convolutional neural networks and class activation mapping. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, art. no. 4772. DOI: 10.1038/s41598-022-08571-9.

Kunickaya O., Pomiguev A., Kruchinin I., Storodubtseva T., Voronova A., Levushkin D., Borisov V., Ivanov V. Analysis of modern wood processing techniques in timber terminals. *Central European Forestry Journal*, 2022, vol. 68(1), pp. 51–59.

OPENCV library tools for identifying bark on a cross-sectional image of a tree. – URL: <https://clck.ru/3Es7QJ> (accessed February 01, 2025).

Region Proposal Network (RPN): A Complete Guide. URL: clck.ru/3PpfF3 (accessed February 01, 2025).

Robert M., Dallaire P., Giguère Ph. Tree bark re-identification using a deep-learning feature descriptor. *17th Conference on Computer and Robot Vision (CRV)*. 2020, pp. 25–32. DOI: 10.1109/CRV50864.2020.00012.

Wang R., Chen Y., Liang F., Wang B., Mou X., Zhang G. BPN-YOLO: A Novel Method for Wood Defect Detection Based on YOLOv7. *Forests*, 2024, vol. 15(7), art. no. 1096. DOI: 10.3390/f15071096.

What is Mask R-CNN and how does it work? URL: clck.ru/3PpfGp (accessed February 01, 2025).

Материал поступил в редакцию 20.03.2024

Богомолов А.А., Молодых Е.И., Галкина Е.А., Кунинская О.А., Хохлов А.А., Пушкиков Ю.Л., Горюнов Н.Д., Андронов А.В., Хитров Е.Г. Разработка модели глубокого обучения для распознавания коры древесины на снимке поперечного распила // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 375–389. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.375-389

Целью исследования является разработка и апробация архитектуры модели глубокого обучения на основе сверточной искусственной нейронной сети для определения доли коры на цифровом снимке поперечного распила древесины. Результаты работы получены с использованием методов технического зрения и глубокого обучения. При разработке архитектуры модели использована справочная документация искусственных нейронных сетей Faster R-CNN, RPN, Mask R-CNN, Segment Anything. При программной реализации модели в исследовательских целях использованы модели искусственных нейронных сетей с открытым исходным кодом Mask R-CNN и Segment Anything (модель Mask R-CNN была интегрирована в общий стек с моделью Segment Anything (SAM), а функции генерации карты признаков переданы блоку Encoder; блоки memory attention сети SAM были удалены для оптимизации решения в плане требуемого объема оперативной памяти). Обучение и валидация модели проведены с использованием авторского набора цифровых снимков поперечных распилов лесоматериалов, доступного в репозитории. Измеренные значения метрики точности Precision при валидации показывают, что предлагаемая архитектура модели глубокого обучения позволяет успешно решать задачу сегментации и определения доли коры на снимках. Результаты экспериментов с информационной моделью глубокого обучения позволяют оценить связь ее архитектуры и числа обучаемых параметров с результатами определения доли коры на снимках сортиментов: при переходе от модели с числом весов 38 млн до модели с 217 млн весов отмечается стабилизация метрики Precision. В связи с этим целесообразно выполнить дальнейшие исследования по поиску оптимального числа обучаемых параметров, обеспечивающего наилучшее сочетание точности и скорости обработки снимков.

Ключевые слова: круглые лесоматериалы, сегментация изображения, фреймворк Pytorch, сверточные ИНС.

Bogomolov A.A., Molodykh E.I., Galkina E.A., Kunitskaia O.A., Khokhlov A.A., Pushkov Y.L., Goryunov N.D., Andronov A.V., Khitrov E.G.
Developing a deep learning model for recognizing wood bark in a cross-section image. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 375–389 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.375-389

The aim of this study is to develop and validate a deep learning model architecture based on a convolutional artificial neural network for determining the proportion of bark in a digital image of cross-cut timber. The results were obtained using computer vision and deep learning methods. Reference documentation for the Faster R-CNN, RPN, Mask R-CNN, and Segment Anything artificial neural networks was used in developing the model architecture. The open-source Mask R-CNN and Segment Anything artificial neural network models were used in the software implementation of the model for research purposes (the Mask R-CNN model was integrated into a common stack with the Segment Anything (SAM) model, and the feature map generation functions were transferred to the Encoder block; the memory attention blocks of the SAM network were removed to optimize the solution in terms of the required amount of RAM). The model was trained and validated using the author's dataset of digital images of cross-cut timber, available in the repository. The measured Precision metric values during validation demonstrate that the proposed deep learning model architecture successfully solves the problem of segmentation and bark fraction determination in images. Experiments with the deep learning model allow us to evaluate the relationship between its architecture and the number of trainable parameters with the results of bark fraction determination in assortment images: stabilization of the Precision metric is observed when moving from a model with 38 million weights to a model with 217 million weights. Therefore, further research is warranted to determine the optimal number of trainable parameters that provides the best balance of accuracy and image processing performance.

Ключевые слова: round timber, image segmentation, Pytorch framework, convolutional neural networks.

БОГОМОЛОВ Александр Алексеевич – учебный мастер кафедры автоматизации, метрологии и управления в технических системах Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 2878-7470.

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

BOGOMOLOV Aleksandr A. – engineer of the Department of Automation, Metrology and Management in Technical Systems of the Saint Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 2878-7470.

194021. Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: setalx@mail.ru

МОЛОДЫХ Елизавета Игоревна – аспирант кафедры автоматизации, метрологии и управления в технических системах Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: mmu49@mail.ru

МОЛОДЫХ Elizaveta I. – PhD student of the Department of Automation, Metrology and Management in Technical Systems of the Saint Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: mmu49@mail.ru

ГАЛКИНА Екатерина Анатольевна – старший преподаватель кафедры техносферной безопасности Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета.

190005, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: galo4enok@yandex.ru.

GALKINA Ekaterina A. – Senior Lecturer, Department of Technosphere Safety, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering.

190005. 2nd Krasnoarmeyskaya str. 4. St. Petersburg. Russia. E-mail: galo4enok@yandex.ru.

КУНИЦКАЯ Ольга Анатольевна – профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» Арктического государственного агротехнологического университета, доктор технических наук. SPIN-код: 1353-1192. ORCID: 0000-0001-8542-9380.

677007, 3-й км Сергея Яхского ш., д. 3, г. Якутск, Россия. E-mail: ola.ola07@mail.ru.

KUNITSKAIA Olga A. – DSc (Technical), Professor of Department of Forestry Technology and Equipment, Arctic State Agrotechnological University. SPIN-code: 1353-1192. ORCID: 0000-0001-8542-9380.

677007. 3rd km of Sergelyakhskoe highway 3. Yakutsk. Russia. E-mail: ola.ola07@mail.ru.

ХОХЛОВ Артём Анатольевич – соискатель кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» Арктического государственного агротехнологического университета.

677007, 3-й км Сергея Яхского ш., д. 3, г. Якутск, Россия. E-mail: T.igorevna123@yandex.ru.

ХОХЛОВ Artem A. – applicant in the Department of Forestry Technology and Equipment at the Arctic State Agrotechnological University.

677007. 3rd km of Sergelyakhskoe highway 3. Yakutsk. Russia. E-mail: ola.ola07@mail.ru.

ПУШКОВ Юрий Леонидович – доцент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук. SPIN-код: 5633-1797.

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

PUSHKOV Yuriy L. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Forestry Engineering, Service and Repair, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 5633-1797.

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

ГОРЮНОВ Никита Дмитриевич – студент Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

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

GORYUNOV Nikita D. – student of the St.Petersburg State Forest Technical University.

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

АНДРОНОВ Александр Вячеславович – доцент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, 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 of the Department of Forestry Machinery, Service and Repair of St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 8345-3722. ORCID: 0000-0002-1035-9231.

194021. Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: andronovalexandr@gmail.com

ХИТРОВ Егор Германович – доцент Высшей школы программной инженерии Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, доктор технических наук. SPIN-код: 4663-5944. ORCID: 0000-0003- 4569-9508.

195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: hitrov_eg@spbstu.ru

KHITROV Egor G. – DSc (Technical), Associate Professor of the Higher School of Software Engineering of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Associate Professor. SPIN-code: 4663-5944. ORCID: 0000-0003-4569-9508.

195251. Politekhnicheskaya str. 29. St. Petersburg. Russia. E-mail: hitrov_eg@spbstu.ru

А.П. Мохирев, И.В. Храмов, А.Д. Гузоватова

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ
АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛОСТЕЙ
В КОНСТРУКЦИИ ДЕРЕВЯННЫХ ПЛИТ**

Введение. Исследования движения звуковых волн в различных поверхностях не новы. Множество трудов посвящено теории звука и распространению его в различных материалах [Попов, Кадцо, 2013; Радоуцкий и др., 2016; Кудряшов, Леонгард, 2018; Бирман, Угрюмов, 2019; Бойтемиров, 2021].

Одним из конструктивных решений для подавления звуковых волн могут являться акустические полости [Амельчугов и др., 2022]. Формы акустических полостей могут быть разнообразными, выбор формы зависит от конкретных задач и требований [Santi et al., 2016; Sil'man, Ponomarev, 2021]. Некоторые из наиболее распространенных форм акустических полостей включают:

- параллелепипеды: прямоугольные или кубические формы, которые применяются для улучшения звукопоглощения и звукоизоляции в помещениях;
- пирамиды: форма, которая обеспечивает хорошее звукопоглощение и улучшение акустики помещения;
- купола: арочная форма, которая может использоваться для создания изолированных акустических камер или студий;
- гексагональные ячейки: форма, которая обеспечивает хорошие звукопоглощение и звукоизоляцию;
- сферы: форма, которая также может использоваться для улучшения акустики и звукоизоляции помещений.

Каждая форма имеет свои уникальные свойства и эффективность отражения звука в зависимости от специфических целей и условий.

В научных трудах [Сумбатян, Боев, 2020; De Santis et al., 2024] исследуется приближенный подход к отражению звука от криволинейных поверхностей, который основан на замене этих поверхностей набором плоских отражателей. Однако вопрос о точности такого приближения остается открытым. Для решения данной проблемы авторы предлагают новый метод. В работе рассматривается асимптотически точное решение, которое соот-

ветствует лучевой теории звука. Полученные явные формулы сравниваются с методом трассировки лучей (МТЛ). Данное исследование поможет лучше понять процессы отражения звука от сложных криволинейных поверхностей и разработать более точные методы моделирования подобных явлений.

Форма параболы играет важную роль в отражении звуковой волны из-за ее свойств фокусировки и диффузии [Храмов, Мохирев, Амельчугов и др., 2022–2024]. Когда звуковая волна попадает на поверхность в форме параболы, она отражается не случайно, а сосредоточивается в определенном месте – фокусе параболы. Это происходит благодаря тому, что звуковая волна, параллельная оси симметрии параболы, отражается в направлении фокуса в соответствии с оптическим законом отражения.

Таким образом, форма параболы позволяет сконцентрировать энергию звуковой волны в определенной точке, увеличивая ее интенсивность в этом месте. Это свойство параболы может быть использовано, например, для создания акустических устройств, способных улавливать звуковые сигналы и усиливать их. Кроме того, форма параболы также способствует диффузии звуковой волны. Поскольку поверхность параболы имеет плавные изгибы и отражает звуковую волну под определенным углом, это способствует рассеянию звука в разные направления и более равномерному распределению звуковой энергии. Форма параболы является уникальной и эффективной для отражения и фокусировки звуковой энергии, а также для снижения отражения и обеспечения более равномерного распределения звука в пространстве.

Цель настоящих исследований – определить наиболее эффективную форму акустических полостей для улучшения звукоизоляции деревянных панелей.

Материалы и методика исследования. Идеальная параболическая форма – это параболическая поверхность, которая создает эффект фокусировки и рассеивания звуковой волны. Когда звуковая волна попадает на параболическую поверхность, она отражается от нее в разных направлениях, что способствует рассеиванию звука. Чем глубже и шире парабола, тем более эффективно она рассеивает звук в разные стороны, так как более крутые углы отражения приводят к более равномерному распределению звуковой энергии. Идеальная параболическая форма используется для создания акустических диффузоров, которые рассеивают звуковые волны и улучшают звучание в помещении. Диффузоры с параболической формой помогают уменьшить переотражение звука и создать более комфортную и равномерную акустическую среду.

Акустическая полость параболической формы обладает определенными характеристиками, которые позволяют ей эффективно рассеивать звук и улучшать звукоизоляцию материала. Кроме того, такие формы могут быть использованы для создания эстетичных и функциональных акустических конструкций.

Наилучшая параболическая форма акустической полости для отражения звука определяется на основе принципа фокусировки звуковых волн. Параболическое зеркало используется для сбора и отражения звука в определенном направлении. Для начала нужно определить фокусное расстояние. Фокусное расстояние параболы зависит от глубины ее кривизны. Чем глубже кривизна, тем ближе к оси будет находиться фокус. Фокусное расстояние можно определить теоретически или опытным путем. Размеры параболы и угол наклона определяют характеристики отражаемого звука. Для наилучшего эффекта необходимо подобрать размеры и угол так, чтобы звуковые волны собирались в одной точке – фокусе. Для достижения идеальной отражающей способности необходимо изготовить параболическую поверхность с высокой степенью точности. Это поможет избежать искажений в отраженном звуке. Все высказанное поможет определить идеальную параболическую форму для отражения звука с максимальной эффективностью.

Результаты исследования. При определении наиболее эффективной акустической полости определены фокусы в полусферической и параболической форме (рис. 1).

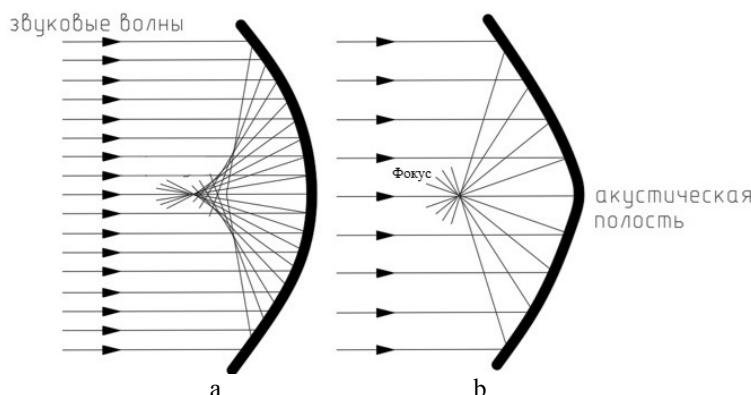


Рис. 1. Фокусировка отражаемого звука при разных формах акустической полости: а – полусфера, б – парабола.

*Fig. 1. Focusing of reflected sound in different forms of acoustic cavity:
a – hemisphere, b – parabola.*

Параболическое зеркало – это зеркальная поверхность в виде параболоида вращения, который обладает способностью фокусировать параллельные лучи звука в одной точке – фокусе. Это свойство делает параболические зеркала идеальным инструментом для сбора и отражения света или звука. Форма параболы математически описывается уравнением $y = x^2$, где x и y – координаты плоскости, а x^2 представляет собой квадрат переменной. При использовании параболического зеркала для отражения звука звуковые волны при попадании на поверхность параболы отражаются под углом, который равен углу падения, и фокусируются в одной точке перед зеркалом. Это позволяет увеличить интенсивность звуковых волн в фокусе, что может быть использовано для улучшения звукоизоляции, воздействия на отраженный звук в определенной точке (фокусе).

На (рис. 2) показано общее решение в повышении звукоизоляционных свойств, которое состоит в отражении звуковых волн P_1 , исходящих от источника звука P_0 , проходящих через акустические полости параболической формы с дальнейшим фокусом в точке А, рассеиванием энергии звуковой волны P_2 и прохождением остаточного звукового давления P_3 . Для решения поставленной задачи разработана деревянная панель с применением конструктивных элементов, повышающих звукоизоляционные свойства от воздушного шума.

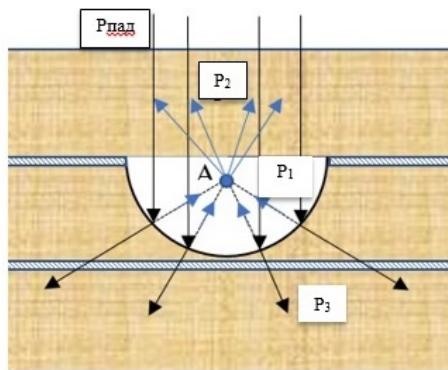


Рис. 2. Модель прохождения звуковой энергии через параболическую акустическую полость

Fig. 2. Model of the passage of sound energy through a parabolic acoustic cavity

Описание процессов, происходящих в звукоизоляционной древесной панели при прохождении через нее звукового давления, изображено на рис. 3.

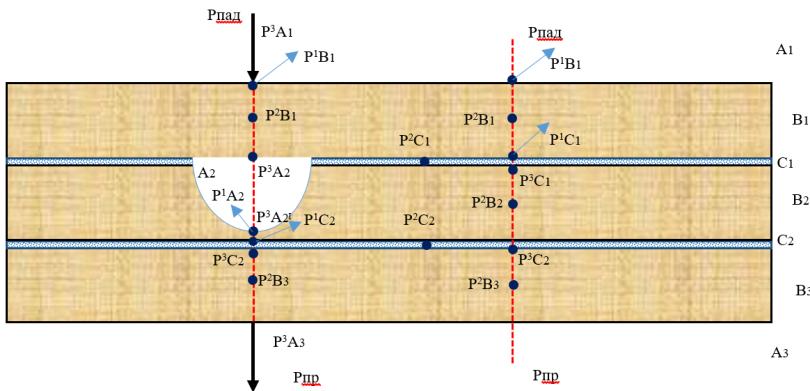


Рис. 3. Модель прохождения звуковой энергии через звукоизоляционную древесную панель

Fig. 3. A model of the passage of sound energy through a soundproof wood panel

Звуковое давление падающей волны $P_{\text{пад}}$ от источника звука проходит через воздушное пространство A_1 , где за счет разностей плотностей сред теряет часть своей интенсивности P^3_{A1} , далее проходя в плоскость слоя деревянной панели B_1 , при соприкосновении с которым происходит частичное отражение звуковой волны P^1_{B1} с дальнейшим рассеиванием в воздушном пространстве A_1 . Проходящая в слой деревянной панели B_1 волна частично поглощается P^2_{B1} .

Звуковая волна, пройдя через слой деревянной панели B_1 и соприкасаясь с клеевым слоем C_1 , частично отражается (P_{C1}^1) с дальнейшим рассеянием остаточной звуковой волны в деревянной панели B_1 . Затем происходит поглощение звуковой волны P_{C1}^2 в клеевом слое C_1 за счет более плотной среды используемого клея.

При использовании акустических звукоизоляционных полостей A_2 в слое панели B_2 звуковая волна P^1_{B1} , проходя из древесины слоя B_1 в воздушное пространство акустической полости A_2 (между полостью и древесиной клей отсутствует) из-за разности плотностей частично теряет интенсивность (P^3_{A2}). Затем звуковая волна частично отражается от акустической полости P^1_{A2} и входит обратно в слой панели B_1 , соприкасаясь с которым частично отражается и гасится, постоянно преломляясь, отражаясь в акустической полости A_2 от его поверхности и частично проникая в слои B_1 и B_2 , поглощается древесиной, после чего остаточная ин-

тенсивность звуковой волны поглощается (P^3_{A2}) за счет перехода из воздушного пространства акустической полости A_2 в среду слоя деревянной панели B_2 .

В слое деревянной панели B_2 происходит частичное поглощение звуковой волны (P^2_{B2}).

В kleевом слое C_2 происходит частичное отражение звуковой волны (P^1_{C2}) с дальнейшим частичным поглощением. При переходе из kleевого слоя C_2 в плоскость слоя деревянной панели B_3 звуковая волна частично поглощается (P^3_{C2}). Далее в слое деревянной панели B_3 также происходит частичное поглощение (P^2_{B3}).

Заключительная потеря интенсивности звуковой волны P^3_{A3} происходит при переходе из слоя деревянной панели B_3 в воздушную среду A_3 ; далее остаточное звуковое давление $P_{\text{пр}}$ доходит до потребителя.

Итоговое значение прошедшего звукового давления $P_{\text{пр}}$ можно представить в виде формулы (1):

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{пад}} - (P^3_{A1} + P^1_{B1} + P^2_{B1} + P^1_{C1} + P^2_{C1} + P^3_{C1} + P^2_{B2} + P^3_{A2} + P^1_{A2} + P^3_{A2} + P^1_{C2} + P^2_{C2} + P^3_{C2} + P^2_{B3} + P^3_{A3}), \quad (1)$$

где $P_{\text{пад}}$ – звуковое давление падающей волны от источника звука,

P^3_{A1} – переход из воздушной среды в среду слоя B_1 ,

P^1_{B1} – отражение звуковой волны от плоскости деревянной панели B_1 ,

P^2_{B1} – поглощение звуковой волны деревянной панелью B_1 ,

P^1_{C1} – отражение от kleевого слоя C_1 ,

P^2_{C1} – поглощение звуковой волны в kleевом слое C_1 ,

P^3_{C1} – переход из kleевого слоя C_1 в слой деревянной панели B_2 ,

P^2_{B2} – поглощение звуковой волны деревянной панелью B_2 ,

P^3_{A2} – переход из слоя B_1 в воздушное пространство акустической полости A_2 ,

P^1_{A2} – отражение звуковой волны от звукового кармана,

P^3_{A2} – переход из воздушного пространства акустической полости A_2 в слой деревянной панели B_2 ,

P^1_{C2} – отражение от kleевого слоя C_2 ,

P^2_{C2} – поглощение звуковой волны в kleевом слое C_2 ,

P^3_{C2} – переход из kleевого слоя C_2 в слой деревянной панели B_3 ,

P^2_{B3} – поглощение звуковой волны деревянной панелью B_3 ,

P^3_{A3} – переход из среды слоя деревянной панели B_3 в воздушную среду A_3 ,

$P_{\text{пр}}$ – прошедшее звуковое давление.

Выводы.

Парabolicкая форма акустических полостей имеет свойство отражать звуковые волны в единую точку, называемую фокусом. Это позволяет увеличить интенсивность звука в этой точке и усилить его. Кроме того, парабола уменьшает рассеивание звука и позволяет передавать звук на большее расстояние с минимальными потерями.

Таким образом, благодаря своим фокусирующими свойствам, парабола является предпочтительной формой для отражения звука. Это делает ее эффективным инструментом для создания акустических систем, направленных на улучшение распространения звука в конкретном направлении или на увеличение мощности и четкости звукового сигнала. Это позволяет воздействовать на отраженный звук в определенной точке (фокусе), что является дальнейшей задачей исследований.

Предлагаемая конструкция звукоизоляционной древесной панели позволяет улучшить акустический комфорт. Разработанная древесная панель не противоречит межгосударственному стандарту ГОСТ 27296-2012 «Здания и сооружения. Методы измерения звукоизоляции ограждающих конструкций» [Мохирев и др., 2022].

Представленная модель описывает все акустические процессы, происходящие при прохождении звуковой энергии через конструкцию усовершенствованной звукоизоляционной панели.

При сравнении полученных результатов [Храмов и др., 2022] с древесными панелями без применения звукоизоляционных элементов исследования показали увеличение коэффициента дополнительной звукоизоляции по сравнению с исходным материалом на 6–8%, что является хорошим результатом.

Полученные данные демонстрируют потенциал звукоизоляционных древесных панелей для снижения воздушного шума в различных сферах применения [Храмов и др., 2023].

Продолжение исследований и разработок в этой области позволит еще больше оптимизировать звукоизоляционные возможности деревянных панелей, расширяя их применимость и способствуя созданию более комфортной среды.

Сведения о финансировании исследования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-78-10002, <https://tscf.ru/project/22-78-10002/>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Амельчугов С.П., Мохирев А.П., Тарасов И.В., Храмов И.В. Исследование звукового импеданса деревянной панели // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88, № 11. С. 27–31.

Бойтемиров Ф.А. Перспективность применения древесины в высотных зданиях на основе проведенного исследования // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2021. № 10 (1046). С. 37–39.

Бирман А.Р., Угрюмов С.А. Фанерная панель. Патент на полезную модель № 193354 U1 Российская Федерация, МПК B27D 1/06: № 2019118160: заявл. 10.06.2019: опубл. 25.10.2019.

Кудряшов А.П., Леонгард Д.К. Звукоизоляционное дверное полотно. Патент на полезную модель № 177663 U1 Российская Федерация, МПК E06B 5/16: № 2017114097: заявл. 21.04.2017: опубл. 05.03.2018.

Мохирев А.П., Храмов И.В., Амельчугов С.П., Лях Н.И., Смирнов И.Ю. Устройство для испытания звукоизоляции древесных панелей // Resources and Technology. 2023. Т. 20, № 2. С. 71–81.

Попов К.Н., Кадцо М.Б. Строительные материалы и изделия: учебник. М.: Высш. шк., 2013. 372 с.

Радоуцкий В.Ю., Шульженко В.Н., Степанова М.Н. Современные звукоизолирующие материалы и конструкции // Вестник БГТУ. 2016. № 6. С. 76–79.

Сумбатян В.А., Боев Н.В. Об отражении звука от криволинейных поверхностей в акустике помещений // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2020. Вып. 1. Ст. 2010602.

Храмов И.В., Мохирев А.П., Амельчугов С.П., Храмова К.Р. Совершенствование конструкции древесной панели для повышения звукоизоляции // Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее: сб. науч. ст. по мат. Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 40-летию создания Инженерно-строительного института. Красноярск, 2022. С. 356–359.

Храмов И.В., Мохирев А.П., Лютоева Е.В. Результаты эксперимента звукового давления, проходящего через шумоизолационные древесные панели // Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее: сб. науч. ст. по мат. II Всерос. науч.-практ. конф. Красноярск, 2023. С. 396–400.

De Santis Yu., Aloisio A., Pasca D.P., Gavrić I., Fragiocomo M. Mechanical characterization of soundproofed inclined screws connections // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 412. Art. no. 134641.

Santi S., Pierobon F., Corradini G., Cavalli R., Zanetti M. Massive wood material for sustainable building design: the Massiv-Holz-Mauer wall system // Journal of Wood Science. 2016. No. 62. P. 416–428.

Sil'man Yu.Yu., Ponomarev R.A. Wooden skyscrapers as an innovative and ambitious solution to the issues posed by urbanisation // Problems of the economy and construction management in conditions of ecologically oriented development. Irkutsk, 2021. P. 327–333.

References

- Amelchugov S.P., Mokhirev A.P., Tarasov I.V., Khramov I.V.* Investigation of the sound impedance of a wooden panel. *Factory Laboratory. Diagnostics of materials*, 2022, vol. 88, no. 11, pp. 27–31. (In Russ.)
- Birman A.R., Ugryumov S.A.* Plywood panel. Utility Model Patent No. 193354 U1 Russian Federation, IPC B27D 1/06: No. 2019118160; decl. 06/10/2019; publ. 10/25/2019. (In Russ.)
- Boytemirov F.A.* The prospects of using wood in high-rise buildings based on the conducted research. *BST: Bulletin of construction equipment*, 2021, no. 10 (1046), pp. 37–39. (In Russ.)
- De Santis Yu., Aloisio A., Pasca D.P., Gavrić I., Fragiocomoa M.* Mechanical characterization of soundproofed inclined screws connections. *Construction and Building Materials*, 2024, vol. 412, art. no. 134641.
- Khramov I.V., Mokhirev A.P., Amelchugov S.P., Khramova K.R.* Improving the design of a wood panel to increase sound insulation. *Current issues of construction: a look into the future: a collection of scientific articles based on the mat. of the All-Russ. sci.-pract. conf. dedicated to the 40th anniversary of the establishment of the Civil Engineering Institute*. Krasnoyarsk, 2022, pp. 356–359. (In Russ.)
- Khramov I.V., Mokhirev A.P., Lyutoeva E.V.* Results of the experiment of sound pressure passing through sound-insulating wood panels. *Actual issues of construction: a look into the future: a collection of scientific articles based on the mat. of the II All-Russ. sci.-pract. conf.* Krasnoyarsk, 2023, pp. 396–400. (In Russ.)
- Kudryashov A.P., Leonhard D.K.* Soundproof door leaf. Utility model patent No. 177663 U1 Russian Federation, IPC E06B 5/16: No. 2017114097; decl. 04/21/2017; publ. 03/05/2018. (In Russ.)
- Mokhirev A.P., Khramov I.V., Amelchugov S.P., Lyakh N.I., Smirnov I.Yu.* Device for testing sound insulation of wood panels. *Resources and Technology*, 2023, vol. 20, no. 2, pp. 71–81. (In Russ.)
- Popov K.N., Kadzo M.B.* Building materials and products: textbook. Moscow: Higher School, 2013. 372 p. (In Russ.)
- Radoutsky V.Yu., Shulzhenko V.N., Stepanova M.N.* Modern sound-absorbing materials and structures. *Bulletin of BSTU*, 2016, no. 6, pp. 76–79. (In Russ.)
- Santi S., Pierobon F., Corradini G., Cavalli R., Zanetti M.* Massive wood material for sustainable building design: the Massive-Holz-Mauer wall system. *Journal of Wood Science*, 2016, no. 62, pp. 416–428.
- Silman Yu. Yu., Ponomarev R. A.* Wooden skyscrapers as an innovative and ambitious solution to the problems of urbanization // Problems of economics and construction management in an environmentally oriented development, April 14–15, 2020. Baikal State University, 2021, pp. 327–333.

Sumbatyan V.A., Boev N.V. On the reflection of sound from curved surfaces in room acoustics. Scientific Notes of the Faculty of Physics of Moscow University, 2020, iss. 1, art. no. 2010602. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 18.11.2024

Мохирев А.П., Храмов И.В., Гузоватова А.Д. Теоретическое обоснование акустических полостей в конструкции деревянных плит // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 390–402. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.390-402

В работе представлено исследование проектирования акустических характеристик звукоизоляционной деревянной панели. Растущая потребность в эффективных стратегиях контроля шума в различных областях применения, таких как деревянное домостроение, привела к разработке инновационных звукоизоляционных материалов. В этом исследовании изучается включение звукопоглощающих элементов в деревянные панели для повышения их звукоизоляционных свойств. В основе теоретического обоснования применения акустических полостей лежит принцип акустических резонаторов. При наличии объемных полостей в конструкции возникает возможность создания резонансных явлений, которые могут существенно влиять на уровень звукового давления и демпфирование звуковых волн. Резонирование, возникающее на определенных частотах, способствует снижению интенсивности звука, что позволяет улучшить акустические характеристики готовой конструкции. В процессе проектирования учитывается выбор звукопоглощающих элементов и их интеграция в конструкцию деревянных панелей. Различные звукопоглощающие материалы, такие как пористые поглотители, микроперфорированные панели и резонансные полости, оцениваются с точки зрения их коэффициентов звукопоглощения. Оптимальная конфигурация определяется посредством моделирования и экспериментальных измерений с использованием стандартизованных методов, определенных в ГОСТ 27296-2012 «Здания и сооружения. Методы измерения звукоизоляции ограждающих конструкций». Методика изготовления предполагает интеграцию звукопоглощающих элементов в конструкцию деревянной панели при сохранении ее структурной целостности. Разработанная звукоизоляционная деревянная панель предлагает универсальное решение для снижения шума, открывая новые возможности в проектах деревянного домостроения. Применение новых видов древесных плит позволит значительно улучшить технологию строительства и повысить уровень акустического комфорта. Для изучения снижения звукового давления использовались специальные шумоизоляционные древесные панели с внутренними конструктивными элементами в виде параболических полостей, которые способствуют поглощению звука. В данном исследовании изучается внедрение

элементов поглощения звука в деревянные панели для улучшения их шумозащитных свойств. Путем внедрения параболических выемок (или "звуковых карманов") в деревянную панель можно значительно улучшить её звукоизоляционные свойства. Данные конструктивные элементы, выполненные методом фрезерования, способствуют поглощению звука и снижению звукопроводимости панели. Параболические выемки отражают, поглощают и рассеивают звуковые волны, уменьшая переход звука через материал, что способствует снижению уровня шума и улучшению акустического комфорта в помещении, где установлена данная панель.

Ключевые слова: отражение звука, шумоизоляция, конструкция деревянной панели, акустическая полость, звуковая энергия.

Mokhirev A.P., Khramov I.V., Guzovatova A.D. Theoretical substantiation of acoustic cavities in the construction of wooden slabs. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 390–402 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.390-402

The paper presents a study of the design of acoustic characteristics of a soundproof wooden panel. The growing need for effective noise control strategies in various applications, such as wooden house construction, has led to the development of innovative sound insulation materials. This study examines the incorporation of sound-absorbing elements into wooden panels to enhance their sound insulation properties. The theoretical basis for the use of acoustic cavities is based on the principle of acoustic resonators. In the presence of volumetric cavities in the structure, it becomes possible to create resonant phenomena that can significantly affect the sound pressure level and damping of sound waves. Resonation occurring at certain frequencies helps to reduce the intensity of sound, which improves the acoustic characteristics of the finished structure. The design process takes into account the choice of sound-absorbing elements and their integration into the construction of wooden panels. Various sound-absorbing materials such as porous absorbers, microporated panels and resonant cavities are evaluated in terms of their sound absorption coefficients. The optimal configuration is determined by modeling and experimental measurements using standardized methods defined in GOST 27296-2012 «Buildings and structures. Methods for measuring the sound insulation of enclosing structures». The manufacturing technique involves the integration of sound-absorbing elements into the construction of a wooden panel while maintaining its structural integrity. The developed soundproof wooden panel offers a universal solution for noise reduction, opening up new opportunities in wooden house construction projects. The use of new types of wood slabs will significantly improve the construction technology and the level of acoustic comfort. To study the reduction of sound pressure, special sound-insulating wood panels with internal structural elements in the form of parabolic cavities that contribute to sound absorption were used. This study examines the introduction of sound absorption elements into wooden panels to

improve their noise protection properties. By introducing parabolic recesses (or «sound pockets») into a wooden panel, its sound insulation properties can be significantly improved. These structural elements, made by milling, contribute to sound absorption and reduce the sound conductivity of the panel. Parabolic recesses reflect, absorb and disperse sound waves, reducing the transition of sound through the material, which helps to reduce noise levels and improve acoustic comfort in the room where this panel is installed.

Keywords: sound reflection, sound insulation, wooden panel construction, acoustic cavity, sound energy.

МОХИРЕВ Александр Петрович – профессор, научный сотрудник Лесосибирского педагогического института – филиала Сибирского федерального университета;

662544, ул. Победы, д. 42, г. Лесосибирск, Красноярский край, Россия;
профессор кафедры автомобильных дорог и городских сооружений Инженерно-строительного института Сибирского федерального университета, доктор технических наук, доцент. Researcher ID: N-9961-2019. ORCID: 0000-0002-1692-3323.

660041, Свободный пр., д. 82, стр. 1, г. Красноярск, Россия. E-mail: amokhirev@sfu-kras.ru

MOKHIREV Aleksandr P. – DSc (Technical), Professor, researcher at the Lesosibirsk Pedagogical Institute, a branch of the Siberian Federal University;

662544. Pobedy str. 42. Lesosibirsk. Krasnoyarsk Territory. Russia;
Professor at the Department of Highways and Urban Structures of the Civil Engineering Institute of the Siberian Federal University, Associate Professor. Researcher ID: N-9961-2019. ORCID: 0000-0002-1692-3323.

660041. Svobodny av. 82. Build. 1. Krasnoyarsk. Russia. E-mail: amokhirev@sfu-kras.ru

ХРАМОВ Игорь Владимирович – старший преподаватель кафедры высшей математики, экономики и естествознания Лесосибирского педагогического института – филиала Сибирского федерального университета;

662544, ул. Победы, д. 42, г. Лесосибирск, Красноярский край, Россия;
инженер учебной лаборатории испытания строительных материалов и конструкций кафедры строительных конструкций и управляемых систем Инженерно-строительного института Сибирского федерального университета. Researcher ID: AAA-3222-2022. ORCID: 0000-0003-4010-5707.

660041, Свободный пр., д. 82, стр. 1, г. Красноярск, Россия. E-mail: ikhramov@sfu-kras.ru

KHRAMOV Igor V. – Senior Lecturer at the Department of Higher Mathematics, Economics and Natural Sciences of the Lesosibirsk Pedagogical Institute, a branch of the Siberian Federal University;

662544. Pobedy str. 42. Lesosibirsk. Krasnoyarsk Territory. Russia;

Engineer at the educational Laboratory for Testing Building Materials and Structures of the Department of Building Structures and Controlled Systems of the Civil Engineering Institute of the Siberian Federal University. Researcher ID: AAA-3222-2022. ORCID: 0000-0003-4010-5707.

660041. Svobodny av. 82. Build. 1. Krasnoyarsk. Russia. E-mail: ikhramov@sfu-kras.ru

ГУЗОВАТОВА Анна Дмитриевна – студент Инженерно-строительного института Сибирского федерального университета.

660041, Свободный пр., д. 82, стр. 1, г. Красноярск, Россия. E-mail: gusovatova@mail.ru

GUZOVATOVA Anna D. – Student of the Civil Engineering Institute of the Siberian Federal University.

660041. Svobodny av. 82. Build. 1. Krasnoyarsk. Russia. E-mail: gusovatova@mail.ru

А.А. Федяев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДОВ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ (РАДИАЛЬНЫЕ, ТАНГЕНЦИАЛЬНЫЕ)

Введение. Развитие техники и технологий, систем оценки качества сырья и продукции, методов их контроля и диагностики находит отражение во всех отраслях промышленности. Одним из направлений развития является оценка неразрушающими методами контроля предметов труда различных отраслей. Преимущества этих методов очевидны и заключаются во многом в их возможности диагностики как готовой продукции, так и сырья, и материалов на ранних стадиях изготовления продукции различного назначения, при этом испытуемый материал может эксплуатироваться с гарантированными характеристиками.

В последнее время в деревообрабатывающей промышленности находят применение различные методы неразрушающего контроля. К одним из последних в области диагностики древесины и материалов на ее основе относятся [Чубинский и др., 2014, 2015]:

- рентгенография, компьютерная томография – возможность определения дефектных мест, в том числе в kleеных древесных материалах; определение размеров, формы древесных сортиментов, внутренних скрытых пороков, оценка структуры элементов древесины, толщины kleевого слоя материалов из древесины, идентификация породы по макроструктурным признакам и др.;
- тепловидение – оценка качества монтажа готовой продукции из древесины, оценка тепловых свойств готовой конструкции, ее соответствие требованиям, поиск скрытых дефектных зон и т. д.;
- акустическая диагностика – определение плотности древесины, прогнозирование прочности склеивания цельной древесины, оценка монолитности kleевого слоя и однородности материалов из древесины и на ее основе.

Из представленных методов, наиболее безопасными при проведении диагностики в поточном производстве являются акустические методы. К достоинствам этих методов также можно отнести низкую стоимость, возможность получения и обработки результатов в режиме реального време-

ни, корректировки технологии изготовления и др. К недостаткам этих методов относятся: необходимость учета особенностей ультразвуковой диагностики древесины, связанных с возможным отклонением ультразвукового пучка в зависимости от направления годичных слоёв [Чубинский и др., 2012]; необходимость подбора частоты в зависимости от породы древесины и ее размерных характеристик; недостаточная изученность степени влияния различных пороков и дефектов древесины на результат ультразвуковой диагностики, т. е. высокая вероятность получения данных, выходящих за пределы известного ультразвукового «видения» древесины.

Исследования по адаптации ультразвуковых технологий при обследовании древесины позволили установить зависимость между параметрами скорости ультразвука и динамического модуля ее упругости [Бобылева и др., 1978; Колесникова, 2002; Wang et al., 2003; Bucur, 2006; Vázquez et al., 2015; Arriaga et al., 2022]. Также производилась оценка параметров скорости ультразвукового сигнала при разных механических свойствах древесины [Baar et al., 2015; Tippner et al., 2016]. Авторами отмечено, что на результат оказывают влияние такие параметры, как порода и влажность древесины, её пороки и дефекты обработки, тип и частота преобразователей и т. п. Одним из основных недостатков при этом является использование малой частоты ультразвуковых колебаний (до 250 кГц), что значительно увеличивает шаг длины волны и, как следствие, она с большей вероятностью огибает отдельные элементы строения древесины, искажая при этом получаемый результат.

Анализ вариантов ультразвуковой диагностики, результатов ранее проведенных исследований в этой области [Лакатош, 1966; Артемов, Паврос, 1981; Кармадонов, 1987; Голубев, Паврос, 1989; Добротин, Паврос, 1989, 1999; Ермолов, Ланге, 2004; Уголев, 2007; Чубинский и др., 2011, 2014, 2015, 2017] позволили проводить диагностику пиломатериалов на основе временного теневого метода. Суть метода заключается в сквозном прохождении сигнала через объект с фиксацией времени его прохода.

В последние годы проводятся исследования по возможности применения велосимметрического метода акустического контроля в готовой продукции из древесины. Следует отметить, что метод работает при небольшой толщине древесных материалов, когда вероятный дефект огибается ультразвуковой волной. Вызывают сомнение и возможности метода для достоверного определения параметров в текущих условиях. Так, при попытке использования частоты 60 кГц длина волны составляет порядка

23 мм. При такой длине волны возможен поиск только дефектов значительного раскрытия и размера.

Ранее проведенные исследования позволили с использованием теневого метода акустического контроля определять плотность древесины в зависимости от скорости прохождения ультразвука [Чубинский и др., 2011], а также с использованием амплитудно-теневого метода идентифицировать наличие пустот в kleевом слое в kleеных деревянных конструкциях в зависимости от уровня шумового давления [Чубинский и др., 2017].

Особенности ультразвуковой диагностики древесины с одной стороны усложняют этот процесс, а с другой стороны расширяют его возможности за счет анализа получаемых сведений, адаптации их к условиям технологических процессов. Одной из таких особенностей является смещение сигнала, которое дает возможность определения в поточном производстве направления волокон пиломатериалов.

Известно, что в зависимости от расположения на торце пиломатериалов сердцевинных лучей и годичных слоёв их разделяют на радиальные (радиальной распиловки) и тангенциальные (тангенциальной распиловки) в соответствии с ГОСТ Р 54914-2012 «Лесоматериалы. Термины и определения».

Радиальные пиломатериалы с точки зрения их физико-механических свойств представляют наибольший интерес как конструкционные материалы. Кроме того, при формировании kleеных деревянных конструкций (КДК) важным является соблюдение требования к симметрии расположения ламелей в сечении (рис. 1). При этом визуальная сортировка пиломатериалов возможна только при малых объемах производства, а для серийного или массового выпуска продукции необходим способ сортировки пиломатериалов в зависимости от направления сердцевинных лучей и годичных слоёв в режиме реального времени. Таким образом, методика определения напиля пиломатериалов в поточном производстве с применением ультразвуковых технологий представляет интерес.

Методика исследований. Для диагностики использовали ультразвуковой дефектоскоп «А 1214 ЭКСПЕРТ» с двумя преобразователями ПЭП 111-2,5-Кб. Выбор частоты был основан на ранее проведенных различными авторами исследованиях [Лакатош, 1966; Полубояринов, 1976; Кармадонов, 1987; Ермолов, Ланге, 2004; Уголев, 2007], собственных исследованиях [Чубинский и др., 2011, 2012], при которых высокая точность результата была достигнута при частоте 2,5 МГц [Чубинский и др., 2011].

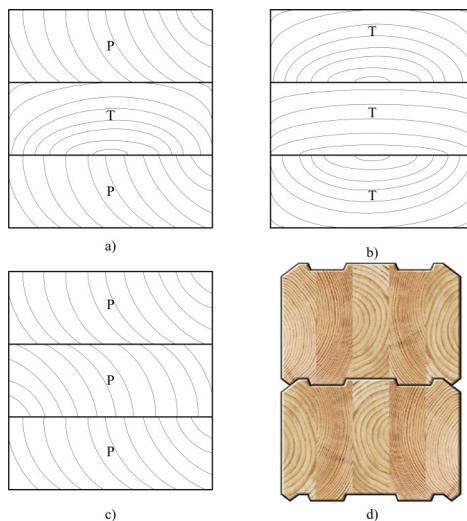


Рис. 1. Пример расположения годичных слоев при склеивании КДК в зависимости от направления сердцевинных лучей и годичных слоёв: а – радиальное (Р) – тангенциальное (Т) – радиальное; б – тангенциальное – тангенциальное – тангенциальное; в – радиальное – радиальное – радиальное; г – пример формирования пятислойного КДК

Fig. 1. An example of the arrangement of annual rings when gluing KDK depending on the direction of the medullary rays and annual rings: a – radial (R) – tangential (T) – radial; b – tangential – tangential – tangential; c – radial – radial – radial; d – an example of the formation of a five-layer KDK

В процессе исследований определяли время прохождения первого сигнала с учетом времени задержки (с учетом прохождения импульса через акустические задержки: призмы или протекторы, контактный слой и т. д.); вычисляли скорость распространения ультразвука в древесине, что позволяло, в том числе, определять плотность древесины [Чубинский и др., 2011].

Методическая сетка проведения эксперимента представлена в табл. 1.

Для повышения достоверности результата при проведении исследований был использован контактный слой. Он может быть представлен в виде жидкости или датчиков с силиконовыми контактными элементами.

Таблица 1

**Методическая сетка проведения эксперимента по исследованию
влияния угла смещения ультразвукового сигнала по оси X
от угла наклона годичного слоя к пласти**

**Methodological grid for conducting an experiment to study the influence
of the angle of displacement of the ultrasonic signal along the X-axis
on the angle of inclination of the annual layer to the plate**

Задача исследования	Постоянные факторы		Критерий оценки	Переменные факторы		Общее количество наблюдений
	Наименование	Значение		Наименование	Значение	
Установить влияние угла смещения ультразвукового сигнала по оси X от угла наклона годичного слоя к пласти	1. Влажность древесины, %	12 ± 2	Угол смещения ультразвукового сигнала по оси X, град	Угол наклона годичного слоя к пласти, град	0–13	84
	2. Плотность древесины, кг/м ³	505±25			13–26	91
	3. Шероховатость поверхности, мкм	24 ± 8			26–39	102
	4. Порода древесины	Сосна			39–52	112
	5. Частота, МГц	2.5			52–65	105
	6. Влажность окружающей среды, %	65			65–78	119
	7. Температура окружающей среды, °C	20 ± 2			78–90	102
	8. Номинальная толщина ламелей, мм	26,5				

Обработка экспериментальных данных проводилась с учетом методики, представленной в [Пижурин, Роземблит, 1984] с определением доверительного интервала и необходимого количества наблюдений с учетом критерия Стьюдента, а также проверкой однородности дисперсий по критерию Кохрена.

Схематическое изображение проведения исследований, а также определения отклонения ультразвукового пучка от направления звукового пучка перпендикулярно пласти показано на рис. 2.

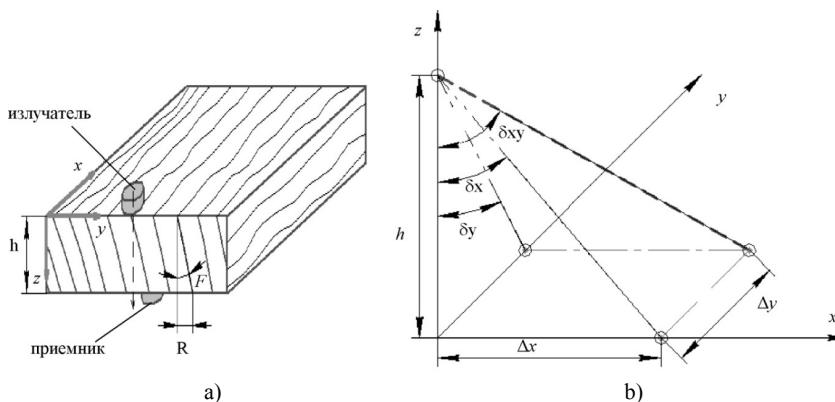


Рис. 2. а – схема проведения измерений; б – отклонение ультразвукового пучка. Δx и Δy – смещение преобразователей относительно друг друга по двум осям X и Y соответственно при максимальной амплитуде прошедшего сигнала; R – отклонение годичного слоя от перпендикуляра, проведенного к пласти; h – толщина образца; F – угол наклона годичного слоя, который вычисляется как $F = \arctg (R/h)$; δx – угол отклонения по X ; δy – угол отклонения по Y ; δ_{xy} – угол отклонения по двум осям X и Y

Fig. 2. a – measurement scheme; b – ultrasonic beam deflection. Δx and Δy – the displacement of the transducers relative to each other along two axes X and Y , respectively, at the maximum amplitude of the transmitted signal; R – the deviation of the annual layer from the perpendicular drawn to the plate; h – the thickness of the sample; F – the angle of inclination of the annual layer, which is calculated as $F = \arctg (R/h)$; δx – the angle of deviation along X ; δy – the angle of deviation along Y ; δ_{xy} – the angle of deviation along two axes X and Y

Схематическое изображение траектории движения в зависимости от расположения сердцевинных лучей и годичных слоёв представлено на рис. 3. На схеме при радиальном направлении волокон не указан угол наклона сердцевинного луча к пласти, так как при таком направлении волокон сердцевинные лучи проходят параллельно или практически параллельно пласти.

Результаты исследований. Учитывая структуру древесины, её анизотропию, звуковой пучок отклоняется, и на преобразователь также приходят другие импульсы с задержкой, обусловленной смещением и прохождением большего расстояния. В зависимости от структуры древесины конкретного пиломатериала это отклонение может быть различным, и в ряде случаев прямой и отклоненный импульсы могут накладываться друг на друга. В процессе исследований определяли координаты прихода (смещения) сигнала относительно излучателя, фиксировали направление волокон у исследуемых образцов.

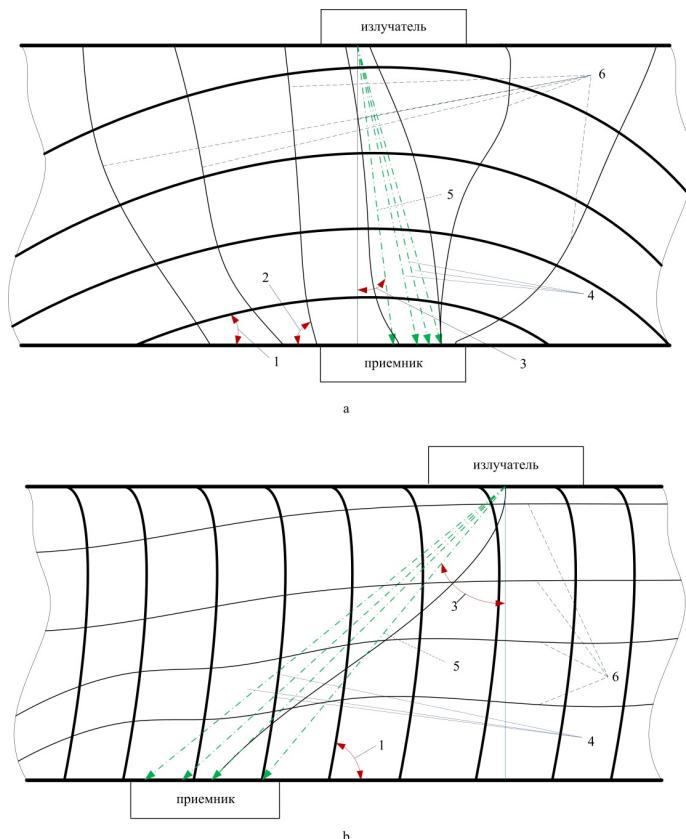


Рис. 3. Схематическое изображение траектории движения пришедших на приемник импульсов в зависимости от расположения сердцевинных лучей и годичных слоёв: а – тангенциальное направление волокон; б – радиальное направление волокон; 1 – угол наклона годичного слоя к пласти; 2 – угол наклона сердцевинного луча к пласти; 3 – δx – угол отклонения по оси X; 4 – импульсы, пришедшие с задержкой; 5 – первый пришедший импульс; 6 – сердцевинные лучи

Fig. 3. Schematic representation of the trajectory of the impulses arriving at the receiver depending on the location of the medullary rays and annual layers: a – tangential direction of the fibers; b – radial direction of the fibers; 1 – angle of inclination of the annual layer to the face; 2 – angle of inclination of the medullary ray to the face; 3 – δx – angle of deviation along the X-axis; 4 – impulses arriving with a delay; 5 – first arriving impulse; 6 – medullary rays

Как видно из схематического изображения траектории движения пришедших на приемник импульсов, направление сигнала близко к направлению расположения сердцевинных лучей. Наиболее вероятно, что ультразвуковой пучок проходит кратчайшее расстояние по более однородной и плотной структуре. С большой долей вероятности первый пришедший сигнал проходит по сердцевинным лучам, представляющим собой ленто-подобное образование из паренхимных клеток, направленное радиально по отношению к слоям роста древесины. При этом прохождению сигнала, возможно, способствует и сама их функция, заключающаяся в основном в проведении воды и питательных веществ, а также хранении запасных питательных веществ.

Проведенные исследования показали, что определение смещения сигнала относительно приемника позволяет судить о направлении сердцевинных лучей и годичных слоёв пиломатериалов. Так, при тангенциальном направлении волокон смещения сигнала относительно излучателя практически не наблюдается. Смещение сигнала при радиальном направлении существенное и зависит от направления годичного слоя и расположения сердцевинных лучей. При этом характер связи между смещением сигнала и направлением волокон носит линейный характер. На рис. 4 представлена зависимость угла смещения ультразвукового сигнала по оси X от угла направления сердцевинных лучей и годичных слоёв.

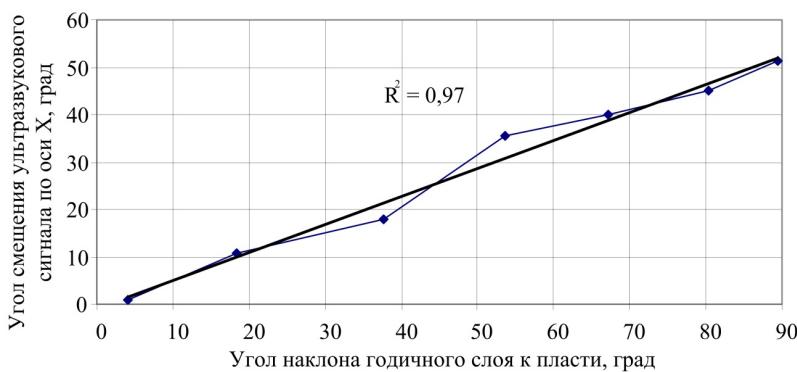


Рис. 4. Зависимость угла смещения ультразвукового сигнала по оси X от угла наклона годичного слоя к пласти.

Fig. 4. Dependence of the angle of displacement of the ultrasonic signal along the X -axis on the angle of inclination of the annual layer to the plate.

Зависимость угла смещения ультразвукового сигнала по оси X от угла наклона годичного слоя к пласти можно представить в виде уравнения (1):

$$\delta x = 0,5898 \cdot F - 0,7391. \quad (1)$$

Смещение сигнала вызвано особенностями прохождения ультразвука через различные материалы. Движение происходит по наиболее однородной и плотной структуре, в обход возможных воздушных пустот.

Представленные результаты доказывают возможность использования ультразвуковых технологий при формировании материалов из древесины различного назначения. При этом область возможного применения ультразвука в деревообработке достаточна обширна и требует проведения дальнейших исследований. Одним из возможных направлений исследований в области ультразвуковой диагностики древесины и материалов на ее основе является идентификация пороков и дефектов древесины.

Заключение. Для определения направления волокон может быть использован временной теневой метод акустического контроля, в результате которого также определяется скорость прохождения ультразвука в древесине, зависящая от структуры пиломатериала. Смещение сигнала от 25° до 53° относительно излучателя свидетельствует о пиломатериалах радиальной или близкой к радиальной распиловки, в то время как смещение сигнала менее 25° определяет пиломатериалы тангенциальной или близкой к тангенциальной распиловки.

Конфликт интересов. Автор заявляет 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.: Лесн. пром-сть, 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.: Лесн. пром-сть, 1966. 183 с.
- Пижурин А.А., Роземблит М.С. Исследования процессов деревообработки. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 232 с.
- Полубояринов О.И. Плотность древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 160 с.
- Уголев Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения. 4-е изд. М.: МГУЛ, 2007. 351 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., Теплоев А.В., Ананьева Н.И., Семишкур С.О., Бахшиева М.А. Физические неразрушающие методы испытания и оценка структуры древесных материалов // Дефектоскопия. 2014. №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.
- 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. Art. no. 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.
- Bucur V. Acoustics of wood. Berlin: Springer, 2006. 393 p.
- Tippner J., Hrvícnák J., Kloiber M. Experimental evaluation of mechanical properties of softwood using acoustic methods // BioResources. 2016. Vol. 11, no. 1. P. 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.
- 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.

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, art. no. 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.
- Bobyleva Yu.N., Davydov S.L., Zaretskiy-Feoktistov G.G. On the issue of determining the elastic parameters of wood by the ultrasonic method. *IVUZ. Forestry journal*, 1978, no. 3, pp. 156–159. (In Russ.)
- Bucur V. Acoustics of wood. Berlin: Springer, 2006. 393 p.
- Chubinsky A.N., Fedyayev A.A., Pavros K.S., Teplyakova A.V. Predicting the gluing strength of planed lumber using ultrasonic diagnostics. *Bulletin of ETU "LETI"*, 2011, no. 7, pp. 109–115. (In Russ.)
- Chubinsky A.N., Fedyayev A.A., Pavros K.S., Teplyakova A.V., Lozak A.A. Study of ultrasonic beam deviation during wood sounding. *Bulletin of ETU "LETI"*, 2012, no. 6, p. 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. *Defectoscopy*, 2014, no. 11, pp. 76–84. (In Russ.)
- Chubinsky A.N., Tambi A.A., Fedyayev A.A., Fedyayeva N.Yu., Kulkov A.M. Directions of use of physical methods of control of the structure and properties of wood. *Systems. Methods. Technologies*, 2015, no. 2 (26), pp. 152–158. (In Russ.)
- Chubinsky A.N., Fedyayev A.A., Shumyakova N., Fedyayeva 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 gen. ed. of V.V. Klyuev. Moscow, 2004, vol. 3. 864 p. (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: Lesn. prom-st', 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: Lesn. prom-st', 1966. 183 p. (In Russ.)

Pizhurin A.A., Rozemblit M.S. Research of woodworking processes. Moscow: Lesn. prom-st', 1984. 232 p. (In Russ.)

Poluboyarinov O.I. Wood density. Moscow: Lesn. prom-st', 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.

Ugolev B.N. Wood science with the basics of forest commodity science. 4th ed. Moscow: MGUL, 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.

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.

Материал поступил в редакцию 20.01.2025

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

Рассмотрена возможность использования ультразвука для определения видов напила пиломатериалов. В зависимости от схемы раскroя (постава) пиломатериалы могут быть радиального или тангенциального напила. Применение определенного вида пиломатериала, принципы их симметричного расположения в kleеных деревянных конструкциях и другие условия зависят от требований к готовой продукции. Визуальная сортировка пиломатериалов по направлению годичных слоёв на торце в поточном производстве нецелесообразна, так как не позволяет обеспечить необходимый уровень производительности труда. Высокую степень достоверности при диагностике цельной древесины показывает временной 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 различную скорость прохождения ультразвука в зависимости от плотности древесины,

смещение ультразвукового сигнала, необходимость обоснованного подбора частоты и т. п. При акустической диагностике в зависимости от варианта напила пиломатериалов наблюдается различное отклонение ультразвукового сигнала. Проведенные исследования показывают, что смещение сигнала наиболее вероятно обусловлено его движением по лентоподобным образованиям из паренхимных клеток, направленным радиально по отношению к слоям роста древесины – сердцевинным лучам. Приводятся результаты исследований, значения углов смещения сигнала в зависимости от вида пиломатериала. Смещение сигнала на угол в диапазоне от 25° до 53° относительно излучателя характерно для радиальных пиломатериалов, а смещение сигнала на угол менее 25° определяет тангенциальные пиломатериалы.

Ключевые слова: пиломатериалы тангенциальной распиловки, пиломатериалы радиальной распиловки, направление годичных слоёв, сердцевинные лучи, ультразвук, отклонение ультразвукового пучка.

Fedyaev A.A. Definition of types of lumber (radial, tangential). *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 403–416 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.403-416

The possibility of using ultrasound to determine the saw cut types of lumber is considered. Depending on the cutting pattern (set), lumber can be radially or tangentially sawn. The use of a certain type of lumber, the principles of their symmetrical arrangement in glued timber structures and other conditions depend on the requirements for finished products. Visual sorting of lumber by the direction of annual layers at the end in flow production is impractical, since it does not ensure the required level of labor productivity. A high degree of reliability in the diagnostics of solid wood is shown by the temporary shadow method of acoustic control. In the framework of the studies, a frequency of 2.5 MHz was used. When sounding wood, due to its anatomical structure, a number of features of the diagnostics itself arise, which allow expanding the possibilities of using the method. Such features include different speeds of ultrasound passage depending on the density of the wood, shifting the ultrasonic signal, the need for a reasonable selection of frequency, etc. During acoustic diagnostics, depending on the sawing option of lumber, different deviations of the ultrasonic signal are observed. The conducted studies show that the signal shift is most likely due to its movement along ribbon-like formations of parenchymatous cells, directed radially with respect to the wood growth layers – medullary rays. The results of the studies, the values of the signal shift angles depending on the type of lumber are given. Signal shift by an angle in the range from 25° to 53° relative to the emitter is typical for radial lumber, and signal shift by an angle of less than 25° determines tangential lumber.

Keywords: tangentially sawn timber, radial sawn timber, direction of annual layers, medullary rays, ultrasound, ultrasonic beam deflection.

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 Forestry 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

А.Р. Бирман, С.А. Угрюмов

ПРОИЗВОДСТВО ЗАГОТОВОК ДЛЯ ТОРЦОВЫХ ШАШЕК МЕТОДОМ РАСКАЛЫВАНИЯ

Введение. Применение торцевых шашек из древесины для формирования напольных покрытий известно с начала XX века. В основном торцевые шашки настилались в складских и производственных помещениях, где полы подвергались значительным нагрузкам. Торцевые шашки повышенной жесткости и износостойкости использовались для дорожных покрытий [Сугаипов, 2000].

Изготовление торцевых шашек позволяет вовлечь в производство тонкомерную древесину в виде отрезков хвойных вершинок и отрезков деревообработки, что важно для ресурсосбережения в лесной отрасли. Применяются торцевые шашки квадратной, прямоугольной или шестигранной формы. Размеры шашек определяются параметрами сырья [Черных, Ильюшенков, 2006; Белоногова, Бирман, 2009].

В производственных помещениях шашки укладываются на бетонное основание или на подстилающий слой (рис. 1).

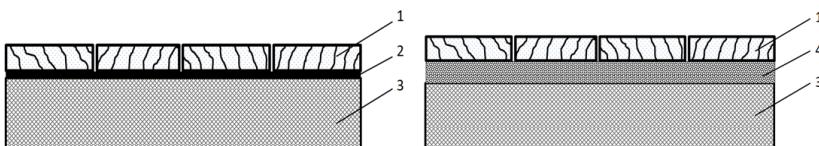


Рис. 1. Укладка торцевых деревянных шашек в производственных помещениях:

1 – торцевая шашка; 2 – слой битумной мастики; 3 – бетонное перекрытие;
4 – слой песка

Fig. 1. Laying of end wooden blocks in industrial premises:

1 – end block; 2 – layer of bitumen mastic; 3 – concrete floor; 4 – layer of sand

В настоящее время проявляется повышенный интерес к подобным напольным покрытиям, поскольку, кроме промышленных напольных покрытий, можно изготавливать высокохудожественные полы по индивидуальным проектам в жилых и общественных зданиях (рис. 2).



Рис. 2. Покрытие из шестиугольных и квадратных торцевых деревянных шашек в жилых и общественных зданиях

Fig. 2. Coating of hexagonal and square end pieces of wood in residential and public buildings

В жилых помещениях шашки приклеивают на основание с применением полиуретанового клея или иным kleем для укладки паркета (рис. 3). Пол из деревянных торцевых шашек прочен, имеет малую теплопроводность.



Рис. 3. Устройство пола из торцевых деревянных шашек в жилых помещениях

Fig. 3. Installation of a floor made of end wooden blocks in residential premises

Технология производства торцевых шашек включает операции разделки круглых лесоматериалов и формирования вертикальных граней.

Большим спросом пользовались торцовые шашки, изготавливаемые по технологии, разработанной на кафедре ТЛЗП Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета и выпускаемые на предприятии АО «Арсенал-207» [Угрюмов и др., 2022].

Разработанная технология позволяла производить экологически чистые, дешевые напольные покрытия из натуральной древесины, используя круглые лесоматериалы малых диаметров (от 7 до 12 см), в том числе вершинник и толстые сучья, то есть фактически отходы деревопереработки.

Торцовую поверхность шашек, в конечном потребительском виде, шлифовали, покрывали лаком, в результате чего проявлялась оригинальная текстура и рисунок в виде годичных колец на поперечном срезе древесины. За счет применения различных пород древесины, а также разных размеров заготовок можно было создавать практически любые композиции и тоновые сочетания покрытий, например, приведенные на рис. 2.

Образцы продукции АО «Арсенал-207» экспонировались на российских и международных выставках и пользовались заслуженным интересом. Технология производства такой продукции, разработанная кафедрой ТЛЗП, была защищена патентами РФ, а сами изделия сертифицированы [Угрюмов и др., 2022].

Однако технология изготовления напольных деревянных покрытий из торцовых шашек, имеющих форму правильной призмы с основанием в виде шестиугольника, апробированная на АО «Арсенал-207», имеет существенный недостаток. Он заключается в том, что выполнение вертикальных граней призмы на предварительно вырубленных цилиндрических заготовках осуществляется методом контурного прессования, что значительно усложняет производство. Кроме этого, уплотненная прессованием древесина, как показали наблюдения за уже настеленными напольными покрытиями, имела тенденцию к распрессовке не только при прямом воздействии воды, но и за счет влажности атмосферы помещений. Устранение явления разбухания древесины за счет обработки торцовых шашек гидрофобными материалами требовало использования дополнительного оборудования и значительных дополнительных финансовых затрат [Бирман и др., 2014; Хитров и др., 2020].

Целью работы является разработка способа и оборудования для получения торцовых шашек с уменьшенными производственными затратами за счет снижения силы резания при продольном формировании поперечного профиля.

Методика исследования. В работе использованы методы проектирования технологического оборудования, учитывающие специфику продольного деления древесины при внедрении режущего инструмента.

Результаты исследований. Нами предлагается способ и оборудование для его осуществления, позволяющие получить призматические (4-, 6-гранные) торцевые шашки методом раскалывания.

В настоящее время раскалывают круглые короткомерные сортименты длиной до 1,25 м. Получают колотые балансы, сырье для производства щепы, древесностружечных плит, продуктов химической переработки, дров для отопления, углежжения. Рабочими органами колунов являются двухгранные клинья, устанавливаемые в наиболее часто используемых цепных и гидравлических колунах. В станках для выработки колотых балансов используют кольцевые ножи.

Применение предлагаемого способа раскалывания заготовок для торцевых шашек позволяет уменьшить себестоимость продукции [Глебов, 2005; Локштанов и др., 2016; Матэр, Бирман, 2021].

Сущность предлагаемого технического решения поясняется на рис. 4.

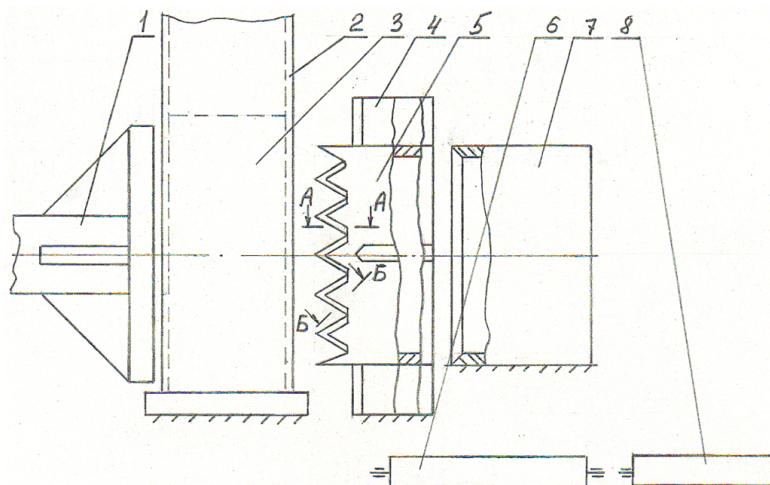


Рис. 4. Схема установки для получения 4-гранных торцевых шашек
Fig. 4. Installation diagram for producing tetrahedral end pieces

Установка работает следующим образом. Раскряжеванные круглые лесоматериалы 3 (заготовки) размещают в вертикальном питателе 2.

С помощью толкателя 1, к которому проложено горизонтальное усилие привода (на рис. 4 условно не показан), заготовки 3 надвигают продольной осью на квадратный полый корпус 5, торцевая режущая кромка которого выполнена в виде равномерно чередующихся треугольных зубьев, имеющих по две режущие кромки, симметрично расположенные под углом $\alpha_3 = 45^\circ$ относительно вектора скорости подачи заготовки 3 на корпус 5 (рис. 5а). Наклон режущих кромок зубьев под углом α_2 обеспечивает условие, при котором угол резания кромок зубьев α_2 (рис. 5б) меньше угла заострения α_1 (рис. 5с).

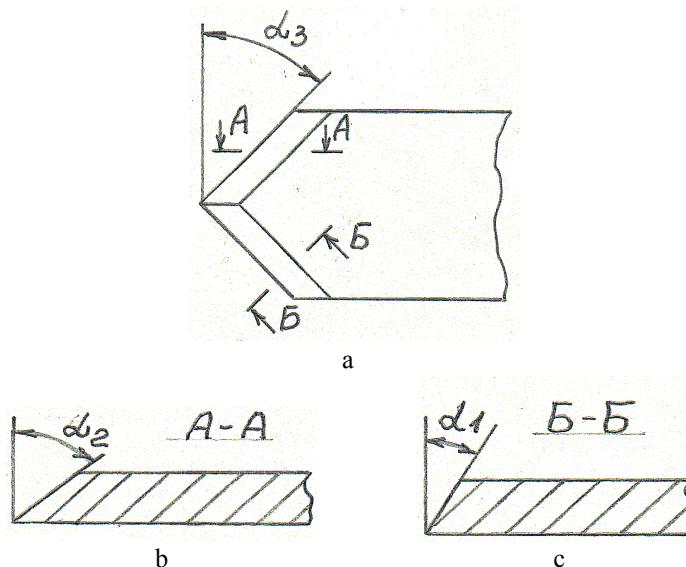


Рис. 5. Углы наклона, заточки и резания зубьев корпуса:
а – зуб; б – сечение Б-Б на рис. 4; в – сечение А-А на рис. 4

Fig. 5. Angles of inclination, sharpening and cutting of the teeth of the housing: a – tooth; b – section B-B in fig. 4; c is the section A-A in fig. 4

На внешней стороне корпуса 5 находятся продольные ножи, выполненные плоскими и расположенные радиально относительно оси корпуса. В результате продвижения заготовки через корпус 5 вырезают и выдавливают торцовую шашку, имеющую профиль поперечного сечения, соответствующий внутреннему профилю поперечного сечения пустотелого корпуса 5. Одновременно с этим с помощью продольных ножей 4 происходит

раскалывание периферийной части лесоматериала на заготовки в виде когтевого горбыля.

Торцевые шашки и отрезки горбыля, полученные предыдущим раскалыванием заготовки, проталкиваются в направлении подачи отрезками от последующего раскалывания и падают на ленты транспортеров 6 и 8. Приемная обойма 7 служит для разделения потоков торцевых шашек и расколотого горбыля.

Выполнение на торцевой кромке корпуса 5 равномерно чередующихся треугольных зубьев с расположением режущей кромки под углом 45° к волокнам заготовок 3 обеспечивает снижение энергетических затрат при раскалывании древесины.

Это объясняется тем, что «чем больше угол резания, тем сильнее деформация материала перед лезвием и больше сила резания» [Матэр, Бирман, 2021].

Отметим, что необходимо различать угол резания (замеряемый в плоскости, нормальной к поверхности резания и параллельной вектору скорости резания) и угол заострения (замеряемый в плоскости, перпендикулярной к лезвию резца). При отсутствии наклона лезвия, то есть в том случае, когда режущая кромка лезвия перпендикулярна волокнам древесины, обе эти плоскости совпадают и угол резания равен углу заострения, что имеет место в инструментах известных колунов. В предлагаемом техническом решении за счет наклона лезвия на угол $\alpha_3 = 45^\circ$ по отношению к волокнам древесины угол резания α_2 меньше угла заострения α_1 (рис. 5). Отметим также, что уменьшение угла резания для режущих кромок, перпендикулярных волокнам древесины, снижает прочность режущих кромок.

Повышение качества профильных заготовок достигается получением заданного поперечного профиля заготовки на большей, по отношению к прототипу, ее длине. Это объясняется тем, что при обработке на предлагаемой установке внедряемый инструмент с меньшим углом резания на начальном этапе внедрения режет, а не раскалывает древесину.

При внедрении режущей кромки в древесину с применением известных колунов в раскалываемом лесоматериале образуется щель, после чего режущая кромка уже не соприкасается с древесиной. При продвижении режущей кромки на величину, равную $\Delta/5-6$ (Δ – длина заготовки), материал раскалывается, а его форма при этом зависит от внутреннего строения и связей волокон древесины [Глебов, 2005]. В предлагаемом техническом решении за счет уменьшения угла резания на начальном этапе внедрения

происходит резание, а не раскалывание. Замена процесса раскалывания на процесс резания позволяет обеспечить сохранение заданного поперечного профиля вырубаемой заготовки. Это важно, так как сохранение формы поперечного сечения заготовки по наибольшей длине обеспечит уменьшение отходов при выработке конечной продукции [Залегаллер и др., 1984; Онегин, Чубинский, 2001].

Кроме торцовых шашек на оборудовании, изображенном на рис. 4, можно изготавливать и другие товары народного потребления, например, квадратные прокладки для соединения верхней и нижней поверхностей строительных грузовых поддонов.

Выход. Предлагаемое техническое решение позволит снизить энергетические затраты при вырубании призматических торцовых шашек из круглых лесоматериалов, а также вовлечь в производство мало используемую тонкомерную древесину.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Белоногова Н.А., Бирман А.Р. Новые направления использования древесины осины и ее отходов // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: мат. межд. науч.-тех. конф. Вологда, 2009. С. 65–67.

Бирман А.Р., Соколова В.А., Кривоногова А.С. Пропитка древесины гидростатическим способом // Актуальные направления научных исследований ХХI века: теория и практика: сб. науч. тр. по мат. межд. науч.-практ. конф. №5, ч.4. С. 33–38.

Глебов И.Т. Расчет режимов резания древесины: монография. Екатеринбург: УГЛТУ, 2005. 155 с.

Залегаллер Б.Г., Ласточкин П.В., Бойков С.П. Технология и оборудование лесных складов: учеб. для вузов. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 352 с.

Локштанов Б.М., Пейович Д.Д., Елисеев А.А. Процесс раскалывания бревен в технологии комплексного использования древесины // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: мат. науч.-практ. конф. Вологда, 2016. С. 26–28.

Матэр О.М., Бирман А.Р. Деревянные покрытия из торцовых шашек // Февральские чтения: сб. мат. науч.-практ. конф. по итогам НИР 2020 г. Сыктывкар, 2021. С. 11–13.

Онегин В.И., Чубинский А.Н. Промышленное использование древесины осины – эффективное направление устойчивого управление лесами // Записки Горного института. Экология и рациональное природопользование. 2001. Т. 149. С. 225–227.

Сугаипов У.У. Обоснование способа сплошной пропитки и уплотнения при производстве торцовой шашки из низкосортной древесины: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб.: ЛТА, 2000. 20 с.

Угрюмов С.А., Тамби А.А., Бирман А.Р. Свойкин Ф.В. Клеевые напольные покрытия на основе деревянных торцовых шашек // Клеи. Герметики. Технологии. 2022. № 2. С. 35–38.

Хитров Е.Г., Бирман А.Р., Угрюмов С.А., Тамби А.А. Теоретические и практические основы пропитки деревянных сортиментов за счет гидростатического давления пропиточной жидкости // Клеи. Герметики. Технологии. 2020. № 5. С. 33–37.

Черных А.Г., Ильюшенков Л.В. Получение радиальных черновых заготовок // ИВУЗ. Лесной журнал. 2006. № 3. С. 46–51.

References

Belonogova N.A., Birman A.R. New directions for the use of aspen wood and its waste. *Actual problems of the development of the forest complex*: proceedings of the int. sci.-tech. conf. Vologda, 2009, pp. 65–67. (In Russ.)

Birman A.R., Sokolova V.A., Krivonogova A.S. Impregnation of wood by hydrostatic method. *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice: collection of scientific papers based on the mat. of the int. sci.-pract. conf.*, 2014, no. 5, part 4, pp. 33–38. (In Russ.)

Chernykh A.G., Ilyushenkov L.V. Obtaining radial rough blanks. *IVUZ. Lesnoy zhurnal*, 2006, no. 3, pp. 46–51. (In Russ.)

Glebov I.T. Calculation of wood cutting modes: monograph. Ekaterinburg: USFTU, 2005. 155 p. (In Russ.)

Khitrov E.G., Birman A.R., Uglyumov S.A., Tambi A.A. Theoretical and practical foundations of impregnation of wooden grades due to hydrostatic pressure of an impregnating liquid. *Glues. Sealants. Technologies*, 2020, no. 5, pp. 33–37. (In Russ.)

Lokshitanov B.M., Peyovich D.D., Eliseev A.A. The process of splitting logs in the technology of integrated wood use. *Actual problems of the development of the forest complex*: proceedings of the sci.-pract. conf. Vologda, 2016, pp. 26–28. (In Russ.)

Mather O.M., Birman A.R. Wooden coverings from end pieces. *February readings*: collection of mat. of the sci.-pract. conf. on the results of research in 2020. Syktyvkar, 2021, pp. 11–13. (In Russ.)

Onegin V.I., Chubinsky A.N. Industrial use of aspen wood as an effective direction for sustainable forest management. *Notes of the Mining Institute. Ecology and Rational Use of Natural Resources*, 2001, vol. 149, pp. 225–227. (In Russ.)

Sugaipov U.U. Justification of the method of continuous impregnation and sealing in the production of end pieces from low-grade wood: author's abstract. Diss. ... Cand. Tech. Sci. St. Petersburg: LTA, 2000. 20 p. (In Russ.)

*Ugryumov S.A., Tambi A.A., Birman A.R., Svoikin F.V. Glued floor coverings based on wooden end pieces. *Glues. Sealants. Technologies*, 2022, no. 2, pp. 35–38. (In Russ.)*

Zalegaller B.G., Lastochkin P.V., Boikov S.P. Technology and equipment of timber warehouses: textbook for universities. Moscow: Lesn. prom-st', 1984. 352 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 30.02.2025

Бирман А.Р., Угрюмов С.А. Производство заготовок для торцевых шашек методом раскалывания // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 417–427. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.417-427

Изготовление торцевых шашек различной формы позволяет рационально использовать тонкомерную древесину в виде отрезков хвойных вершинок и отрезков деревопереработки. На основе торцевых шашек можно изготавливать высокохудожественные полы по индивидуальным проектам в жилых и общественных зданиях. Технология изготовления напольных деревянных покрытий из торцевых шашек имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что выполнение вертикальных граней шашки на предварительно вырубленных цилиндрических заготовках осуществляется методом контурного прессования, что значительно усложняет производство. В рамках данного исследования разработаны способ и оборудование для получения призматических торцевых шашек методом раскалывания. По предлагаемому способу раскряженные круглые лесоматериалы (заготовки) размещают в вертикальном питателе. С помощью толкателя заготовки надвигают продольной осью на квадратный полый корпус, торцевая режущая кромка которого выполнена в виде равномерно чередующихся треугольных зубьев, имеющих по две режущие кромки, симметрично расположенные под углом 45° относительно вектора скорости подачи заготовки на корпус. На внешней стороне корпуса расположены продольные ножи, выполненные плоскими и расположенные радиально относительно оси корпуса. В результате продвижения заготовки через корпус вырезают и выдавливают торцовую шашку, имеющую профиль поперечного сечения, соответствующий внутреннему профилю поперечного сечения пустотелого корпуса. Одновременно с этим с помощью продольных ножей происходит раскалывание периферийной части лесоматериала на заготовки в виде колотого горбыля. Высокое качество профильных заготовок достигается получением заданного поперечного профиля заготовки на большей, по отношению к аналогам, ее длине. Это объясняется тем, что при обработке на

предлагаемой установке внедряемый инструмент с меньшим углом резания на начальном этапе внедрения режет, а не раскалывает древесину.

Ключевые слова: древесина, напольное покрытие, торцовая шашка, раскалывание, резание, укладка.

Birman A.R., Ugryumov S.A. Production of blanks for end pieces by splitting. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 417–427 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.417-427

The manufacture of end pieces of various shapes makes it possible to use rationally fine-grained wood in the form of segments of coniferous tops and segments of wood processing. Based on end blocks, highly artistic floors can be made according to individual projects in residential and public buildings. The technology of manufacturing wooden floor coverings from end checkers has a significant drawback, which is that the vertical edges of the checkers on pre-cut cylindrical blanks were carried out by contour pressing, which significantly complicates production. As part of this work, a method and equipment have been developed for producing prismatic end pieces by splitting. According to the proposed method, buckled round logs (blanks) are placed in a vertical feeder. Using a pusher, the workpiece is pushed longitudinally onto a square hollow body, the end cutting edge of which is made in the form of evenly alternating triangular teeth having two cutting edges symmetrically arranged at an angle of 45° relative to the feed velocity vector of the workpiece onto the body. On the outside of the housing there are longitudinal knives made flat and radially positioned relative to the axis of the housing. As a result of the advance of the workpiece through the body, an end piece having a cross-sectional profile corresponding to the internal cross-sectional profile of the hollow body is cut out and extruded. At the same time, with the help of longitudinal knives, the peripheral part of the timber is split into blanks in the form of a split hump. The high quality of the profile blanks is achieved by obtaining a given transverse profile of the workpiece at a greater length than its analogues. This is explained by the fact that when processing at the proposed installation, the tool being implemented with a smaller cutting angle cuts rather than splits the wood at the initial stage of implementation.

Ключевые слова: wood, flooring, end block, splitting, cutting, laying.

БИРМАН Алексей Романович – профессор кафедры технологии лесозаготовительных производств Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор технических наук. ResearcherID: X-3713-2019. ORCID: 0000-0002-1693-0515.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: birman1947@mail.ru

BIRMAN Aleksey R. – DSc (Technical), Professor of the technologies of logging industries department, St.Petersburg State Forest Technical University. ResearcherID: X-3713-2019. ORCID: 0000-0002-1693-0515.

194021. Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: birman1947@mail.ru

УГРЮМОВ Сергей Алексеевич – профессор кафедры технологии лесозаготовительных производств Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор технических наук. ResearcherID: F-6510-2016. ORCID: 0000-0002-8077-3542.

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

UGRYUMOV Sergei A. – DSc (Technical), Professor of the technologies of logging industries department, St.Petersburg State Forest Technical University. ResearcherID: F-6510-2016. ORCID: 0000-0002-8077-3542.

194021. Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: ugr-s@yandex.ru

5. ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ. БИОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 62.784.43

А.В. Зайцев, В.К. Дубовый, И.Н. Ковернинский, Е.И. Симонова

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПОЛИМЕРПЕСЧАНЫХ ПЛИТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТХОДОВ МАКУЛАТУРЫ МС-5Б И МС-6Б КАК ЭФФЕКТИВНОГО СВЯЗУЮЩЕГО

Введение. Собираемая ежегодно в мире макулатура перерабатывается преимущественно в бумагу и картон [Дулькин и др. 2006; Дулькин, 2008; Ванчаков и др., 2011; Recycled..., 2000; Forest..., 2021–2022]. Превалирующим потребителем вторичного волокна было и остается производство тарного (до 30%) и коробочного картона (до 20%) [Савицкий, Шевляков, 2000; Дулькин, Спиридовон, 2003; Дулькин и др., 2003; Дулькин и др., 2004; Ковалева, 2005, 2007; Комаров и др., 2005; Смолин, Дубовый, 2006; Смолин и др., 2014; Menges, 1984]. В соответствии с ГОСТ 107000-97 сырьем для гофропродукции служит макулатура группы «Б», марок МС-5Б и МС-6Б [Яблочкин и др., 2004; Hansen, 2017].

Полимерпесчанные плиты – это композиция песка и полимеров, которые используются в качестве связующего [Khan, Ghafoor, 2022; Nguyen, Kim, 2023]. В исследовании рассмотрена возможность использования отходов макулатуры, которая представляет из себя смесь волокон вторичной переработки целлюлозы как природного полимера и синтетических полимеров. Эта масса отходов подвергается переработке в полимерпесчанные плиты по разработанной автором (Зайцев А.В.) технологии. Основой технологического решения является использование отходов макулатуры МС-5Б и МС-6Б, в качестве связующего.

Цель работы – исследование качественных характеристик полимерпесчаных плит с использованием отходов макулатуры МС-5Б и МС-6Б как эффективного связующего.

Материалы и методика исследования. Объекты исследования – полимерпесчаные плиты с различным соотношением связующего из отходов макулатуры и минерального наполнителя.

В ходе испытаний определяли толщину образцов, предел прочности при статическом изгибе, предел прочности при динамическом изгибе (ударную вязкость), истираемость и водопоглощение образцов после выдержки в холодной воде в течение 24 ч. Толщину определяли на каждом образце по четырём точкам с использованием толщинометра ручного ТР 25-60Б.

Определение предела прочности при статическом изгибе. Предел прочности при статическом изгибе определяли согласно ГОСТ 10635–88. Образцы размером 180×50 мм укладывают на опоры испытательной машины так, чтобы продольная ось образца была перпендикулярна опорам, а поперечная – параллельна оси ножа. Расстояние между опорами – 150 мм. Скорость движения нагружающей головки устанавливают равной 10 мм/мин. Предел прочности при статическом изгибе ($\sigma_{изг}$, МПа) рассчитывают по формуле (1):

$$\sigma_{изг} = \frac{3Pl}{2bh^2} \cdot 9,81, \quad (1)$$

где P – разрушающая нагрузка, кг/см²; l – расстояние между опорами на испытательной машине (100 мм); b – ширина образца, мм; h – толщина образца, мм.

Определение предела прочности при динамическом изгибе (ударной вязкости). Ударную вязкость определяли согласно ГОСТ 9626–90. Маятник копра взводили на угол 120°. Стрелку индикатора маятника устанавливали на 0°. Маятник освобождали и после его остановки по индикатору определяли угол его холостого хода. Затем на опоры копра устанавливали испытуемый образец. Маятник копра взводили на угол 120°. Стрелку индикатора маятника устанавливали на 0°. Освобождали маятник. После разрушения образца и остановки маятника определяли по индикатору угол рабочего хода. Ударную вязкость (α , кДж/м²), рассчитывали по формуле (2):

$$\alpha = \frac{A}{S}, \quad (2)$$

где A – работа, затрачиваемая на разрушение образца, кДж; S – площадь поперечного сечения образца, м². Работу рассчитывали по формуле (3):

$$A = 9,8PL(\cos\beta - \cos\alpha) \cdot 10^{-3}, \quad (3)$$

где P – масса маятника (1 кг); L – длина маятника (0,43 м); β – угол рабочего хода маятника, град; α – угол холостого хода маятника, град.

Определение истираемости. Истираемость определяли по ГОСТ 30629-2011. Сущность метода заключается в определении потери массы или объема образца, прошедшего путь истирания 600 м. Круги истирания должны иметь съемный, вращающийся в горизонтальной плоскости истирающий диск, изготовленный из серого чугуна твердостью по Шору 30–50 (185–215 кН/см²).

На поверхности истирающего диска не допускаются выбоины и углубления шириной более 5 мм и глубиной более 0,5 мм. Скорость вращения истирающего диска под нагрузкой должна быть (30 + 1) об/мин. Истираемость $R_{ист}$, г/см², вычисляют с точностью до 0,1 г/см² по формуле (4):

$$R_{ист} = \frac{m - m_1}{S}, \quad (4)$$

где m – масса образца до испытания, г; m_1 – масса образца после испытания, г; S – площадь опорной грани образца, см²;

Определение водопоглощения при выдержке в воде в течение 24 ч. Образцы размером 50×50 мм взвешивали на весах с точностью до 0,01 г. В четырёх точках определяли толщину каждого образца. Образцы погружали в ванну с водой в вертикальном положении. Уровень воды в ванне должен быть на 20 мм выше образцов, температура воды 20±2 °С. Через 24 ч образцы извлекали из ванны, взвешивали и определяли их толщину. Перед взвешиванием образцы промокали фильтровальной бумагой. Водопоглощение (ΔW_x , %) рассчитывали по формуле (5):

$$\Delta W_x = \frac{m_2 - m_1}{m_1}, \quad (5)$$

где m_1 – масса образца до погружения в воду, г; m_2 – масса образца после выдержки в воде, г.

Результаты исследования. На первом этапе исследования был проведен анализ компонентного состава отходов макулатуры. Результаты исследования приведены в табл. 1.

Таблица 1

Компонентный состав отходов макулатуры

Component composition of waste paper

№ п/п	Виды компонентов в отходах макулатуры	Содержание компонентов, %
1.	Пластики (полимерные пленки, скотч, изолента)	51
2	Волокно (не расpusкаемые на волокна бумажно-картонные материалы, мелкое волокно)	20
3	Вторичные материалы переработки древесины (щепки, костра, опилки)	2
4	Минералы (гравий, цемент, гипс, песок, мел, земля);	4
5	Металлы (замки для папок, проволока, металлическая лента, скрепки, гвозди, болты, шурупы, гайки)	6
6	Резина	1
7	Ткань	1
8	Вода (влажность)	15

Из данных, представленных в табл. 1, следует, что 51% отходов макулатуры составляют синтетические полимеры, а 20% – волокна вторичной переработки древесной целлюлозы как природного полимера. На втором этапе исследования было определено влияние соотношения связующего из отходов макулатуры и наполнителя на физико-механические свойства полимерпесчаных плит. Одной из задач исследования было получение зависимости влияния органической фракции, в качестве связующего, и минеральной фракции, в качестве наполнителя, на физико-механические свойства полимерпесчаных плит. Полимерпесчаные плиты относятся к строительным композиционным материалам, которым присущи положительные необходимые потребительские свойства, согласно ГОСТ Б.В. 2.7.–139:2007: плотность, кг/м³, истираемость, г/см², водопоглощение, %; прочность при статическом изгибе, МПа; предел прочности при динамическом изгибе (ударная вязкость), кДж/м².

Несмотря на указанные положительные качества, полимерпесчаные плиты имеют недостатки:

1. плитки могут расширяться при воздействии высоких температур и неправильной укладке: важно выдерживать правильный зазор между элементами (не менее 5 мм) и монтировать только на клей, песок, щебень или цемент;

2. высокое содержание полимера обуславливает возможность деформирования и обугливания при воздействии высоких температур.

Указанные недостатки несущественно влияют на востребованность плит. С учетом их свойств, плиты широко применяются в городских и дачных ландшафтах, в строительстве.

Для достижения поставленной цели были определены количественные параметры потребительских свойств при заданных геометрических размерах образцов полимерпесчаных плит. Они представлены в табл. 2.

Таблица 2

Необходимые количественные параметры полимерпесчаных плит

Necessary quantitative parameters of polymer-sanded slabs

Свойства	Значение
Плотность	1600–2600 кг/м ³
Истираемость	Не более 0,1 г/см ²
Водопоглощение	Не более 2,0%
Предел прочности при статическом изгибе	Не менее 7,5 МПа
Предел прочности при динамическом изгибе (ударная вязкость)	Не менее 3,3 кДж/м ²
Размер плитки	330 × 330 × 15 мм

Для получения исследуемых образцов плит использовалась технологическая установка ОАО «Караваево». Были изготовлены образцы плит размером 330×330×15 мм с различной композицией, состоящей в основном из песка и макулатурных отходов. Характеристика компонентов: песок карьерный просеянный – влажность 2–5%, фракция 1,5–2 мм. Отходы макулатурно-бумажного производства (дробленая и высушенная смесь различных полимеров и макулатурного волокна): влажность 3%, фракция 10 мм.

С целью получения более наглядной картины влияния связующего (макулатурные отходы) на физико-механические свойства полимерпесчаных плит были изготовлены и испытаны плиты с композицией, где присутствовал дробленый (до 10 мм) полипропилен белого цвета с соотношением компонентов: песок/макулатурные отходы/полипропилен – 50/45/5 и 50/40/10. Все образцы изготавливались при одном и том же температурном режиме с 4 зонами нагрева по порядку: 1 зона (прогрев) – 170 °C, 2 зона (доведение до нужной температуры) – 190 °C; 3, 4 зона (расплав и прессование) – 220 °C. Результаты исследований полученных образцов полимерпесчаных плит представлены в табл. 3. Зависимости влияния компонентного состава полимерпесчаных плит на физико-механические свойства представлены на рис. 1–3.

Таблица 3

Физико-механические результаты исследований образцов полимерпесчаных плит

Physico-mechanical results of studies of polymer sanded plates samples

№ образца	Композиция песок/отходы/полимер, %	Прочность при статическом изгибе, F, МПа	Ударная вязкость, Q, кДж/м ²	Водопоглощение, G, %	Истираемость E, г/см ²	Плотность, кг/м ³
1	90/10	5,1	2,4	2,5	0,30	2750
2	80/20	6,0	2,6	2,3	0,25	2600
3	70/30	7,1	2,8	2,1	0,20	2450
4	60/40	7,3	3,0	1,9	0,15	2300
5	50/50	7,5	3,3	1,7	0,10	2150
6	40/60	7,8	3,5	1,4	0,09	2000
7	30/70	8,0	3,7	1,1	0,08	1900
9	20/80	8,4	3,9	0,9	0,08	1800
10	10/90	8,9	4,2	0,8	0,07	1700
11	100	10,0	4,5	0,7	0,07	1600
12	50/45/5	10,6	4,9	0,8	0,09	2150
13	50/40/10	11,1	5,4	0,7	0,08	2100

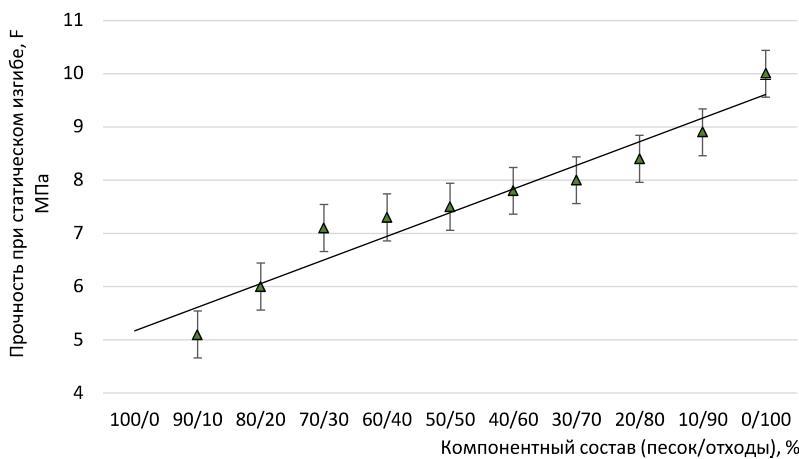


Рис. 1. Влияние компонентного состава полимерпесчаных плит на предел прочности при статическом изгибе (F , МПа)

Fig. 1. Influence of the component composition of polymer-sanded plates on the tensile strength under static bending (F , MPa)

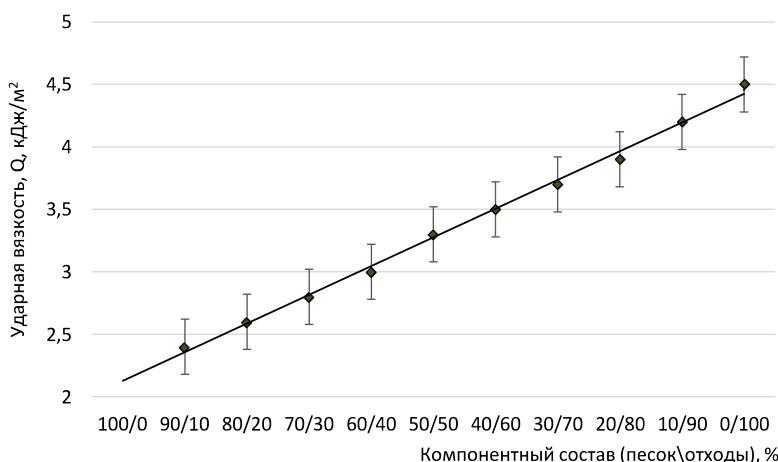


Рис. 2. Влияние компонентного состава полимерпесчаных плит на ударную вязкость. (Q , кДж/м²)

Fig. 2. Influence of the component composition of polymer-sanded plates on impact strength. (Q , kJ/m²)

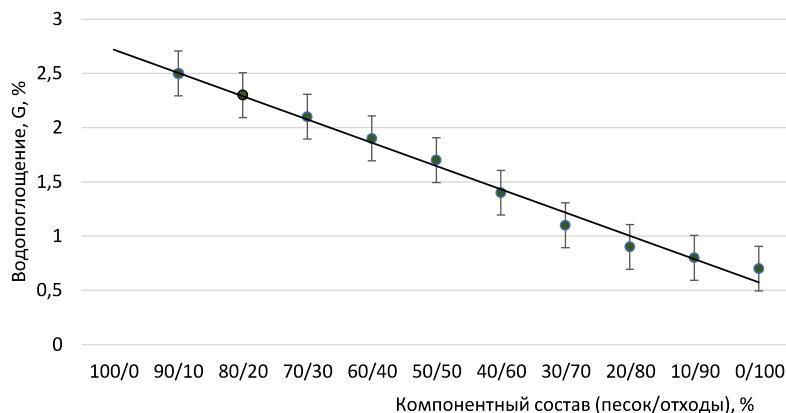


Рис. 3. Влияние компонентного состава полимерпесчаных плит на водопоглощение (G, %)

Fig. 3. Influence of the component composition of polymer-sanded slabs on water absorption (G, %)

Обсуждение. Анализ полученных результатов проведенных исследований физико-механических свойств полимерпесчаных плит свидетельствует о наличии зависимостей в системе «состав – свойства».

Предел прочности при статическом изгибе плиты пропорционально увеличивается по линейной зависимости, со снижением доли песка в композиции. В пределах содержания песка 90...10% он возрастает на 78% (рис. 1). В исследуемых пределах достигаемой прочности были определены композиции «песок/отходы» – 50/50 и 40/60, соответствующие пределу прочности при статическом изгибе 7,5 и 7,8 МПа, обеспечивающему достаточные эксплуатационные свойства полимерпесчаных плит.

Ударная вязкость плит в пределах снижения доли песка 90...10% повышается на 118% (рис. 2). Установленные пределы ударной вязкости характеризуют плиты как материал, эффективно поглощающий ударную энергию. Величина ударной вязкости при соотношении «песок/отходы» в композиции 50/50 и 40/60 соответствует значениям 3,3 и 3,5 кДж/м², которые являются минимально достаточными при эксплуатации полимерпесчаных плит.

Показатель водопоглощения в пределах снижения доли песка 90...10% снижается на 40% (рис. 3). Установленные пределы

водопоглощения характеризуют плиты как гидрофобный материал. Поэтому водопоглощение в пределах соотношения «песок/отходы» в композициях 50/50 и 40/60, соответствующее значениям водопоглощения 1,7 и 1,4%, принимается в качестве минимально достаточной эксплуатационной характеристики. Полученные результаты исследований композиций полимерпесчаных плит 50/50 и 40/60 на истираемость соответствуют значениям 0,10 и 0,09 г/см².

Таким образом, испытание экспериментальных образцов плит по основным физико-механическим свойствам подтвердило высокое качество полимерпесчаных плит, изготовленных на основе макулатурных отходов в ОАО «Карааваево» на созданной опытно-промышленной установке.

Результаты исследования позволили установить диапазон показателей потребительских характеристик полимерпесчаных плит, отвечающий условию минимальной достаточности для эффективного использования ресурсов макулатурных отходов и длительной эксплуатационной пригодности (табл. 4).

Таблица 4

Диапазон показателей потребительских характеристик полимерпесчаных плит

The range of indicators of consumer characteristics of polymer sanded plates

Композиция «песок/отходы», %	F, МПа	Q, кДж/м ²	G, %	E, г/см ²
50/50...40/60	7,5...7,8	3,3...3,5	1,7...1,4	0,10...0,09

На основании ранее проведенных исследований установлено, что макулатурные отходы содержат 71% полимерных соединений (полимерные пленки, скотч, изолента, целлюлозные волокна и т. д.). С целью установления значимости влияния полимеров на физико-механические свойства полимерпесчаных плит были изготовлены и исследованы образцы плит с добавлением в композицию чистого полимера – фракционированного полипропилена (размер частиц 10 мм). Результаты исследований представлены на рис. 4.

С увеличением в композиции полимерпесчаных плит содержания полипропилена предел прочности при статическом изгибе и ударная вязкость при 10% его содержании составляют 11,1 МПа и 5,4 кДж/м² соответственно. При этом показатели водопоглощения уменьшаются и составляют, соответственно, 0,7% и 0,08 г/см².

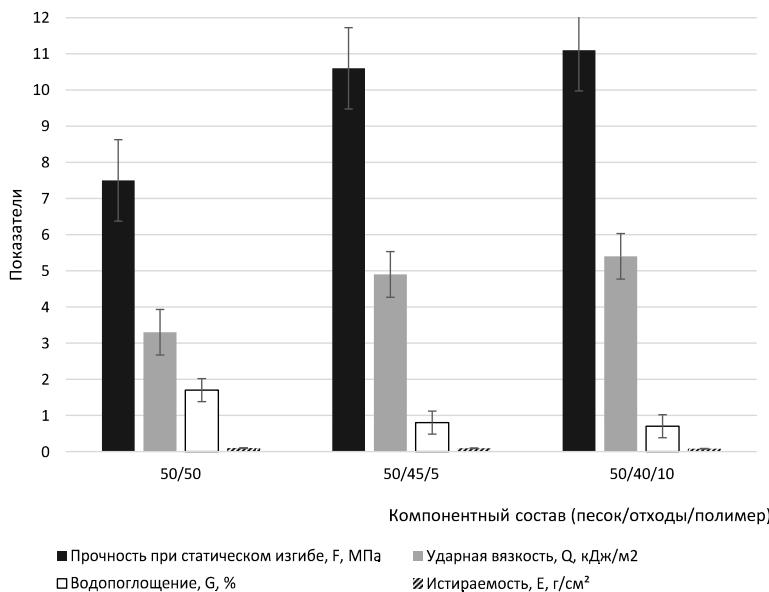


Рис. 4. Зависимость потребительских свойств полимерпечатных плит от добавок полимера

Fig. 4. Dependence of consumer properties of polymer printing plates on additives of a polymer

Во всех композициях полимерпесчаных плит наблюдается существенное изменение свойств по мере снижения доли песка.

Заключение.

1. Установлено, что использование в композиции полимерпесчаных плит отходов макулатуры, представляющих собой в основном смесь вторичных волокон древесной целлюлозы и синтетических полимеров, дает возможность получить широкий спектр материалов для городских и дачных ландшафтов с заданными физико-механическими свойствами;
2. Доказано существенное влияние макулатурных отходов как связующего в композиции полимерпесчаных плит на их потребительские свойства;
3. Определено, что с увеличением содержания отходов макулатуры в композиции полимерпесчаных плит предел прочности при статическом изгибе и ударная вязкость возрастают, при этом водопоглощение и истираемость плит уменьшаются;

4. Установлено минимальное содержание отходов макулатуры в композиции полимерпесчаных плит с заданными физико-механическими свойствами, которое составляет 50%;

5. Определено, что добавка полипропилена в количестве 10% способствует улучшению качественных характеристик полимерпесчаных плит.

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

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Ванчаков М.В., Дубовый В.К., Кулешов А.В., Коновалова Г.Н. Технология и оборудование для переработки макулатуры: учеб. пособ. Ч. 2. 2-е изд., исп. и доп. СПб.: СПбГТУРП, 2011. 84 с.

Дулькин Д.А. Развитие научных основ и совершенствование процессов технологии бумаги и картона из макулатуры: дис.... д-ра техн. наук. Архангельск, 2008. 352 с.

Дулькин Д.А., Спиридовон В.А. Системный анализ – основа оптимизации процесса приготовления макулатурной массы // Развитие ресурсосберегающих технологий производства бумаги и картона из вторичного волокнистого сырья: науч. тр. 4-й межд. науч.-тех. конф. Караваево, 2003. С. 49–54.

Дулькин Д.А., Спиридовон В.А., Миронова В.Г., Верещак В.В. Анализ эффективности технологических схем производства макулатурной массы // Развитие ресурсосберегающих технологий производства бумаги и картона из вторичного волокнистого сырья: сб. науч. тр. 4-й межд. науч.-тех. конф. Караваево, 2003. С. 54–59.

Дулькин Д.А., Миронова В.Г., Южанинова Л.А. Усиление научного обоснования – путь повышения эффективности использования вторичного волокна // Теория и технология бумажно-картонной продукции из вторичного волокнистого сырья: науч. тр. 5-й межд. науч.-тех. конф. Правда-Караваево, 2004. С. 23–27.

Дулькин Д.А., Панов А.Н., Ковернинский И.Н., Спиридовон В.А. Ресурсы и качество макулатуры для производства бумаги и картона // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2006. № 5. С. 28–37.

Ковалева О.П. Переработка вторичного волокнистого сырья – макулатуры: проблемы настоящего и будущего // Технология переработки макулатуры: науч. тр. 6-й межд. науч.-тех. конф. Караваево–Правда, 2005. С. 22–24.

Ковалева О.П. Особенности подготовки макулатурной массы для приготовления флотинга и тест-лайнера // Новое в технологии и оборудовании для производства гофрокартона и гофротары: сб. тр. межд. науч.-тех. конф. СПб., 2007. С. 62–64.

Комаров В.И., Яблочкин Н.И., Дулькин Д.А., Ковернинский И.Н. Формирование свойств тест-лайнера в процессе производства. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2005. 162 с.

Савицкий А.С., Шевляков А.А. Основные направления переработки твердых производственных и бытовых отходов // Технология и оборудование для переработки древесины: сб. научн. тр. 2000. Вып. 312. С. 125 – 129.

Смолин А.С., Дубовый В.К. Современное состояние и проблемы использования вторичного волокна в производстве бумаги и картона // Современные научные основы и инновационные технологии бумажно-картонных материалов с использованием вторичного волокна из макулатуры: науч. тр. 7-й межд. науч.-тех. конф. Караваево, 2006. С. 6–7.

Смолин А.С., Комаров В.И., Дубовый В.К., Белоглазов В.И. Технология гофрокартона: учеб. пособ. Ч. I. СПб., 2014. 146 с.

Яблочкин Н.И., Комаров В.И., Ковернинский И.Н. Макулатура в технологии картона. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2004. 252 с.

Forest Products Annual Market Review. UNECE, 2021–2022. 70 p.

Hansen E., Panwar R., Vlosky R. The Global Forest Sector: Changes, Practices and Prospects. NYC: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017. 462 p.

Khan A.A., Ghaffoor K. Innovative Techniques for the Production of Polymer Sand Slabs // Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 50. P. 986–992.

Nguyen T.V., Kim H.J. Recent Advances in Polymer Sand Technology for Sustainable Construction // Construction Materials. 2023. Vol. 16, iss. 1. P. 34–45. DOI: 10.3389/fmats.2023.1277567.

Menges W. Wastepaper fiber fractionation is the key at PWAs Redenfelden mill // Pulp and Paper. 1984. Vol. 58. P. 118–122.

Recycled Fiber and Deinking (Papermaking Science and Technology. Book 7). Jyvaskyla, 2000. 649 p.

References

Dulkin D.A. Development of scientific foundations and improvement of the processes of paper and cardboard technology from waste paper: diss. ...Doctor of Technical sciences. Arkhangelsk, 2008. 352 p. (In Russ.)

Dulkin D.A., Spiridonov V.A. System analysis – the basis for optimizing the process of preparing waste paper. *Development of resource-saving technologies for the production of paper and cardboard from secondary fibrous raw materials*: mater. of 4th int. sci.-tech. conf. Karavaevо, 2003, pp. 49–54. (In Russ.)

Dulkin D.A., Spiridonov V.A., Mironova V.G., Vereshchak V.V. Analysis of the efficiency of technological schemes for the production of waste paper. *Development of resource-saving technologies for the production of paper and cardboard from secondary fibrous raw materials*: mater. of 4th int. sci.-tech. conf. Karavaevо, 2003, pp. 54–59. (In Russ.)

Dulkin D.A., Mironova V.G., Yuzhaninova L.A. Strengthening of scientific justification – a way to increase the efficiency of the use of secondary fiber. *Theory and technology of paper and cardboard products from secondary fibrous raw materials*: mater. of 5th int. sci-tech. conf. Pravda-Karavaevо, 2004, pp. 23–27. (In Russ.)

Dulkin D.A., Panov A.N., Koverninsky I.N., Spiridonov V.A. Resources and quality of waste paper for the production of paper and cardboard. Cellulose. Paper. Cardboard, 2006, no. 5, pp. 28–37. (In Russ.)

Forest Products Annual Market Review. UNECE, 2021-2022. 70 p.

Hansen E., Panwar R., Vlosky R. The Global Forest Sector: Changes, Practices and Prospects. New York City: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017. 462 p.

Khan A.A., Ghafoor K. Innovative Techniques for the Production of Polymer Sand Slabs. Materials Today: Proceedings, 2022, vol. 50, pp. 986–992.

Komarov V.I., Yablochkin N.I., Dulkin D.A., Koverninsky I. N. Formation of test liner properties in the production process. Arkhangelsk: Publishing house of ASTU, 2005. 162 p. (In Russ.)

Kovaleva O.P. Recycling of secondary fibrous raw materials – waste paper: problems of the present and the future. Waste paper recycling technology: mater. of 6th int. sci.-tech. conf. Karavaevo–Pravda, 2005, pp. 22–24. (In Russ.)

Kovaleva O.P. Features of the preparation of waste paper mass for the preparation of fluting and test liner. New in technology and equipment for the production of corrugated cardboard and corrugated packaging: coll. of works of int. sci.-tech. conf. St. Petersburg, 2007, pp. 62–64. (In Russ.)

Menges W. Wastepaper fiber fractionation is the key at PWAs Redenfelden mill. Pulp and Paper, 1984, no. 58, pp. 118–122.

Nguyen T.V., Kim H.J. Recent Advances in Polymer Sand Technology for Sustainable Construction. Construction Materials, 2023, vol. 16, iss. 1, pp. 34–45. DOI: 10.3389/fmats.2023.1277567.

Recycled Fiber and Deinking (Papermaking Science and Technology. Book 7). Jyvaskyla, 2000. 649 p.

Savitsky A.S., Shevlyakov A.A. The main directions of processing solid industrial and household waste. Technology and equipment for wood processing: collection of scientific papers, 2000, iss. 312, pp.125–129. (In Russ.)

Smolin A.S., Dubovy V.K. The current state and problems of the use of secondary fiber in the production of paper and cardboard. Modern scientific foundations and innovative technologies of paper and cardboard materials using secondary fiber from waste paper: mater. of 7th int. sci-tech. conf. Karavaevo, 2006, pp. 6–7. (In Russ.)

Smolin A.S., Komarov V.I., Dubovy V.K., Beloglazov V.I. Technology of corrugated cardboard: a textbook. Part I. St. Petersburg: SPbGTURP, 2014. 146 p. (In Russ.)

Vanchakov M.V., Dubovy V.K., Kuleshov A.V., Konovalova G.N. Technology and equipment for recycling waste paper: textbook. Part II. 2nd ed., rev. and add. St. Petersburg: SPbGTURP, 2011. 84 p. (In Russ.)

Yablochkin N.I., Komarov V.I., Koverninsky I.N. Waste paper in cardboard technology. Arkhangelsk: Publishing house of AGTU, 2004. 252 p. (In Russ.)

Зайцев А.В., Дубовый В.К., Ковернинский И.Н., Симонова Е.И.
Исследование качества полимерпесчаных плит с использованием отходов макулатуры МС-5Б и МС-6Б как эффективного связующего // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 428–442.
DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.428-442

Переработка макулатуры марки МС-5Б в тест-лайнер и флютинг на ОАО «Караваево» сопровождается накоплением отходов. Неизбежность образования отходов и необходимость утилизации на полигоне приводят к значительным финансовым издержкам, поэтому переработка отходов является актуальной проблемой переработки макулатуры. Смесь отходов макулатуры была фракционирована на пластики, волокно, дерево, минералы, металлы, резину, ткань. Установлено, что общее содержание пластика и волокна составляет в отходах более 71% и может быть использовано в полном объеме в качестве связующего в термопрессовочной технологии. Для определения качественных характеристик полимерпесчаных плит были определены количественные параметры потребительских свойств при заданных геометрических размерах образцов полимерпесчаных плит. В исследовании показано влияние содержания отходов макулатуры в композиции в качестве связующего полимерпесчаных плит на их свойства. Показано влияние добавок фракционированного полипропилена в композицию полимерпесчаных плит, содержащих в своем составе отходы макулатуры в качестве связующего.

Ключевые слова: макулатура, отходы макулатуры, полимерпесчаные плиты, связующее, минеральный наполнитель, соотношение компонентов, прочность при статическом изгибе, ударная вязкость, водопоглощение, истираемость.

Zaitsev A.V., Dubovy V.K., Koverninsky I.N., Simonova E.I. Quality study of polymer-sanded slabs using MS-5B and MS-6B waste paper as an effective binder. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 428–442 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.428-442

The recycling of MS-5B waste paper into a test liner and fluting at JSC Karavaev is accompanied by the accumulation of waste. The inevitability of waste generation and the need for disposal at the landfill requires significant financial costs, therefore waste recycling is an urgent problem of waste paper recycling. The waste paper mixture was fractionated into plastics, fiber, wood, minerals, metals, rubber, and fabric. It has been established that the total content of plastic and fiber in waste is more than 71% and can be fully used as a binder in thermal compression technology. To determine the qualitative characteristics of polymer-sanded plates, quantitative parameters of consumer properties were determined for the specified geometric

dimensions of polymer-sanded plates samples. The study shows the effect of the content of waste paper in the composition, as a binder, of polymer-sanded plates on their properties. The effect of additives of fractionated polypropylene in the composition of polymer-sanded plates containing waste paper as a binder is shown.

К e y w o r d s : waste paper, waste paper, polymer-sanded plates, binder, mineral filler, component ratio, strength under static bending, impact strength, water absorption, abrasion resistance.

ЗАЙЦЕВ Артем Валерьевич – аспирант Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, ResearcherID: MXK-9856-2025. ORCID:0009-0000-7980-0382.

198095, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: ani1997.10@mail.ru

ZAITSEV Artem V. – PhD student at the Higher School of Technology and Energy of the St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. ResearcherID: MXK-9856-2025. ORCID: 0009-0000-7980-0382.

198095. Ivan Chernykh str. 4. St. Petersburg. Russia. E-mail: ani1997.10@mail.ru

ДУБОВЫЙ Владимир Климентьевич – профессор кафедры технологии бумаги и картона Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, доктор технических наук. ResearcherID: IDW 1235-2017. ORCID: 0000-0002-2903-3872.

198095, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: dubovy2004@mail.ru

DUBOVY Vladimir K. – DSc (Technical), Professor of the Department of Paper and Cardboard Technology at the Higher School of Technology and Energy of the St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. ResearcherID: IDW 1235-2017. ORCID: 0000-0002-2903-3872.

198095. Ivan Chernykh str. 4. St. Petersburg. Russia. E-mail: dubovy2004@mail.ru

КОВЕРНИНСКИЙ Иван Николаевич – доктор технических наук, профессор, Индивидуальный предприниматель. ResearcherID: MXL-0122-2025 ORCID: 0000-0002-7413-6790.

127591, ул. Дубнинская, д. 40А, к. 1., кв. 11, г. Москва. E-mail: kovern@list.ru

KOVERNINSKY Ivan N. – DSc (Technical), Professor, Individual Entrepreneur. ResearcherID: MXL-0122-2025. ORCID: 0000-0002-7413-6790.

127591. Dubninskaya str. 40A. Build. 1. Apt. 11. Moscow. E-mail: kovern@list.ru

СИМОНОВА Елена Игоревна – доцент кафедры технологии бумаги и картона Высшей школы технологии и энергетики Санкт- Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, кандидат технических наук. ResearcherID: AFK-9147-2022. ORCID:0000-0002-3657-030X.

198095, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: bliznyakova1989@mail.ru

SIMONOVA Elena I. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Paper and Cardboard Technology at the Higher School of Technology and Energy of the St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. ResearcherID: AFK-9147-2022. ORCID:0000-0002-3657-030X.

198095. Ivan Chernykh str. 4. St. Petersburg. Russia. E-mail: bliznyakova1989@mail.ru

Ф. Албаррам, К.И. Балыбердин, Я.В. Казаков

СВОЙСТВА СУЛЬФАТНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ВЫСОКОГО ВЫХОДА ИЗ ВЕТВЕЙ ОСИНЫ КАК ВОЛОКНИСТОГО ПОЛУФАБРИКАТА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КОМПОНЕНТОВ ГОФРОКАРТОНА

Введение. Бумага является одним из основных изобретений, которое изменило течение истории человека. Она играла жизненно важную роль в сохранении и передаче знаний на протяжении веков [Иванов, 2006]. С момента ее изобретения в древнем Китае и до наших дней бумага оставалась наиболее часто используемым средством для записи и документирования [Salman, 2006], что сделало ее основой образования, культуры и торговли [Latha et al., 2018]. В дополнение к своей исторической роли бумага сегодня является неотъемлемой частью нашей повседневной жизни; она используется во многих отраслях промышленности, а также для письма, печати, в качестве упаковки, в искусстве и даже является частью современных технологий, в том числе и цифровых [Rullifank et al., 2020]

Проблема сырьевого обеспечения целлюлозно-бумажной промышленности рассматривается сегодня как один из актуальных вопросов, который требует углубленного изучения [Кононов и др., 2022]. Основным источником растительных волокон является древесина, волокна которой обладают необходимым комплексом морфологических и химических свойств [Riki et al., 2019]. Но, кроме этого, необходим поиск и использование нетрадиционного сырья, например, лесосечных отходов в виде веток и вершинок. Одним из решений, увязанных с задачей ресурсосбережения, является использование целлюлозного волокна, полученного из лесосечных отходов в виде ветвей и вершинок, которые составляют по массе около 20...25% от всей древесины. Это позволяет сократить объем отходов лесозаготовок, снизить нагрузку на леса и сократить величину углеродного следа. Лесосечные отходы обладают подходящими для целлюлозно-бумажной промышленности свойствами, и их использование экономически выгодно [Хакимова и др., 2018, 2020].

Переработка отходов и использование вторичных материалов для создания новых продуктов стали важной частью стратегии устойчивого развития в современном мире. В последние десятилетия вопросы минимизации отрицательного воздействия на окружающую среду становятся всё более актуальными, особенно в отраслях, связанных с производством бу-

маги. Замена традиционного сырья в виде стволовой древесины лесосечными древесными отходами имеет и экономическое, и экологическое значение за счет предотвращения ущерба, наносимого окружающей среде древесными отходами, остающимися на лесосеке. На необходимость полного и комплексного использования всей биомассы дерева многократно указывают специалисты [Васильева, 2002; Полянин, Макаров, 2016]. Исследования в этой области уже имеют достаточно большую историю, однако во многих случаях они ограничены лабораторными опытами, без выхода на промышленный уровень, поэтому проблема рационального использования древесных отходов не теряет актуальности [Коробов, Рушнов, 1991; Сафин и др., 2015; Хакимова, Носкова, 2017].

До недавнего времени основным направлением использования отходов лесозаготовок являлось их применение в энергетических целях как топлива. До 2022 г. активно создавались производства древесных брикетов и пеллет, с базовой экспортной ориентацией [Пекарец и др., 2020]. Изменение политической ситуации в мире привело к закрытию европейских рынков и резкому сокращению производства древесного топлива. В этих условиях химическая переработка отходов лесозаготовок и лесопиления получает новый импульс.

Наиболее распространенным способом варки является сульфатный, поскольку он не только соответствует современным экологическим и экономическим требованиям, но и не предъявляет повышенных требований к качеству и породному составу сырья, и, таким образом, является оптимальным для варки низкокачественного растительного сырья [Миловидова и др., 2019]. В современной ЦБП древесина осины активно используется при получении лиственных полуфабрикатов нормального выхода, используемых для отбелки [Wong, 1987], и высокого выхода – целлюлозы высокого выхода (ЦВВ), полуцеллюлозы и химико-термомеханической массы (ХТММ), используемых, как правило, в небеленом виде для производства картона [Xu, Sabourin, 2002]. В этом контексте осина (*Populus tremula* L.) считается одним из перспективных источников волокна для получения бумаги и картона. Осина является одной из основных лесообразующих древесных пород в России, образует высокополнотные чистые и смешанные древостои. Эта порода характеризуется быстрым ростом и способностью адаптироваться к различным условиям окружающей среды, что делает ее возобновляемым и экологически чистым ресурсом [Кузнецова, 2003].

Сведения о результатах сульфатной варки тонкомерной древесины сосны, березы, лиственницы и о свойствах волокнистых полуфабрикатов из них [Хакимова и др., 2020; Hunt et al., 2002] однозначно свидетельствуют

ют, что из-за особенностей морфологического строения, химического состава и физических свойств древесины из ветвей и вершин технологии их варки отличается от технологии варки балансовой древесины, а качество получаемой целлюлозы уступает целлюлозе из стволовой части древесины.

Целью данной работы является исследование свойств сульфатной целлюлозы высокого выхода из ветвей осины с точки зрения ее пригодности в качестве волокнистого полуфабриката для производства компонентов гофрокартона.

Материалы и методика исследования. В эксперименте в качестве сырья использованы ветви (средний диаметр 20 мм) и ствол (средний диаметр 170 мм) осины (*Populus tremula*) от одного дерева, место произрастания – Приморский район Архангельской области. После ручной окорки образцы были распилены на шайбы высотой 2,5 см, из которых вручную получена щепа со средними размерами $15 \pm 3 \times 25 \pm 2 \times 5 \pm 1$ мм. Небеленную сульфатную целлюлозу из воздушно-сухой щепы получали на автоклавной системе CAS 420 в лаборатории волокнистых полуфабрикатов Инновационно-технологического центра «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» САФУ [Балыбердин и др., 2024]. Одновременно в соседних автоклавах проводили варки щепы из ветвей и, для сравнения, из стволовой части. Варки проводили по следующему режиму: гидромодуль – 4; расход активной щелочи на варку, в ед. Na_2O , к а.с. древесине – 14,5%; максимальная температура варки – 170 °С; подъем до кочечной температуры – 80 мин; стоянка при температуре 170 °С – 55 мин.

Деформационные и прочностные свойства образцов изучали на лабораторных отливках массой 75 г/м^2 , изготовленных на листоотливном аппарате Estanit BBS-2, после размоля на мельнице Йокро при концентрации 6% до степени помола 30 °ШР.

Перед проведением испытаний образцы кондиционировали по ГОСТ 13523–78. Физико-механические и прочностные свойства волокнистых материалов (толщина, плотность, сопротивление продавливанию, сопротивление раздиранию, SCT) определяли по стандартным методикам. Определение средневзвешенной по длине длины волокна проводилось на автоматическом анализаторе волокна L&W Fiber Tester [Хоа и др., 2023]. Нулевая разрывная длина определена на приборе PulMac Z-1000 [Манахова, 2014], межволоконные силы связи – по методике С.Н. Иванова [Иванов, 1948].

Деформационные характеристики образцов целлюлозы при растяжении определяли на лабораторном испытательном комплексе, включающем разрывную машину ТС 101–0,5Б и ПК с получением и математической об-

работкой индикаторных диаграмм нагрузка–удлинение по методике [Комаров, Казаков, 2000]. Испытания на растяжение проводили на образцах шириной 15 мм, рабочая длина образцов – 100 мм, скорость растяжения – 50 мм/мин. За результат принимали среднее из не менее 5 определений.

Результаты и их обсуждение. Полученная из ветвей и ствола осины небеленая сульфатная целлюлоза с общим выходом 60,2 из ветвей и 61,8% из ствола имеет число каппа 52 и 54 ед. соответственно (содержание лигнина около 8%), и данные волокнистые полуфабрикаты можно отнести к целлюлозе высокого выхода (ЦВВ), используемой для производства картона.

Несмотря на имеющиеся различия в величине базисной плотности (608 у ветвей и 501 кг/м³ у ствола) и компонентном составе (у ветвей меньше содержание целлюлозы (45 против 53%) и чуть выше содержание лигнина (16,8 против 14,8%) [Балыбердин и др., 2024], результаты варок щепы из ветвей и ствола получились близкими. У целлюлозы из ветвей меньше выход сортированной целлюлозы на 2,6% (56,7 против 59,3%), не-пропора больше на 1% (3,5 против 2,5%), различия в величине числа каппа не превышают 2 ед. Для целлюлозы высокого выхода такие различия нельзя считать значимыми. Таким образом, при раздельной варке целлюлозы из сучьев и ствола результаты получились близкими.

Из полученных полуфабрикатов были изготовлены и испытаны лабораторные отливки массой 75 г/м². Результаты представлены в табл. 1.

Известно, что уровень физико-механических и деформационных свойств обеспечивается фундаментальными (по Кларку) свойствами волокнистых полуфабрикатов [Кларк, 1983; Комаров, Казаков, 1993; Казаков, Манахова, 2013]. К ним относят среднюю длину волокон, грубость волокон, собственную прочность волокон, способность к уплотнению во влажном состоянии, когезионную способность.

Приведенные в табл. 1 данные о фундаментальных свойствах волокна небеленой сульфатной целлюлозы показывают, что у волокон целлюлозы, полученной из ветвей, по сравнению с целлюлозой из ствола ниже на 32% средняя длина волокна (0,59 против 0,86 мм), на 24,3% ниже грубость (14,3 против 18,9 мг/м) и на 22,3% ниже собственная прочность волокна (нулевая разрывная длина 11,3 против 14,5 км). При этом целлюлоза из ветвей обладает несколько большей на 2,3% (2,43 против 2,37 МПа) величиной сил связи, которые, в свою очередь, отвечают за упругие свойства бумаги и картона. Также обращает на себя внимание достаточно высокая плотность отливок (0,86 г/см³), практически равная плотности отливок целлюлозы из ствола (0,87 г/см³), которая играет важную роль в обеспечении уровня прочности и жесткости бумаги и картона.

Отмеченные особенности фундаментальных свойств целлюлозы из ветвей обеспечивают различия в деформационных свойствах, жесткости и прочности бумаги из них.

На рис. 1 представлен график зависимости «напряжение-деформация», полученный при испытании на растяжение с постоянной скоростью образцов сульфатной небеленой целлюлозы из ветвей и ствола осины при степени помола 30 °ШР.

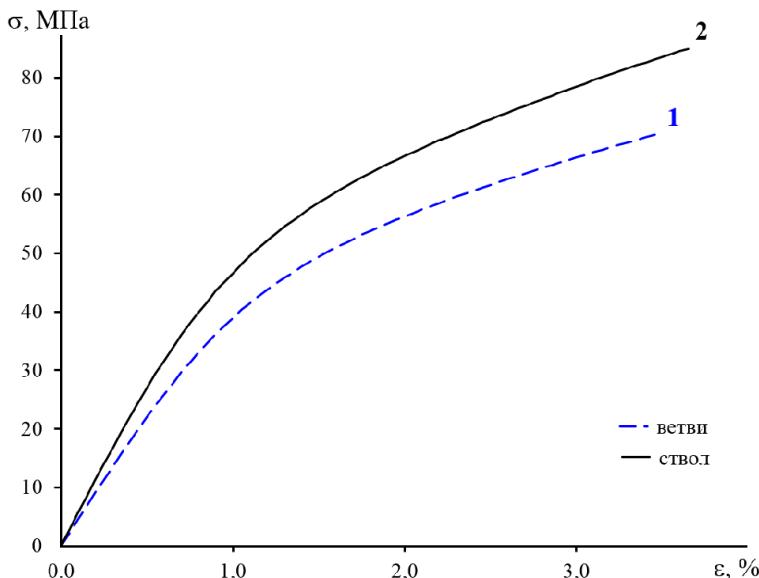


Рис. 1. Кривые зависимости «напряжение-деформация», полученные при испытании на растяжение образцов сульфатной небеленой целлюлозы из ветвей (1) и ствола (2) осины при степени помола 30 °ШР

Fig. 1. Tensile stress-strain relationship for samples of high-yield kraft pulp from aspen brunches (1) and trunk (2) at 30 °SR

Кривая нагружения целлюлозы из ветвей идет ниже, чем у целлюлозы из ствола, что свидетельствует о меньшей жесткости, прочности и растяжимости материала. При этом следует учесть, что при расчете напряжения σ учитывается толщина отливок, которая у целлюлозы из ветвей несколько больше. Отличия обусловлены разницей в размерах, грубости и собственной прочности волокон при компенсирующем воздействии состояния поверхности и структуры клеточной стенки, которые претерпевают измене-

ния в результате гидромеханического воздействия при размоле, что сопровождается развитием межволоконных сил связи и способности к уплотнению во влажном состоянии. Соответственно, отмеченные закономерности изменения хода кривых нагружения отражаются на величинах деформационных и прочностных характеристик (табл. 1).

Таблица 1

**Фундаментальные, деформационные и прочностные свойства
сульфатной ЦВВ из ветвей и ствола осины**

**Fundamental, deformation and strength properties
kraft high-yield pulp obtained from aspen branches and trunk**

Характеристика	Образец из ветвей	Образец из ствола	Ветви, % от ствола
Средняя длина волокна $l_{\text{срв.}}$, мм	0,586	0,862	68
Плотность отливок ρ , г/см ³	0,861	0,870	99
Межволоконные силы связи F_{CB} , МПа	2,43	2,37	102
Грубость волокон Γ , мг/м	14,3	18,9	76
Нулевая разрывная длина L_0 , км	11,3	14,5	78
Средняя толщина образца δ , мкм	88	82	108
Индекс продавливания J_{Π} , кПа·м ² /г	5,0	5,1	97
Разрывная длина L , м	8300	9800	85
Индекс раздирания J_R , мН·м ² /г	3,0	3,9	76
Жесткость при изгибе S_b , Н·м	19,2	22,7	85
Индекс SCT, кН·м/кг	36,1	37,2	97
Жесткость при растяжении S_t , кН/м	410	460	89
Предел упругости σ_1 , МПа	18,6	20,3	92
Предел упругой деформации ε_1 , %	0,42	0,37	113
Разрушающее усилие F_p , Н	95,1	104,5	91
Разрушающее напряжение σ_p , МПа	70,5	85	83
Деформация разрушения ε_p , %	3,48	3,65	95
Работа разрушения A_p , мДж	220	256	86
Мгновенный модуль упругости E_1 , МПа	4530	5660	80
Модуль упругости в области предразрушения E_2 , МПа	830	960	86

По результатам измерения основных физико-механических характеристик лабораторных образцов отчетливо видно, что образец целлюлозы из ветвей осины по сравнению с образцом из целлюлозы ствола имеет более низкие значения большинства исследуемых свойств.

Обладая на 32% меньшей длиной волокна и на 22% меньшей собственной прочностью волокна, целлюлоза из ветвей осины имеет сопротивление раздирианию ниже на 24%, на 20% – модуль упругости, на 15% – разрывную длину, на 15% – жесткость при изгибе, на 11% – жесткость при растяжении, на 5% – деформацию разрушения.

В то же время различия в величине сопротивления продавливанию и сопротивления сжатию не превышают 3%, что может быть связано с повышенной величиной межволоконных сил связи целлюлозы из ветвей при сопоставимой плотности, что компенсирует отрицательное влияние меньшей длины и прочности волокна.

Стоит отметить, что у образца целлюлозы из ветвей осины по сравнению с образцом из целлюлозы ствола значительно более высокий предел упругой деформации (0,42 против 0,37%). Это объясняется повышенными межволоконными связями.

В целом результаты исследования свидетельствуют о том, что целлюлоза из ветвей имеет перспективу для использования в композиции картона. Так как полученную целлюлозу предполагается использовать в композиции тарного картона, то минимальные различия в величине сопротивления продавливанию и сжатию позволяют говорить об определенном потенциале целлюлозы из ветвей для использования в композиции картона. В данном случае использование композиции 100% ЦВВ из ветвей не будет наилучшим решением. В то же время перспективным является использование данного волокнистого полуфабриката совместно с другими видами волокна, когда свойства волокон ЦВВ из ветвей – хорошая гибкость и когезионная способность – будут использованы наилучшим образом.

Заключение. Установлено, что сульфатная целлюлоза высокого выхода, полученная из древесных отходов в виде ветвей и вершин, образующихся на лесосеках, имеет высокий потенциал для использования в композиции картона, не требуя внесения существенных изменений в технологию, при этом давая экологический и экономический эффект.

Полученный при раздельной варке сульфатным способом по разработанному режиму волокнистый полуфабрикат из ветвей осины (*Populus tremula*) по сравнению с целлюлозой из ствола имеет схожие характеристи-

стки по выходу (60,2 и 61,8%) и числу каппа (52 и 54 ед.) и обладает более низкими значениями большинства исследуемых свойств.

Обладая на 32% меньшей длиной волокна и на 22% меньшей собственной прочностью волокна, целлюлоза из ветвей обладает большей на 2,3% величиной сил связы, которые отвечают за упругие свойства бумаги и картона.

Целлюлоза из ветвей осины имеет сопротивление раздиранию ниже на 24%, на 20% – модуль упругости, на 15% – разрывную длину, на 15% – жесткость при изгибе, на 11% – жесткость при растяжении, на 5% – деформацию разрушения. Однако различия в величине сопротивления превышают 3%. Отличия обусловлены разницей в размерах, грубости и собственной прочности волокон при компенсирующем воздействии состояния поверхности и структуры клеточной стенки, которые претерпевают изменения в результате гидромеханического воздействия при размоле, что сопровождается развитием межволоконных сил связи и способности к уплотнению во влажном состоянии.

Вклад авторов. Персональный вклад каждого автора – в равных долях.

Сведения о финансировании исследования. Работа выполнена на оборудовании ИТЦ «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» (Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова) при финансовой поддержке Минобрнауки России.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Балыбердин К.И., Казаков Я.В., Албаррам Ф. Получение и свойства сульфатной целлюлозы из лесосечных отходов осины // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном деревообрабатывающем производстве. 2024. №5 (17). С. 30–38. DOI: 10.33920/pro-05-2405-04.

Васильева Т.В. Обзор сложившихся тенденций использования древесных отходов за рубежом // Лесной вестник. 2002. № 4. С. 71–73.

Иванов С.Н. Силы сцепления волокон в бумаге // Бумажная промышленность. 1948. №3. С. 8–17.

Иванов С.Н. Технология бумаги. М.: Школа бумаги, 2006. 696 с.

Казаков Я.В., Манахова Т.Н. Бумагообразующий потенциал хвойной небеленой целлюлозы: современный взгляд через автоматический анализатор волокна // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2013. №5. С. 34–39.

Кларк Дж. Технология целлюлозы (Наука о целлюлозной массе и бумаге, подготовка массы, переработка её в бумагу, методы испытаний) / пер. с англ. А.В. Оболенской, Г.А. Пазухиной. М.: Лесная промышленность, 1983. 456 с.

Комаров В.И., Казаков Я.В. Связь фундаментальных свойств (по Кларку) неразмолотой сульфатной небеленой целлюлозы с характеристиками деформативности и прочности // ИВУЗ. Лесной журнал. 1993. № 2-3. С. 112–116.

Комаров В.И., Казаков Я.В. Анализ механического поведения целлюлозно-бумажных материалов при приложении растягивающей нагрузки // Лесной вестник МГУЛ. 2000. № 3 (12). С. 52–62.

Кононов Г.Н., Веревкин А.Н., Сердюкова Ю.В., Жукова В.А. Древесина как химическое сырье. История и современность. IV. Делигнификация древесины как путь получения целлюлозы. Часть II // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26, № 2. С. 69–84. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-2-69-84

Коробов В.В., Рушинов Н.П. Переработка низкокачественного сырья (проблемы безотходной технологии). М.: Экология, 1991. 288 с.

Кузнецова А.А. Осина в Карелии // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. 2003. Вып. 4. 53 с.

Хоха Х.М., Казаков Я.В., Окулова Е.О. Особенности изменения структурно-морфологических свойств целлюлозы из бамбука при размоле // ИВУЗ. Лесной журнал. 2023. № 2. С. 146–159. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-2-146-159.

Манахова Т.Н. Влияние структурно-морфологических свойств волокна на деформативность и прочность хвойной сульфатной небеленой целлюлозы: дис. канд. техн. наук. Архангельск, 2014. 170 с.

Миловидова Л.А., Комарова Г.В., Королева Т.А., Севастьянова Ю.В. Сульфатная варка целлюлозы: учеб. пособ. Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова, 2019. 175 с.

Пекарец А.А., Ерохина О.А., Новожилов В.В., Мандре Ю.Г., Аким Э.Л. Упруго-релаксационные свойства древесины лиственницы и их роль при получении древесных и древесно-угольных брикетов // ИВУЗ. Лесной журнал. 2020. № 1. С. 200–208. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-200-208.

Полянин И.А., Макаров В.Е. Изготовление технологической щепы из некондиционной и пневмой древесины с последующей ее переработкой // Современные научноемкие технологии. 2016. Вып. 10, ч. 2. С. 292–297.

Сафин Р.Г., Саттарова З.Г. Хабибуллин И.Г., Заатдинов Р.Р., Степанова Т.О. Современные направления переработки лесных ресурсов // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18, № 21. С. 90–93.

Хакимова Ф.Х., Носкова О.А. Отходы лесозаготовок – сырье для волокнистых полуфабрикатов производства картона // Вестник Пермского национального политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2017. № 2. С. 128–142. DOI: 10.15593/2224-9400/2017.3.11.

Хакимова Ф.Х., Хакимов Р.Р., Носкова О.А. Молодая древесина ели и бересклета – полноценное сырье для целлюлозно-бумажной промышленности // Химия растительного сырья. 2018. №3. С. 261–270. DOI:10.14258/jcrgm.2018033782.

Хакимова Ф.Х., Синяв К.А., Хакимов Р.Р., Носкова О.А. Молодая тонкомерная древесина от рубок ухода за лесом – резерв сырья для производства целлюлозы и бумаги // Лесной вестник / Forestry Bulletin. 2020. Т. 24, № 2. С. 88–97. DOI: 10.118698/2542-1468-2020-2-88-97.

Hunt K., Gee W., Hussein A., Reath S., Watson P. Kraft pulping opportunities from Canadian aspen // PACWEST Conference. Jasper (Alberta), 2002.

Latha A., Arivukarasi M.C., Keerthana C.M., Subashri R., Vishnu Priya V. Paper and Pulp Industry Manufacturing and Treatment Processes—A Review// Paper and Pulp Industry Manufacturing and Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). 2018. Vol. 6, iss. 2. DOI: 10.17577/IJERTCON011.

Riki J.T.B., Standa O.A., Oluwadara A.O. Anatomical and chemical properties of wood and their practical implications in pulp and paper production // Journal of Research in forests, Wild life and the Environment. 2019. Vol.11, iss. 3. P. 358–368.

Rullifank K.F., Roefinal M.E., Kostanti M., Sartika L., Evelyn. Pulp and paper industry: An overview on pulping technologies, factors, and challenges // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 845. Art. no. 012005. DOI: 10.1088/1757-899X/845/1/012005.

Salman A.L. Paper (its origins, functions, and development of its industry throughout history) // Damascus University Journal for Engineering Sciences. 2006. Vol. 22, no. 2. P. 155–191. (In Arab.)

Wong A. Review of Pulping and Papermaking Properties of Aspen. Edmonton: Canada-Alberta Forest Resource Development Agreement Canadian Forestry Service, 1987. 82 p.

Xu E.C., Sabourin M.J. Process selection for chemimechanical pulping of aspen // Journal of Pulp and Paper Technical Association of Canada. 2002. No. 3 (103). P. 36–39.

References

Balyberdin K.I., Kazakov Ya.V., Albarram F. Production and Properties of Kraft Pulp from Aspen Logging Waste. *Safety and Labor Protection in Logging and Woodworking Industries*, 2024, no. 5 (17), pp. 30–38. DOI: 10.33920/pro-05-2405-04. (In Russ.)

Clark J. Pulp Technology (Science of Pulp and Paper, Pulp Preparation, Processing into Paper, Testing Methods) / transl. from English by A.V. Obolenskaya, G.A. Pazukhina. Moscow: Forest Industry, 1983. 456 p. (In Russ.)

Hunt K., Gee W., Hussein A., Reath S., Watson P. Kraft pulping opportunities from Canadian aspen. *PACWEST Conference*, Jasper (Alberta), 2002.

Ivanov S.N. Fiber Bonding Forces in Paper. *Paper Industry*, 1948, no. 3, pp. 8–17. (In Russ.)

Ivanov S.N. Paper Technology. Moscow: Paper School, 2006. 696 p. (In Russ.)

Kazakov Ya.V., Manakhova T.N. Papermaking Potential of Unbleached Softwood Pulp: A Modern View through an Automatic Fiber Analyzer. Cellulose. Paper. Cardboard, 2013, no. 5, pp. 34–39. (In Russ.)

Khakimova F.Kh., Noskova O.A. Logging Waste as Raw Material for Fiber Semi-Finished Products in Board Production. Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Chemical Technology and Biotechnology, 2017, no. 2, pp. 128–142. DOI: 10.15593/2224-9400/2017.3.11. (In Russ.)

Khakimova F.Kh., Khakimov R.R., Noskova O.A. Young Spruce and Birch Wood – A Full-Fledged Raw Material for the Pulp and Paper Industry. Chemistry of Plant Raw Materials, 2018, no. 3, pp. 261–270. DOI:10.14258/jcprm.2018033782. (In Russ.)

Khakimova F.Kh., Sinyaev K.A., Khakimov R.R., Noskova O.A. Young Undergrowth Wood from Forest Thinning – A Reserve Raw Material for Pulp and Paper Production. Forestry Bulletin, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 88–97. DOI: 10.118698/2542-1468-2020-2-88-97. (In Russ.)

Khoa H.M., Kazakov Ya.V., Okulova E.O. Features of Changes in the Structural and Morphological Properties of Bamboo Pulp During Refining. IVUZ. Forestry Journal, 2023, no. 2, pp. 146–159. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-2-146-159. (In Russ.)

Komarov V.I., Kazakov Ya.V. Correlation of Fundamental Properties (according to Clark) of Unrefined Unbleached Sulfate Pulp with Deformation and Strength Characteristics. IVUZ. Forestry Journal, 1993, no. 2–3, pp. 112–116. (In Russ.)

Komarov V.I., Kazakov Ya.V. Analysis of Mechanical Behavior of Pulp and Paper Materials under Tensile Load. Forestry Bulletin MGUL, 2000, no. 3 (12), pp. 52–62. (In Russ.)

Kononov G.N., Verevkin A.N., Serdyukova Yu.V., Zhukova V.A. Wood as a Chemical Raw Material. History and Modernity. IV. Delignification of Wood as a Method of Pulp Production. Part II. Forestry Bulletin, 2022, vol. 26, no. 2, pp. 69–84. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-2-69-84. (In Russ.)

Korobov V.V., Rushnov N.P. Processing of Low-Quality Raw Materials (Problems of Waste-Free Technology). Moscow: Ecology, 1991. 288 p. (In Russ.)

Kuznetsova A.A. Aspen in Karelia. Proceedings of the Forest Engineering Faculty of PetrSU, 2003, iss. 4, 53 p. (In Russ.)

Latha A., Arivukarasi M.C., Keerthana C.M., Subashri R., Vishnu Priya V. Paper and Pulp Industry Manufacturing and Treatment Processes—A Review. Paper and Pulp Industry Manufacturing and Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 2018, vol. 6, iss. 2. DOI: 10.17577/IJERTCON011.

Manakhova T.N. Influence of Structural and Morphological Fiber Properties on the Deformability and Strength of Unbleached Kraft Softwood Pulp: Diss. ... Cand. Tech. Sci. Arkhangelsk, 2014. 170 p. (In Russ.)

Milovidova L.A., Komarova G.V., Koroleva T.A., Sevastyanova Yu.V. Kraft Pulp Cooking: textbook. Arkhangelsk: Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 2019. 175 p. (In Russ.)

Pekarets A.A., Erokhina O.A., Novozhilov V.V., Mandre Yu.G., Akim E.L. Elastic-Relaxation Properties of Larch Wood and Their Role in the Production of Wood and Charcoal Briquettes. *IVUZ. Forestry Journal*, 2020, no. 1, pp. 200–208. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-200-208. (In Russ.)

Polyanin I.A., Makarov V.E. Production of Technological Chips from Non-Standard and Stump Wood with Subsequent Processing. *Modern High Technologies*, 2016, iss. 10, part 2, pp. 292–297. (In Russ.)

Riki J.T.B., Standa O.A., Oluwadara A.O. Anatomical and chemical properties of wood and their practical implications in pulp and paper production. *Journal of Research in forests, Wild life and the Environment*, 2019, vol.11, iss. 3, pp. 358–368.

Rullifank K.F., Roefinal M.E., Kostanti M., Sartika L., Evelyn. Pulp and paper industry: An overview on pulping technologies, factors, and challenges. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 845, art. no. 012005. DOI: 10.1088/1757-899X/845/1/012005.

Safin R.G., Sattarova Z.G., Khabibullin I.G., Ziyatdinov R.R., Stepanova T.O. Modern Trends in Forest Resource Processing. *Bulletin of the Technological University*, 2015, vol. 18, no. 21, pp. 90–93. (In Russ.)

Salman A.L. Paper (its origins, functions, and development of its industry throughout history). *Damascus University Journal for Engineering Sciences*, 2006, vol. 22, no. 2, pp. 155–191. (In Arab.)

Vasilieva T.V. Overview of Current Trends in the Use of Wood Waste Abroad. *Forestry Bulletin*, 2002, no. 4, pp. 71–73. (In Russ.)

Wong A. Review of Pulping and Papermaking Properties of Aspen. Edmonton: Canada-Alberta Forest Resource Development Agreement Canadian Forestry Service, 1987. 82 p.

Xu E.C., Sabourin M.J. Process selection for chemimechanical pulping of aspen. *Journal of Pulp and Paper Technical Association of Canada*, 2002, no. 3 (103), pp. 36–39.

Материал поступил в редакцию 06.02.2025

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

Выполнено сравнение свойств сульфатной целлюлозы высокого выхода из ветвей осины (*Populus tremula* L.) с точки зрения ее пригодности в качестве волокнистого полуфабриката для производства компонентов гофрокартона. Полученный при раздельной варке сульфатным способом в лабораторных условиях по разработанному режиму волокнистый полуфабрикат из ветвей осины по сравнению с целлюлозой из ствола имеет схожие характеристики по выходу (60,2 и 61,8%) и числу кappa (52 и 54 ед.). У полученной ЦВВ определен комплекс фундаментальных, деформационных и прочностных свойств. Установлено, что, обладая на 32% меньшей длиной волокна (0,59 против 0,86 мм) и на 22% меньшей собственной прочностью волокна (нулевая разрывная длина 11,3 против 14,5 км), на 24,3% меньшей грубостью (14,3 против 18,9 мг/м), при этом она обладает большей на 2,3% (2,43 против 2,37 МПа) величиной сил связи, которые отвечают за упругие свойства бумаги. Целлюлоза из ветвей осины имеет разрывную длину ниже на 15%, сопротивление раздирианию – на 24%, модуль упругости – на 20%, жесткость при изгибе – на 15%, жесткость при растяжении – на 11%. Однако различия в величине сопротивления продавливанию и сопротивления сжатию не превышают 3%. Отличия обусловлены разницей в размерах, грубости и собственной прочности волокон при компенсирующем воздействии состояния поверхности и структуры клеточной стенки, которые претерпевают изменения в результате гидромеханического воздействия при размоле, что сопровождается развитием межволоконных сил связи и способности к уплотнению во влажном состоянии. Сделан вывод, что сульфатная целлюлоза высокого выхода, полученная из древесных отходов в виде ветвей осины, имеет высокий потенциал для использования в композиции картона, не требуя внесения существенных изменений в технологии, при этом давая экологический и экономический эффект.

Ключевые слова: лесосечные отходы, осина, ветви, сульфатная целлюлоза, прочность, жесткость, деформативность.

Albarram Fatima, 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 Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 443–457 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.443-457

The properties of high-yield kraft pulp from aspen (*Populus tremula* L.) branches were compared in terms of its suitability as a raw material for the production of corrugated cardboard components. The high-yield pulp obtained from aspen branches by separate cooking using the kraft method in laboratory conditions according to the developed regime, compared to pulp from the trunk, has similar characteristics in terms of yield (60.2 and 61.8%) and kappa number (52 and 54 units). The obtained high-yield kraft pulp was characterized by a set of fundamental, deformation and strength

properties. It was established that, having a 32% shorter fiber length (0.59 versus 0.86 mm) and 22% lower intrinsic fiber strength (zero breaking length 11.3 versus 14.5 km), 24.3% lower coarseness (14.3 versus 18.9 mg/m), it has a 2.3% higher (2.43 versus 2.37 MPa) magnitude of interfiber bonding forces, which are responsible for the elastic properties of paper. Pulp from aspen branches has a 15% lower breaking length, 24% lower tear resistance, 20% lower modulus of elasticity, 15% lower bending stiffness, and 11% lower tensile stiffness. However, the differences in the values of burst strength and compression strength do not exceed 3%. The differences are due to the difference in size (length and width), coarseness and own strength of the fibers, with the compensating effect of the surface condition and structure of the cell wall, which undergo changes as a result of hydromechanical action during refining, which is accompanied by the development of interfiber bonding forces and the ability to compact in a wet state. It is concluded that high-yield kraft pulp from wood waste in the form of aspen branches has high potential for use in cardboard composition, without requiring significant changes in technology, while having an environmental and economic effect.

Keywords: logging waste, aspen, branches, kraft pulp, strength, stiffness, deformation properties.

АЛБАРРАМ Фатыма – аспирант Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. ORCID: 0009-0003-6419-5580.

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: alibarram20181992@gmail.com

ALBARRAM Fatima – PhD student, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. ORCID: 0009-0003-6419-5580.

163002. Severnaya Dvina emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: alibarram20181992@gmail.com

БАЛЫБЕРДИН Константин Ильич – магистрант кафедры целлюлозно-бумажных и лесохимических производств Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. SPIN-код: 7163-5256. AuthorID: 1252682. ORCID: 0009-0000-8643-0543.

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: konstantinbalyberdin54@gmail.com

BALYBERDIN Konstantine I. – master student of the Department of Pulp and Paper and Wood Chemical Production, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. SPIN-code: 7163-5256. AuthorID: 1252682. ORCID: 0009-0000-8643-0543.

163002. Severnaya Dvina emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: konstantinbalyberdin54@gmail.com

КАЗАКОВ Яков Владимирович – профессор кафедры целлюлозно-бумажных и лесохимических производств Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова, доктор технических наук, профессор. ORCID: 0000-0001-8505-5841. Researcher ID: J-4634-2012. Scopus AuthorID: 57188686765. SPIN-код: 6354-3702.

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: j.kazakov@narfu.ru

KAZAKOV Yakov V. – DSc (Technical), Professor of the Department of Pulp and Paper and Wood Chemical Production, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. ORCID: 0000-0001-8505-5841. Researcher ID: J-4634-2012. Scopus AuthorID: 57188686765. SPIN-code: 6354-3702.

163002. Severnaya Dvina emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: j.kazakov@narfu.ru

Е.В. Школьников

**ВЛИЯНИЕ ПОЛИМОРФИЗМА
И ДИСПЕРСНОСТИ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ
НА РАСТВОРИМОСТЬ В КИСЛЫХ И ЩЕЛОЧНЫХ СРЕДАХ**

Введение. Ранее в работах [Школьников, 2008, 2014] дана термодинамическая характеристика растворимости амфотерных оксидов и гидроксидов алюминия, железа и других элементов в водных средах химической переработки древесины. Исследование влияния структуры и дисперсности порошков широко востребованных модификаций оксида ZrO_2 , как и применяемого в производстве бумаги оксида TiO_2 [Школьников, 2016], на их растворимость в водных средах представляет интерес для определения роли размерного эффекта в термодинамических свойствах наносостояния вещества и в инверсии фазовой стабильности, а также при разработке зольгель и других нанотехнологий [Pitcher et al., 2005]. Чистые и легированные модификации ZrO_2 применяются в производстве лазерных и сенсорных материалов, ювелирных изделий, специальных стекол, огнеупоров и керамики, в катализе, химическом анализе и синтезе.

Чистый оксид ZrO_2 при атмосферном давлении существует в виде бесцветных (белых) аморфной и трех кристаллических модификаций, образующих стабильный минерал бадделеит (моноклинный α - ZrO_2), высокотемпературные β – тетрагональную и γ – кубическую модификации ZrO_2 . Моноклинный оксид α - ZrO_2 стабилен при размерах кристаллов больше 50 нм, тетрагональный β - ZrO_2 – при размерах 5–50 нм, аморфный ZrO_2 – при размерах частиц менее 5 нм, а кубический γ - ZrO_2 – в интервале 17–5 нм [Pitcher et al., 2005].

Влияние структуры и дисперсности негидратированных оксидов ZrO_2 на их растворимость в чисто водных средах в интервале pH 0–15 не исследовано, экспериментальные данные о растворимости кристаллов α - и γ - ZrO_2 в воде и водных средах малочисленны [Curti, Degueldre, 2002; Kobayashi et al., 2007, 2016] или отсутствуют (для нанопорошков, аморфной и тетрагональной модификаций ZrO_2). Наблюдаемое в литературе сильное различие значений растворимости s и константы растворимости K_s у гидратов ZrO_2 вызвано рядом причин, среди которых важны различия методов и условий определения растворимости гидроксидов, склонных к образованию

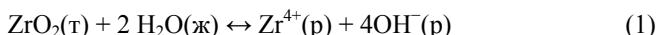
устойчивых коллоидных растворов. Как следствие, измеряемая кажущаяся (apparent) растворимость аморфного $\text{Zr}(\text{OH})_4$ с образованием коллоидных частиц из пересыщенных растворов (oversaturation method) при pH 2–7 на 3–5 порядков выше истинной растворимости в форме молекул и ионов. В случае кристаллических порошков ZrO_2 не наблюдалось существенного влияния температуры (5–60°C) длительного старения (до 30 недель), а также образования полиядерных и коллоидных частиц на измеряемую растворимость [Kobayashi et al., 2016]. Для сильнокислых и щелочных сред образование коллоидных растворов ZrO_2 не характерно [Kobayashi et al., 2007]. Существенное значение имеют также размер пор фильтра при определении растворимости, полиморфизм и различия степени дисперсности исследуемых образцов. Экспериментальное определение истинной растворимости оксидов ZrO_2 и их гидратов затруднено также из-за медленного установления гетерогенного химического равновесия и весьма низкой величины растворимости [Brown et al., 2005; Kobayashi et al., 2007].

Цель работы – термодинамический расчет влияния полиморфизма и дисперсности на молярную растворимость твердого диоксида циркония в воде и водных средах ($\text{pH}=0$ –14,7) при 25°C, а также сопоставление результатов расчета и эксперимента.

Материалы и методика исследования. Объектами экспериментального исследования были порошки рентгеноаморфного и тетрагонального β – ZrO_2 , полученные при термообработке чистого аморфного гидрата $\text{ZrO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, соответственно, при 200 и 400°C. Растворимость ZrO_2 определяли прямым фотометрическим методом с арсеназом III на спектрофотометре СФ-46 после длительного (до 30 суток) насыщения водного раствора (undersaturation method), центрифugирования и ультрафильтрации для отделения частиц твердой фазы размером больше 1–2 нм. Нижний предел определения $\text{Zr}(\text{IV})$ в 9М HCl при длине волны 665 нм составлял $\sim 10^{-7}$ моль/л. Измерения водородного показателя pH водных сред проводили с использованием магнитной мешалки ММ-5 и цифрового иономера И-120.1, настроенного для измерения pH по 4 буферным растворам.

Термодинамический расчет констант растворимости K_s° для модификаций ZrO_2 выполнен с использованием методики [Школьников, 2008, 2016] и базы термодинамических данных [Thoenen et al., 2014].

Результаты исследования и их обсуждение. В водных растворах, насыщенных относительно малорастворимых оксидов ZrO_2 , устанавливается гетерогенное химическое равновесие (1)



термодинамическая константа которого определяется выражением

$$K_s^0 = \text{ПР}^r = a(\text{Zr}^{4+}) a^4(\text{OH}^-) = \text{const}(T), \quad (2)$$

где $a(\text{Zr}^{4+})$, $a(\text{OH}^-)$ – активности ионов Zr^{4+} и OH^- .

В термодинамических расчетах стандартная энергия Гиббса $\Delta_f G^0$ образования катионов Zr^{4+} в водных растворах принята равной $-528,5 \pm 9,2$ кДж/моль [Brown et al., 2005; Thoenen et al., 2014], значения $\Delta_f G^0$ образования модификаций ZrO_2 при 298К определены по справочным данным или рассчитаны с использованием работ [Pitcher et al., 2005; Luo et al., 2009; Qiu et al., 2009]. Константа растворимости K_s^0 стабильной модификации $\alpha\text{-ZrO}_2$ на 4 и 5 порядков меньше K_s^0 сухих аморфных модификаций, соответственно, ZrO_2 (табл. 1) и $\text{Zr}(\text{OH})_4$ [Brown et al., 2005].

Катионы Zr^{4+} обладают сильным поляризующим действием и в водных растворах значительно гидролизованы с образованием моно- и полиядерных гидроксокомплексов, а также катионов ZrO^{2+} . Негидролизованные катионы Zr^{4+} существуют в сильнокислых разбавленных растворах, из которых выделяют средние соли $\text{Zr}(\text{SO}_4)_2$ и $\text{Zr}(\text{ClO}_4)_4$. Согласно термодинамическому расчету гомогенное равновесие (3)



в стандартных условиях заметно смещено вправо с образованием ионов цирконила ($\Delta G^0 = -19 \pm 8$ кДж). При $\text{pH} > 0$ и низких концентрациях $\text{Zr}(\text{IV})$ в водных растворах повышается вероятность образования ионов ZrO^{2+} в гидратированной форме $\text{Zr}(\text{OH})_2^{2+}$. Кроме того, в известных соединениях цирконила отсутствуют дискретные ионы ZrO^{2+} . С учетом изложенного, в расчетах растворимости ZrO_2 в водных средах ионы ZrO^{2+} учитывались в форме $\text{Zr}(\text{OH})_2^{2+}$.

Реакции гидратации твердых оксидов ZrO_2 с образованием твердых метагидроксида $\text{ZrO}(\text{OH})_2$ и гидроксида $\text{Zr}(\text{OH})_4$ в стандартных условиях заметно не происходят ($\Delta G^0 > 0$) и потому не учитывались в расчете растворимости оксидов. Молярную растворимость оксидов ZrO_2 в воде и водных средах при $\text{pH} > 2$ рассчитывали с учетом ионной силы раствора и образования только моноядерных гидроксокомплексов, так как вычисленная функция полиядерности $\Phi = d\ln[M^{4+}]/d\ln C_M$ [Школьников, 2014, 2016] равна единице для кристаллических модификаций при $\text{pH} > 1$, а для аморфной ZrO_2 – при $\text{pH} > 2$.

Молярную величину растворимости твердых оксидов ZrO_2 рассчитывали по формуле (4)

$$s = C_{\text{Zr}} = \frac{K_s^0}{f_{\text{Zr}^{4+}} f_{\text{OH}^-}^4} \sum_{i=0}^n \beta_i [\text{OH}]^{i-4}, \quad (4)$$

где константа K_s^0 характеризует гетерогенное химическое равновесие (1), $f(Zr^{4+})$, $f(OH^-)$ – молярные коэффициенты активности ионов Zr^{4+} и OH^- , рассчитанные по уравнению Дэвис; $lg\beta_0 = 0$, $lg\beta_1 = 14,16 \pm 0,15$, $lg\beta_2 = 27,68 \pm 0,44$, $lg\beta_3 = 39,3 \pm 0,9$, $lg\beta_4 = 53,6 \pm 0,7$, $lg\beta_5 = 54 \pm 1$, $lg\beta_6 = 55 \pm 1$ – логарифмы общих констант устойчивости гидроксокомплексов $ZrOH^{3+}$, $Zr(OH)_2^{2+}$, $Zr(OH)_3^+$, $Zr(OH)_4$, $Zr(OH)_5^-$ и $Zr(OH)_6^{2-}$, вычисленные с использованием критически выбранных данных [Ekberg et al., 2004; Brown et al., 2005; Walther et al., 2007; Thoenen et al., 2014] при ионной силе раствора $I = 0$. Принятые в расчетах стандартные энергии Гиббса образования вышеуказанных гидроксокомплексов равны, соответственно, $-766,9 \pm 9,3$; $-1001,1 \pm 9,5$; $-1225,1 \pm 11,0$; $-1461,1 \pm 3,8$; $-1623,2 \pm 10,7$ и $-1785,8 \pm 10,1$ кДж/моль. При выборе данных для расчета β_i предпочтение отдано корректно поставленным экспериментам по определению констант гидролиза $Zr(IV)$ и истинной растворимости чистых сухих образцов ZrO_2 и $Zr(OH)_4$ в условиях минимизации образования полимерных и коллоидных частиц.

Полиядерные гидроксокомплексы $Zr_2(OH)_4^{4+}$, $Zr_2(OH)_6^{2+}$, $Zr_2(OH)_7^+$, $Zr_3(OH)_4^{8+}$, $Zr_3(OH)_5^{7+}$, $Zr_4(OH)_8^{8+}$, $Zr_4(OH)_{10}^{6+}$, $Zr_4(OH)_{12}^{4+}$, $Zr_4(OH)_{16}$ и $Zr_5(OH)_{12}^{8+}$ [Ekberg et al., 2004; Brown et al., 2005; Kobayashi et al., 2007; Walther et al., 2007] учитывали в сильнокислой среде при условии неравенства $\Phi < 1$ [Школьников, 2014], где функция полиядерности Φ определяется выражением (5):

$$\Phi = \frac{1 + \sum_{i=1} \sum_{j=1} i \beta_{ij} [Zr]^{i-1} [OH]^j}{1 + \sum_{i=1} \sum_{j=1} i^2 \beta_{ij} [Zr]^{i-1} [OH]^j}, \quad (5)$$

где β_{ij} – общие константы устойчивости моноядерных ($i = 1$) и полиядерных ($i > 1$) гидроксокомплексов, $[Zr]$ – равновесная молярность свободных катионов Zr^{4+} , равная $K_s / [OH]^{4-}$; $[OH]$ – равновесная молярность свободных гидроксид-ионов, соответствующая заданной величине pH. Рассчитанный вклад Δs полиядерных гидроксокомплексов с использованием констант β_{ij} [Kobayashi et al., 2007; Walther et al., 2007] (6)

$$\Delta s = \sum_{i>1} \sum_{j=1} i \beta_{ij} [Zr]^{i-1} [OH]^j, \quad (6)$$

в молярную растворимость сухого аморфного порошка ZrO_2 ($K_s^0 = 1 \times 10^{-59}$) при pH 0 ($\Phi = 0,25$) и 1 ($\Phi = 0,98$) равен, соответственно, 91 ($\Delta \lg s = 1,09$) и 1,5 мол.% ($\Delta \lg s = 0,01$), зависит от показателя pH, равновесной молярности $[Zr^{4+}]$, общей молярности циркония(IV) C_{Zr} и близок к нулю для кристаллических модификаций ZrO_2 при $C_{Zr} \leq 10^{-5}$ моль/л в интервале pH 1–14. Согласно расчетам концентрация аквакатионов Zr^{4+} при pH 0 равна ~ 35 мол.% для а- ZrO_2 ($K_s^0 = 1,7 \times 10^{-63}$). Присутствие катионов Zr^{4+} при pH < 2 доказано в ра-

боте [Ekberg et al., 2004]. В сильнокислых средах (при добавлении HClO_4) преобладают комплексы: ZrOH^{3+} (pH 0), $\text{Zr}(\text{OH})_2^{2+}$ (pH 1) для $\alpha-\text{ZrO}_2$, а для сухого аморфного порошка ZrO_2 – комплексы $\text{Zr}_4(\text{OH})_8^{8+}$ (pH 0), $\text{Zr}_5(\text{OH})_{12}^{8+}$ (pH 1) и $\text{Zr}(\text{OH})_2^{2+}$ (pH 2). По данным электроспрей-ионизационной масс-спектрометрии ESI-MS [Walther et al., 2007] комплекс $\text{Zr}_4(\text{OH})_8^{8+}$ преобладает при pH=0–0,7 и общей молярности циркония(IV) $1,5 \times 10^{-3}$ – 10^{-2} моль/л. Методом лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии (LIBS) установлено отсутствие коллоидных частиц в водных растворах ZrO_2 при pH < 3 и $C_{\text{Zr}} < 10^{-3}$ моль/л, а также при pH < 9 и $C_{\text{Zr}} < 10^{-8}$ моль/л [Cho et al., 2005].

Величину pH⁰ насыщенных водных растворов модификаций ZrO_2 в чистой воде находили, решая аналогично [Школьников, 2008, 2016] систему семи уравнений с использованием приближенных методов для полученного в результате уравнения (7):

$$(1 + K_s^0 \beta_5) y^5 - (K_s^0 \beta_3 + K_w) y^3 - 2 K_s^0 \beta_2 y^2 - 3 K_s^0 \beta_1 y - 4 K_s^0 = 0, \quad (7)$$

где K_w – константа автопротолиза воды при 25°C, $y = [\text{OH}^-]$.

Результаты расчета представлены в табл. 1, где $\text{p}K_s^0 = -\lg K_s^0$, s^0 – молярная величина растворимости ZrO_2 в чистой воде при 25°C.

Рассчитанные по термодинамическим данным значения растворимости s (табл. 1) удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными для аморфной и кристаллических модификаций ZrO_2 . Полученные методом масс-спектрометрии с индуктивно связанный плазмой (ICP-MS) значения $s = 10^{-9}$ – 10^{-8} моль/л рассматривались как верхний предел растворимости $\alpha-\text{ZrO}_2$ в форме моноядерных гидроксокомплексов $\text{Zr}(\text{IV})$ при pH 2,8–6,3 и 12,5–13,5 [Kobayashi et al., 2007]. Растворимость сухого аморфного порошка примерно на 4 порядка больше, чем стабильной кристаллической модификации $\alpha-\text{ZrO}_2$ (табл. 1, рис. 1, кривые 1 и 5).

В соответствии с результатами расчета и эксперимента водные насыщенные растворы рассматриваемых оксидов ZrO_2 являются практически нейтральными (pH⁰=7,00), поскольку растворимость ZrO_2 в чистой воде определяется содержанием растворенных нейтральных комплексов $\text{Zr}(\text{OH})_4$ (99,8–99,98 мол. %).

Расчет функции Бееррума, или среднего лигандного числа n , в гидроксокомплексах при pH 15 дает значение ~ 5 для катионов Zr^{4+} , что указывает на выполнимость для них условия амфотерности $n > 4$ [Школьников, 2016]. Минимальная растворимость модификаций ZrO_2 ожидается при оптимальной концентрации OH^- -ионов, соответствующей максимуму молярной доли нейтральных комплексов $\text{Zr}(\text{OH})_4$ в водном растворе. Из этого условия вывели уравнение (8):

$$\beta_5[\text{OH}^-]^5 - \beta_3[\text{OH}^-]^3 - 2 \beta_2[\text{OH}^-]^2 - 3 \beta_1[\text{OH}^-] - 4 = 0, \quad (8)$$

которое решали аналогично уравнению (7) и нашли значения $[\text{OH}^-]_{\text{опт}}$, $\text{pH}_{\text{опт}} (6,6 \pm 0,1)$ и затем $s_{\text{мин}}$ по формуле (4). Практически полное осаждение ($s \leq 10^{-6}$ моль/л) ожидается при $\text{pH} 1-14$ для кристаллических модификаций ZrO_2 (рис. 1, кривые 1-3).

Из рис. 1 и приведенных в табл. 1 значений $\text{p} s_{\text{мин}} = -\lg s_{\text{мин}}$ при 25°C следует отсутствие заметного отрицательного влияния общих OH^- -ионов (при добавлении NaOH) на растворимость в щелочи рассматриваемых диоксидов. Анализ показывает, что условиями отсутствия этого эффекта являются высокие значения общей константы устойчивости β_4 нейтрального гидроксокомплекса и его молярной доли в насыщенном чисто водном растворе. Прочные комплексы $\text{Zr}(\text{OH})_4$ преобладают в широкой области pH , от 2 до 13.

Таблица 1

Термодинамические параметры растворения аморфной и макрокристаллических модификаций ZrO_2 в водных средах при 25°C

Thermodynamic parameters of dissolution of amorphous and macrocrystalline modifications of ZrO_2 in aqueous media at 25°C

Состав	$-\Delta_f G^0_{298}$, кДж/моль	$\text{p}K_s^0$	$\text{p} s_{\text{мин}}$	s' моль/л в средах		
				H_2O	1M HClO_4	1M NaOH
ZrO_2^*	$1020,4 \pm 1,8$	$59,01 \pm 0,31$	5,41	4×10^{-6} 5×10^{-6}	4×10^{-2} 6×10^{-2}	$1,3 \times 10^{-4}$ 2×10^{-4}
$\alpha-\text{ZrO}_2$	$1042,7 \pm 1,3$	$62,76 \pm 0,23$	9,15	7×10^{-10} 3×10^{-9} [Curti, Degueldre, 2002] $< 10^{-8}$ [Kobayashi et al., 2007]	6×10^{-7} 4×10^{-7} [Kobayashi et al., 2007]	$2,4 \times 10^{-8}$ $\sim 10^{-8}$ [Kobayashi et al., 2007]
$\beta-\text{ZrO}_2$	$1033,5 \pm 1,4$	$61,28 \pm 0,24$	7,68	$2,1 \times 10^{-8}$ $< 10^{-7}$	$1,8 \times 10^{-5}$ 2×10^{-5}	6×10^{-7} 5×10^{-7}
$\gamma-\text{ZrO}_2$	$1031,7 \pm 1,9$	$60,97 \pm 0,34$	7,37	4×10^{-8} 2×10^{-8} [Curti, Degueldre, 2002]	4×10^{-5}	$1,3 \times 10^{-6}$

Примечание: ZrO_2^* – аморфный сухой, значения s во вторых и следующих строках – экспериментальные данные настоящей работы и полученные методом ICP-MS [Curti, Degueldre, 2002; Kobayashi et al., 2007].

Как и ранее [Школьников, 2008], для сравнительной количественной оценки амфотерности гидроксидов и оксидов использовали величину отношения ($A > 1$) молярных величин растворимости их в щелочной среде с $\text{pH} 14,7$ (5 M раствор NaOH) и в чистой воде. Параметр амфотерности за-

висит от химической природы соединения и равен $1,5 \times 10^3$ [Школьников, 2016] и 5×10^2 , соответственно, для TiO_2 и ZrO_2 . В сильнощелочных средах растворимость ZrO_2 определяется комплексами $\text{Zr}(\text{OH})_5^{2-}$ и $\text{Zr}(\text{OH})_6^{2-}$ ($\text{pH}=13,5$), а при $\text{pH}=14-15$ – комплексом $\text{Zr}(\text{OH})_6^{2-}$. Этот результат расчета отличается от заключения в работе [Curti, Degueldre, 2002], но согласуется с результатом определения заряда (-2) частицы, преобладающей при $\text{pH}>14$ [Ekberg et al., 2004].

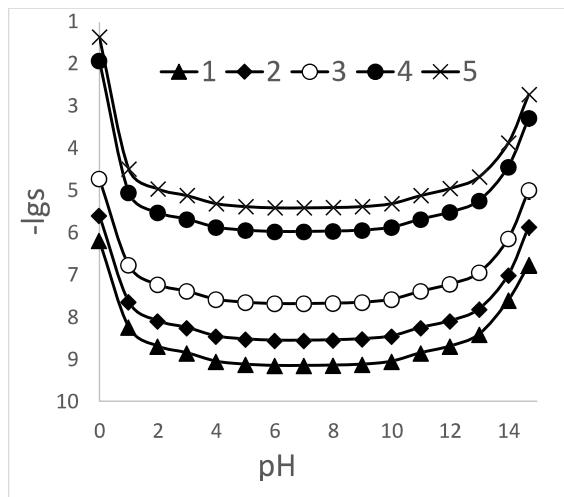


Рис. 1. Рассчитанная зависимость растворимости s (моль/л) твердых модификаций ZrO_2 от величины pH водной среды при 25°C

1 – моноклинная α – ZrO_2 ; 2 – нанопорошок α – ZrO_2 ($l = 18 \text{ нм}$);
 3 – тетрагональная β – ZrO_2 ; 4 – нанопорошок β – ZrO_2 ($l = 9 \text{ нм}$);
 5 – аморфный порошок ZrO_2 ($l \leq 2 \text{ нм}$)

Fig. 1. Calculated dependence of solubility s (mol/l) of solid ZrO_2 modifications on the pH value of aqueous medium at 25°C

1 – monoclinic α – ZrO_2 ; 2 – nanopowder α – ZrO_2 ($l = 18 \text{ nm}$); 3 – tetragonal β – ZrO_2 ; 4 – nanopowder β – ZrO_2 ($l = 9 \text{ nm}$); 5 – amorphous powder ZrO_2 ($l \leq 2 \text{ nm}$)

Как известно, в тонкодисперсных природных и синтетических образцах ZrO_2 присутствуют метастабильные модификации. С учетом экспериментальных данных [Pitcher et al., 2005; Luo et al., 2009] это связано с различием удельной поверхностной энергии полиморфных модификаций ZrO_2 : избыточная поверхностная энталпия (по сравнению с объемной стабильной модификацией) возрастает в ряду аморфный ZrO_2 $<$ γ – ZrO_2 $<$ β – ZrO_2 $<$ α – ZrO_2 . Согласно нашим расчетам при изменении структуры и

дисперсности кристаллов ZrO_2 существенно изменяются величины $\Delta_f G^0_{298}$, K_s^0 и, соответственно, растворимость s в водных средах (табл. 2).

При уменьшении размера частиц увеличивается вклад поверхностной энергии в энергию Гиббса образования модификаций ZrO_2 . В табл. 2 представлены результаты расчета $\Delta_f G^0_{298}$ нанопорошков ZrO_2 по данным микроКалориметрии растворения [Pitcher et al., 2005] с учетом того, что вклад энтропийного фактора $T\Delta S$ в стабильность твердых модификаций ZrO_2 не значителен [Luo et al., 2009], а величина $\Delta_f G^0_{298}$ становится менее отрицательной на величину произведения ΔH_{sf} удельной поверхностной энталпии h на площадь поверхности F , измеренную по адсорбции азота методом БЭТ. Значения h равны $6,4 \pm 0,2$, $2,1 \pm 0,05$ и $0,5 \pm 0,1$ Дж/м², соответственно, для кристаллов α - ZrO_2 , β - ZrO_2 и аморфного порошка ZrO_2 [Pitcher et al., 2005]. Как следует из табл. 2, при увеличении удельной поверхности F нанокристаллических порошков ZrO_2 рассчитанная растворимость их в водных средах монотонно возрастает, приближаясь к растворимости сухого аморфного порошка ZrO_2 (табл. 1).

Таблица 2

Результаты расчета влияния структуры и дисперсности нанопорошков ZrO_2 на их константы растворимости K_s^0 и молярную растворимость s по формуле (4) в водных средах при 25°C

The results of calculating the effect of the structure and dispersity of ZrO_2 nanopowders on their solubility constants K_s^0 and molar solubility s according to formula (4) in aqueous media at 25°C

Состав	Характеристики фазы				Растворимость s , моль/л в средах			
	l , нм	F , м ² /моль	$-\Delta_f G^0_{298}$, кДж/моль	pK_s^0	H_2O	1М HClO_4	1М NaOH	5М NaOH
						[Pitcher et al., 2005]		
α - ZrO_2	45,5	185	1041,0 \pm 1,5	62,58 \pm 0,27	$1,1 \times 10^{-9}$	$9,2 \times 10^{-7}$	$3,3 \times 10^{-9}$	$9,8 \times 10^{-9}$
	39,0	493	1040,1 \pm 1,6	62,44 \pm 0,34	3×10^{-9}	$1,3 \times 10^{-6}$	$4,7 \times 10^{-9}$	$1,4 \times 10^{-8}$
	18,0	678	1038,4 \pm 1,7	62,15 \pm 0,35	6×10^{-9}	$2,5 \times 10^{-6}$	$9,1 \times 10^{-9}$	$2,7 \times 10^{-8}$
	10,6	690	1036,4 \pm 1,9	61,80 \pm 0,36	$1,3 \times 10^{-8}$	$5,6 \times 10^{-6}$	$2,0 \times 10^{-8}$	$5,9 \times 10^{-8}$
β - ZrO_2	16,1	702	1032,4 \pm 1,8	61,10 \pm 0,34	$3,4 \times 10^{-8}$	$2,8 \times 10^{-5}$	$9,5 \times 10^{-8}$	$3,0 \times 10^{-7}$
	9,0	4682	1023,7 \pm 1,9	59,57 \pm 0,35	$4,6 \times 10^{-7}$	0,013	$3,2 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-5}$
	5,0	5976	1021,0 \pm 1,9	59,10 \pm 0,36	$3,8 \times 10^{-6}$	0,038	$1,1 \times 10^{-5}$	$3,6 \times 10^{-5}$
аморфный ZrO_2 (0,01 мас. % H_2O)	≤ 4	2×10^4	1016 ± 5	58,2 \pm 1,2	$1,1 \times 10^{-5}$	$>0,2$	8×10^{-5}	$2,4 \times 10^{-4}$

В табл. 3 представлено увеличение растворимости (s_r/s) в водных средах ($\text{pH}=5\div 9$, $t = 25^\circ\text{C}$) нанопорошков α - ZrO_2 и β - ZrO_2 относительно соответствующей макрокристаллической (bulk) модификации (табл. 1), рассчитанное с использованием формулы (4) и по приближенному уравнению Гиббса–Оствальда–Фрейндлиха (9)

$$\ln(s_r/s) = 2\sigma V_M / R T r, \quad (9)$$

где σ – поверхностное натяжение между ионной твердой фазой и жидкостью, равное $0,7\pm 0,1$ и $0,93\pm 0,12$ Дж/м², соответственно, для β - ZrO_2 [Nogami, 1986] и α - ZrO_2 [Xie et al., 2000] при больших переохлаждениях, V_M – мольный объем твердой фазы (19,9 и 21,1 см³/моль для β - ZrO_2 и α - ZrO_2 соответственно), s_r – растворимость сферических частиц с радиусом r высокодисперсной твердой фазы, s – растворимость твердой фазы в виде крупных частиц ($r > 100$ нм) с малой положительной кривизной поверхности, R – газовая постоянная, T – абсолютная температура. Расчеты по уравнению (9) показывают, что увеличение растворимости α - ZrO_2 в ~ 2 и 20 раз по сравнению с массивным бадделеитом (табл. 1) ожидается для частиц с эффективным радиусом, соответственно, 22,8 и 5,3 нм.

Таблица 3

**Рассчитанное увеличение растворимости (s_r/s) в водных средах
($\text{pH}=5\div 9$, $t = 25^\circ\text{C}$) нанопорошков α - ZrO_2 и β - ZrO_2
относительно макрокристаллической модификации ($r > 100$ нм)**

**Calculated increase of solubility (s_r/s) in aqueous media ($\text{pH} = 5\div 9$, $t=25^\circ\text{C}$)
of α - ZrO_2 and β - ZrO_2 nanopowders relative to macrocrystalline modification
($r > 100$ nm)**

r , нм	F , м ² /г [Pitcher et al., 2005]	ΔH_{sf}	$\Delta_{\text{sol}}G^0$	Расчет (s_r/s) по формуле	
		кДж/моль	(4)	(9)	
α - ZrO_2					
22,8	1,5	1,2 \pm 0,3	358,7 \pm 1,4	1,8	2,0
19,5	4,0	3,2 \pm 0,1	356,8 \pm 1,8	4,0	2,3
9,0	5,5	4,3 \pm 0,1	355,1 \pm 1,9	7,9	5,8
5,3	5,6	4,4 \pm 0,2	350,6 \pm 1,8	18	20
β - ZrO_2					
8,0	5,7	1,5 \pm 0,1	349,1 \pm 1,8	1,6	4,0
4,5	38,0	9,8 \pm 0,2	340,4 \pm 1,9	50	15
2,5	48,5	12,5 \pm 0,3	337,7 \pm 1,9	180	105

Как видно из табл. 3, результаты расчета растворимости нанопорошков α -ZrO₂ и β -ZrO₂ по формулам (4) и (9) удовлетворительно согласуются между собой.

Выводы.

1. Впервые дана термодинамическая характеристика истинной растворимости при 25°C аморфной и кристаллических наноразмерных модификаций ZrO₂ в зависимости от pH водной среды в интервале 0–14,7 с учетом образования моно- и полиядерных гидроксокомплексов Zr(IV) и дисперсности твердой фазы. Средний эффективный радиус частиц ($r \leq 25$ нм для α -ZrO₂) следует учитывать в качестве термодинамического параметра при определении растворимости диоксида циркония в наносостоянии;

2. Истинная растворимость полиморфных модификаций ZrO₂ в водных слабокислых и слабощелочных средах при отсутствии фторид- и карбонат-ионов весьма низкая ($7 \times 10^{-10} - 10^{-7}$ моль/л), уменьшается при прокаливании и определяется прочными нейтральными комплексами Zr(OH)₄, преобладающими при pH 2–13. Растворимость в водных средах заметно зависит от структуры кристаллов (α -ZrO₂ < β -ZrO₂ < γ -ZrO₂), существенно возрастает с уменьшением размера частиц кристаллических нанопорошков и сильно (примерно на 4 порядка) – при переходе от стабильного кристаллического бадделеита α -ZrO₂ к сухой аморфной модификации;

3. В сильнокислой среде (1 М HClO₄) растворимость кристаллических модификаций ZrO₂ на 3–4 порядка выше, чем в воде, и определяется в основном комплексом Zr(OH)³⁺, а для аморфного порошка ZrO₂ – комплексами Zr₄(OH)₈⁸⁺ (pH 0), Zr₅(OH)₁₂⁸⁺ (pH 1) и Zr(OH)₂²⁺ (pH 2). Комплекс Zr(OH)₃⁺ вносит незначительный вклад в растворимость ZrO₂ при pH 0–2. Аквакатионы Zr⁴⁺ определяют растворимость α -ZrO₂ при pH < 0. При pH=1–15 полиядерные гидроксокомплексы Zr(IV) не оказывают заметного влияния на растворимость макрокристаллических модификаций ZrO₂;

4. В сильнощелочных водных средах (pH = 13,5–14,7) растворимость ZrO₂ на 2–3 порядка выше, чем в воде, и определяется в основном комплексом Zr(OH)₆²⁻.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Школьников Е.В. Термодинамический расчет растворимости твердых гидроксидов элементов IIIA группы в воде и водных средах // Журнал прикладной химии. 2008. Т. 81, № 9. С. 1428–1431.

Школьников Е.В. Растворимость и амфотерность оксидов Cr_2O_3 , Fe_2O_3 и их гидратов в водных средах // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2014. Вып. 206. С. 154–162.

Школьников Е.В. Влияние полиморфизма и дисперсности диоксида титана на растворимость в кислых и щелочных средах // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2016. Вып. 215. С. 266–275.

Brown P., Curti E., Grambow B., Ekberg C. Chemical thermodynamics of zirconium (Chemical Thermodynamics. Vol. 8.) Amsterdam: Elsevier, 2005. 544 p.

Cho H.-R., Walther C., Rothe J., Neck V., Denecke M.A., Dardenne K., Fanghänel T. Combined LIBD and XAFS investigation of the formation and structure of Zr(IV) colloids // Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2005. Vol. 383, no. 1. P. 28–40.

Curti E., Degueldre C. Solubility and hydrolysis of Zr oxides: a review and supplemental data // Radiochimica Acta. 2002. Vol. 90, no. 9–11. P. 801–804.

Ekberg C., Kalvenius G., Albinsson Y., Brown P. Studies on the hydrolytic behavior of zirconium(IV) // Journal of Solution Chemistry. 2004. Vol. 33, no. 1. P. 47–79.

Kobayashi T., Sasaki T., Takagi I., Moriyama H. Solubility of zirconium (IV) hydrous oxides // Journal Nuclear Science Technology. 2007. Vol. 44, no. 1. P. 90–94.

Kobayashi T., Uemura T., Sasaki T., Takagi I., Moriyama H. The solubilities and solubility products of zirconium hydroxide and oxide after aging at 278, 313, and 333 K // Radiochimica Acta. 2016. Vol. 104, no. 3. P. 183–193.

Luo X., Zhou W., Ushakov S.V., Navrotsky A., Demkov A.A. Monoclinic to tetragonal transformations in hafnia and zirconia: A combined calorimetric and density functional study // Physical review. B. Condensed matter. 2009. Vol. 80, no. 13. Art. no. 134119.

Nogami M. Crystal growth of tetragonal ZrO_2 in the glass system $\text{ZrO}_2\text{-SiO}_2$ prepared by the sol-gel process from metal alkoxides // Journal of Materials Science. 1986. Vol. 21, no. 10. P. 3513–3516.

Pitcher M.W., Ushakov S.V., Navrotsky A., Woodfield B.F., Li G., Boerio-Goates Ju. Energy crossovers in nanocrystalline zirconia // Journal of American Ceramic Society. 2005. Vol. 88, no. 1. P. 160–167.

Qiu L., Guzonas D. A., Webb D. G. Zirconium dioxide solubility in high temperature aqueous solutions // Journal of Solution Chemistry. 2009. Vol. 38, no. 7. P. 857–867.

Thoenen T., Hummel W., Berner U., Curti E. The PSI/Nagra Chemical Thermo-dynamic Database 12/07 // Arbeitsbericht NAB. 2014. No. 14–49. P. 353–378.

Walther C., Rothe J., Fuss M.B., Büchner S., Koltsov S., Bergmann T. Investigation of polynuclear Zr(IV) hydroxide complexes by nanoelectrospray mass-

spectrometry combined with XAFS // Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2007. Vol. 388, no. 2. P. 409–431.

Xie S., Iglesia E., Bell A.T. Water-assisted tetragonal-to-monoclinic phase transformation of ZrO_2 at low temperatures // Chemistry of Materials. 2000. Vol. 12, no. 8. P. 2442–2447.

References

- Brown P., Curti E., Grambow B., Ekberg C. Chemical thermodynamics of zirconium (Chemical Thermodynamics. Vol. 8). Amsterdam: Elsevier, 2005. 544 p.
- Cho H.-R., Walther C., Rothe J., Neck V., Denecke M.A., Dardenne K., Fanghänel T. Combined LIBD and XAFS investigation of the formation and structure of $\text{Zr}(\text{IV})$ colloids. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2005, vol. 383, no. 1, pp. 28–40.
- Curti E., Degueldre C. Solubility and hydrolysis of Zr oxides: a review and supplemental data. *Radiochimica Acta*, 2002, vol. 90, no. 9–11, pp. 801–804.
- Ekberg C., Kalvenius G., Albinsson Y., Brown P. Studies on the hydrolytic behavior of zirconium(IV). *Journal of Solution Chemistry*, 2004, vol. 33, no. 1, pp. 47–79.
- Kobayashi T., Sasaki T., Takagi I., Moriyama H. Solubility of zirconium (IV) hydrous oxides. *Journal of Nuclear Science Technology*, 2007, vol. 44, no. 1, pp. 90–94.
- Kobayashi T., Uemura T., Sasaki T., Takagi I., Moriyama H. The solubilities and solubility products of zirconium hydroxide and oxide after aging at 278, 313, and 333 K. *Radiochimica Acta*, 2016, vol. 104, no. 3, pp. 183–193.
- Luo X., Zhou W., Ushakov S.V., Navrotsky A., Demkov A.A. Monoclinic to tetragonal transformations in hafnia and zirconia: A combined calorimetric and density functional study. *Physical review. B. Condensed matter*, 2009, vol. 80, no. 13, art. no. 134119.
- Nogami M. Crystal growth of tetragonal ZrO_2 in the glass system $\text{ZrO}_2\text{-SiO}_2$ prepared by the sol-gel process from metal alkoxides. *Journal of Materials Science*, 1986, vol. 21, no. 10, pp. 3513–3516.
- Pitcher M.W., Ushakov S.V., Navrotsky A., Woodfield B.F., Li G., Boerio-Goates Ju. Energy crossovers in nanocrystalline zirconia. *Journal of American Ceramic Society*, 2005, vol. 88, no. 1, pp. 160–167.
- Qiu L., Guzonas D.A., Webb D.G. Zirconium dioxide solubility in high temperature aqueous solutions. *Journal of Solution Chemistry*, 2009, vol. 38, no. 7, pp. 857–867.
- Shkol'nikov E.V. Thermodynamic calculation of the solubility of solid hydroxides of group IIIA elements in water and aqueous media. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2008, vol. 81, no. 9, pp. 1503–1507. (In Russ.)

Shkol'nikov E.V. Rastvorimost' i amfoternost' oksidov Cr_2O_3 , Fe_2O_3 i ikh gidratov v vodnykh sredakh. *Izvestiia Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii*, 2014, iss. 206, pp. 154–162. (In Russ.)

Shkol'nikov E.V. Vliyanie polimorfizma i dispersnosti dioksida titana na rastvorimost' v kislykh i shchelocnykh sredakh. *Izvestiia Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii*, 2016, iss. 215, pp. 266–275. (In Russ.)

Thoenen T., Hummel W., Berner U., Curti E. The PSI/Nagra Chemical Thermodynamic Database 12/07. *Arbeitsbericht NAB*, 2014, no. 14–49, pp. 353–378.

Walther C., Rothe J., Fuss M.B., Büchner S., Koltsov S., Bergmann T. Investigation of polynuclear Zr(IV) hydroxide complexes by nanoelectrospray mass-spectrometry combined with XAFS. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2007, vol. 388, no. 2, pp. 409–431.

Xie S., Iglesia E., Bell A.T. Water-assisted tetragonal-to-monoclinic phase transformation of ZrO_2 at low temperatures. *Chemistry of Materials*, 2000, vol. 12, no. 8, pp. 2442–2447.

Материал поступил в редакцию 07.11.2024

Школьников Е.В. Влияние полиморфизма и дисперсности диоксида циркония на растворимость в кислых и щелочных средах // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 458–472. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.458-472

Впервые дана термодинамическая характеристика истинной растворимости при 25°C аморфной и кристаллических наноразмерных модификаций ZrO_2 в зависимости от pH водной среды в интервале 0–14,7 с учетом образованияmono- и полиядерных гидроксокомплексов Zr(IV) и дисперсности твердой фазы. Средний эффективный радиус частиц ($r \leq 25\text{ нм}$ для $\alpha\text{-ZrO}_2$) следует учитывать в качестве термодинамического параметра при определении растворимости диоксида циркония в наносостоянии. Истинная растворимость полиморфных модификаций ZrO_2 в водных слабокислых и слабощелочных средах при отсутствии фторид- и карбонат-ионов весьма низкая ($7 \times 10^{-10} - 10^{-7}$ моль/л), уменьшается при прокаливании и определяется прочными нейтральными комплексами $\text{Zr}(\text{OH})_4$, преобладающими при pH 2–13. Растворимость в водных средах заметно зависит от структуры кристаллов ($\alpha\text{-ZrO}_2 < \beta\text{-ZrO}_2 < \gamma\text{-ZrO}_2$), существенно возрастает с уменьшением размера частиц кристаллических нанопорошков и сильно (примерно на 4 порядка) – при переходе от стабильного кристаллического бадделеита $\alpha\text{-ZrO}_2$ к сухой аморфной модификации. В сильнокислой среде (1 М HClO_4) растворимость кристаллических модификаций ZrO_2 на 3–4 порядка выше, чем в воде, и определяется в основном комплексом $\text{Zr}(\text{OH})^{3+}$, а для аморфного порошка ZrO_2 – комплексами $\text{Zr}_4(\text{OH})_8^{8+}$ (pH 0), $\text{Zr}_5(\text{OH})_{12}^{8+}$ (pH 1) и $\text{Zr}(\text{OH})_2^{2+}$ (pH 2). Комплекс $\text{Zr}(\text{OH})_3^+$ вносит

незначительный вклад в растворимость ZrO_2 при pH 0–2. Аквакатионы Zr^{4+} определяют растворимость $\alpha\text{-ZrO}_2$ при $\text{pH} < 0$. При $\text{pH}=1\text{--}15$ полиядерные гидроксокомплексы $\text{Zr}(\text{IV})$ не оказывают заметного влияния на растворимость макрокристаллических модификаций ZrO_2 . В сильнощелочных водных средах ($\text{pH} = 13,5\text{--}14,7$) растворимость ZrO_2 на 2–3 порядка выше, чем в воде, и определяется в основном комплексом $\text{Zr}(\text{OH})_6^{2-}$.

Ключевые слова: растворимость и амфотерность, термодинамический расчет, аморфная и нанокристаллические модификации ZrO_2 , дисперсность, кислые и щелочные среды.

Shkol'nikov E.V. The influence of polymorphism and dispersity of zirconium dioxide on solubility in acidic and alkaline media. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 458–472 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.458-472

The thermodynamic characterization of the true solubility at 25°C of amorphous and crystalline nanoscale modifications of ZrO_2 depending on the pH of the aqueous medium in the range of 0–14,7, taking into account the formation of mono- and polynuclear hydroxocomplexes of $\text{Zr}(\text{IV})$ and the dispersity of the solid phase, has been given for the first time. The average effective particle radius ($r \leq 25\text{ nm}$ for $\alpha\text{-ZrO}_2$) should be taken into account as a thermodynamic parameter in determining the solubility of zirconium dioxide in the nanostate. The true solubility of polymorphic modifications of ZrO_2 in aqueous slightly acidic and slightly alkaline media in the absence of fluoride and carbonate ions is very low ($7 \times 10^{-10} - 10^{-7} \text{ mol/L}$), decreases with calcination and is determined by strong neutral complexes $\text{Zr}(\text{OH})_4$, prevailing at pH 2–13. Solubility in aqueous media depends markedly on the crystal structure ($\alpha\text{-ZrO}_2 < \beta\text{-ZrO}_2 < \gamma\text{-ZrO}_2$), increases significantly with decreasing particle size of crystalline nanopowders and strongly (by about 4 orders of magnitude) in the transition from stable crystalline baddeleyite $\alpha\text{-ZrO}_2$ to dry amorphous modification. In strongly acidic medium (1 M HClO_4) the solubility of crystalline modifications of ZrO_2 is 3–4 orders of magnitude higher than in water and is determined mainly by the complex $\text{Zr}(\text{OH})^{3+}$, and for amorphous powder ZrO_2 – by the complexes $\text{Zr}_4(\text{OH})_8^{8+}$ (pH 0), $\text{Zr}_5(\text{OH})_{12}^{8+}$ (pH 1) and $\text{Zr}(\text{OH})_2^{2+}$ (pH 2). The $\text{Zr}(\text{OH})_3^+$ complex makes a minor contribution to the solubility of ZrO_2 at pH 0–2. Zr^{4+} aquacations determine the solubility of $\alpha\text{-ZrO}_2$ at $\text{pH} < 0$. At $\text{pH}=1\text{--}15$ polynuclear $\text{Zr}(\text{IV})$ hydroxocomplexes have no appreciable effect on the solubility of macrocrystalline ZrO_2 modifications. In strongly alkaline aqueous media ($\text{pH} = 13,5\text{--}14,7$) the solubility of ZrO_2 is 2–3 orders of magnitude higher than in water and is determined mainly by the complex $\text{Zr}(\text{OH})_6^{2-}$.

Keywords : растворимость и амфотеризм, термодинамический расчет, аморфные и нанокристаллические модификации ZrO_2 , дисперсность, кислые и щелочные среды.

ШКОЛЬНИКОВ Евгений Васильевич – профессор кафедры химии Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор химических наук, профессор. ORCID: 0000-0002-0199-1200. SPIN-код: 2269-3782. ResearcherID: G-8108-2016. Scopus AuthorID: 7003735499.

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

SHKO'NIKOV Evgeny V. – DSc (Chemical), Professor, St.Petersburg State Forestry University. ORCID: 0000-0002-0199-1200. SPIN-code: 2269-3782. Researcher ID: G-8108-2016. Scopus Author ID: 7003735499.

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

М.А. Мозгушин, А.В. Епифанов

НОРМИРОВАНИЕ СБРОСОВ СТОЧНЫХ ВОД ЦБК

Введение. Современная система нормирования сбросов сточных вод целлюлозно-бумажных комбинатов (далее ЦБК) предполагает расчет нормативов допустимых сбросов (далее НДС) для веществ 1 и 2 классов опасности, а также технологических нормативов сбросов. Величины НДС во многом зависят от рассчитанной величины кратности разбавления.

Кратность разбавления сточных вод рассчитывается в соответствии с Методикой разработки нормативов допустимых сбросов загрязняющих веществ в водные объекты для водопользователей, утвержденной приказом Министерства природных ресурсов и экологии РФ № 1118 от 29.12.2020 г. «Об утверждении методики разработки НДС загрязняющих веществ в водные объекты для водопользователей» (далее Методика).

Проведенный в работе анализ показал, что в Методике для условий сброса сточных вод через рассеивающие водовыпуски, применяемые на ЦБК, отсутствуют методы расчета кратности разбавления для многих гидрологических и метеорологических режимов.

Кратность разбавления сточных вод показывает, во сколько раз снижается концентрация загрязняющего вещества на участке водного объекта от места выпуска сточных вод до контрольного створа с учетом фоновой концентрации. Величина НДС во многом определяется величиной кратности разбавления сточных вод [Епифанов и др., 2024].

В ряде приведенных методов некорректно указаны границы применимости, что приводит к экологически необоснованным величинам НДС [Мозгушин, Епифанов, 2023].

В работе предложена модернизированная схема типизации водных объектов, позволившая перейти к универсальным математическим моделям для имитации процессов распространения примесей в водной среде и определить критерии выбора данных универсальных математических моделей для нормирования сбросов ЦБК. Определены типы водных объектов, в которые сбрасывают сточные воды крупнейшие ЦБК и КПК (картонно-полиграфические комбинаты) РФ.

Анализ действующей Методики. Методика содержит алгоритмы расчета кратности разбавления сточных вод для водотоков, водоемов и морей. Для водотоков Методика содержит 5 методов расчета кратности разбавления и 2 метода расчета кратности разбавления по водоемам.

Каждый из перечисленных методов, указанных в Методике, имеет свои границы применимости.

Границные условия применимости методов для расчета кратности разбавления, указанные в действующей Методике, приведены ниже (табл. 1) [Караушев, 1981].

Таблица 1

Границные условия применимости методов, указанные в действующей Методике

Boundary conditions for the applicability of methods specified in the current Methodology

Методы, изложенные в Методике		
Водотоки		
№	Метод	Границные условия, указанные в Методике
1	Фролова-Родзиллера	$0,0025 \leq \frac{q}{Q} \leq 0,1,$ <p>где q – расход сточных вод на выходе, $\text{м}^3/\text{с}$; Q – расчетный расход водотока, $\text{м}^3/\text{с}$</p>
2	Лапшева	<p>Для напорных сосредоточенных и рассеивающих выпусков $v_{cr} \geq 4 \cdot v_p$ / при абсолютных скоростях истечения струи из выпуска больше 2 м/с</p> <p>Для единичного напорного выпуска</p> $\frac{v_0}{v_p} = \frac{v_p + 0.15}{v_p},$ <p>где v_{cr} – скорость истечения сточных вод, $\text{м}/\text{с}$; v_p – скорость потока реки, $\text{м}/\text{с}$; v_0 – скорость на оси струи, $\text{м}/\text{с}$</p>
3	ТПИ	Метод используется для небольших водотоков с коэффициентом извилистости меньше 1,5. Коэффициент интенсивности турбулентного перемешивания должен быть в пределах от 10 до 70
4	Караушева	–
5	ГГИ	<p>Зависимость $\frac{\Omega_{zar}}{\Omega_{общ}} = f(\eta_{zar})$ в пределах от 10^{-6} до 1,</p> <p>где Ω_{zar} – площадь зоны загрязнения между двумя фиксированными створами; $\Omega_{общ}$ – общая площадь водной поверхности; η_{zar} – показатель относительной площади зоны загрязнения</p>
Водоемы		
1	Руффеля	Зоны смешения не превышает 10 м, расстояние от выпуска до контрольного створа вдоль берега < 20 км, расстояние от выхода сточных вод до берега $< 0,5$ км. Глубина водоема – 3–10 м
2	Лапшева	Метод используется для сосредоточенного выпуска сточных вод, в случае если не выполняются условия применимости предыдущего метода

Методы, приведённые в табл. 1, являются упрощёнными и разрабатывались до эпохи развитых вычислительных технологий, позволяя вручную рассчитывать степень разбавления сточных вод.

Величина кратности разбавления сточных вод в водотоках и водоемах зависит от следующих параметров: гидрологических особенностей водотока (расход воды, скорость течения, глубина, ширина и т. д.), параметров выпуска сточных вод (местоположение водовыпуска, тип выпуска) и нормативов качества воды [Численное..., 2004].

Необходимые исходные данные для расчета кратности разбавления в водотоках и водоемах представлены ниже (табл. 2–3).

Таблица 2

Необходимые исходные данные для расчета кратности разбавления в водотоках

Necessary initial data for calculating the dilution factor in watercourses

Исходные данные	Метод расчёта			
	1.Фролова-Родзиллеря и Лапшева	2.ТПИ	3.Караяшева	4.ГГИ
Расход сточных вод	+	+	+	+
Тип выпуска	–	+	+	–
Количество оголовков выпуска	–	+	–	–
Скорость истечения сточных вод	+	–	–	–
Средний диаметр выпускного отверстия	+	–	–	–
Расстояние от места выпуска до контрольного створа водопользования	+	+	+	–
Средняя глубина на рассматриваемом участке	+	+	+	–
Расчетная скорость течения	+	+	+	–
Расчетный расход воды	+	+	+	+
Средняя ширина участка реки	+	+	+	+
Коэффициент извилистости участка реки	+	–	–	–
Концентрация ЗВ	+	+	+	–
Фоновая концентрация	+	+	+	–
Коэффициент шероховатости ложа водного объекта	+	–	–	–
Длина зоны загрязнения	–	–	–	+
Общая площадь водной поверхности	–	–	–	+
Площадь зоны загрязнения между двумя фиксированными створами	–	–	–	+

Таблица 3

**Необходимые исходные данные для расчета кратности разбавления
в водоемах**

Necessary initial data for calculating the dilution factor in water bodies

Исходные данные	1.Руффеля	2.Лапшева
Расход сточных вод	+	+
Расстояние от места выпуска до берега	+	+
Скорость ветра над водой	+	–
Расстояние от выпускного отверстия до поверхности водного объекта	+	+
Расстояние от места выпуска до контрольного створа водопользования	+	+
Средняя глубина на рассматриваемом участке	+	+
Коэффициент шероховатости ложа водного объекта	–	+
Длина зоны загрязнения	–	+
Параметр сопряжения участка двухмерной диффузии с участком трехмерной диффузии	–	+
Параметр, учитывающий влияние ближайшего берега на кратность основного разбавления	–	+
Характерная минимальная скорость течения в водоеме в месте сброса	–	+
Длина начального участка разбавления, рассчитываемая	–	+
Концентрация ЗВ	+	+
Фоновая концентрация	+	+

Результаты расчета кратности разбавления. Для оценки корректности расчетов кратности разбавления сточных вод согласно действующей Методике были выполнены контрольные вычисления по каждому представленному методу.

Выбор диапазонов исходных данных осуществлялся исходя из установленных ограничений указанных методик (табл. 1), а также на основании реальных технических показателей процесса сброса загрязненных вод предприятием ЦБК.

Ниже приведены диапазоны значений исходных данных, использованных в расчетах, а также выборка результатов расчета кратности разбавления в водотоках и водоемах (табл. 4–5).

Таблица 4

Диапазон исходных данных для расчета кратности разбавления в водотоках
Range of initial data for calculating the dilution factor in watercourses

Исходные данные	Диапазон
Расход сточных вод, $\text{м}^3/\text{с}$	0,1–0,5
Скорость истечения сточных вод, $\text{м}/\text{с}$	0,05–10
Средний диаметр выпускного отверстия, м	0,1
Расстояние от места выпуска до контрольного створа водопользования, м	150,0–500,0
Средняя глубина на рассматриваемом участке, м	0,1–3
Расчетная скорость течения, $\text{м}/\text{с}$	0,1–0,5
Расчетный расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$	4,0–20,0
Средняя ширина участка реки, м	1,0–250,0
Коэффициент извилистости участка реки	1,0–2,0
Коэффициент шероховатости ложа водного объекта	0,025–0,06
Количество оголовков выпуска	11

Таблица 5

Диапазон исходных данных для расчета кратности разбавления в водоемах
Range of initial data for calculating the dilution factor in water bodies

Исходные данные	Диапазон
Расход сточных вод, $\text{м}^3/\text{с}$	0,01–0,05, шаг 0,01
Расстояние от места выпуска до берега, м	10–30, шаг 10,0
Скорость ветра над водой, м	1–6, шаг 1,0
Расстояние от места выпуска до контрольного створа водопользования, м	1000,0–4000,0, шаг 1000,0
Средняя глубина на рассматриваемом участке, м	2,0–10,0, шаг 2,0

По вышеуказанному диапазону исходных данных по каждому методу, изложенному в Методике, проведено по три тестовых расчета кратности разбавления в водотоках и водоемах.

Выборка результатов расчета кратности разбавления для водотоков и водоемов представлена ниже (табл. 6).

На основе проведенных расчетов выявлено, что основными параметрами, влияющими на величину кратности разбавления сточных вод, являются: расчетный расход воды, ширина и скорость течения водного объекта.

Таблица 6

Выборка результатов расчета кратности разбавления в водотоках и водоемах

A selection of results from calculating the dilution factor in watercourses and reservoirs

Метод	Кратность разбавления	Выборка результатов расчета
Водотоки		
1.Фролова-Родзиллера, летний период	Кратность основного разбавления	27,2
		12,2
		80,7
		19,8
		52,7
		9,6
2.Лапшева	Кратность основного разбавления	8,0
		13,2
		20,8
Произведение кратности начального разбавления на кратность основного разбавления	Кратность общего разбавления, летний и зимний периоды	217,6
		161,04
		1678,56
		158,4
		695,64
		199,68
3.ТПИ	Кратность общего разбавления	15,8
		10,3
		12,4
4.Карушева	Кратность общего разбавления	11,9
		2,7
		33,7
		9,75
5. ГГИ	Кратность основного разбавления	20,1
		7,7
		60,2
Водоемы		
1.Руффеля	Кратность основного разбавления	26,9
		39,3
		14,8

На следующем этапе было проведено сопоставление полученных результатов расчетов кратности разбавления по методам, представленным в Методике.

Из табл. 6 видно, что результаты расчета кратности разбавления значительно отличаются друг от друга, что требует уточнения выбора расчетных методов.

Математический аппарат. Описание процессов переноса и трансформации загрязняющих веществ в воде. Проблема загрязнения водных объектов является классической и неоднократно исследовалась различными авторами [Павловский, 2005; Кузина, Кошев, 2014; Шабалин и др., 2021; Епифанова и др., 2022; Карпенко, Ширяева, 2022]. В работах былоделено значительное внимание изучению и прогнозированию изменений качества воды в водных объектах от сброса сточных вод.

Согласно Методике расчет НДС проводится для неблагоприятных гидрологических и гидрохимических условий для максимальных расходов сточных вод ЦБК. Таким образом, для расчета НДС для ЦБК применимы стационарные математические модели. Водные объекты РФ отличаются многообразием гидрологических и гидрохимических режимов, а также уникальностью морфометрических особенностей, поэтому разработка индивидуальных моделей переноса загрязняющих веществ является уникальной задачей. Однако в настоящее время широко применимы методы типизации водных объектов, в которых за счет допустимого упрощения индивидуальных особенностей водных объектов можно перейти к типовым математическим моделям [Караушев, 1981].

Модернизированная схема типизации водных объектов приведена на рис. 1–2.

На основе предложенной схемы типизации водных объектов были определены типы водных объектов, в которые сбрасывают сточные воды крупнейшие ЦБК и картонно-полиграфические комбинаты РФ (далее КПК) (табл. 7).

Каждому случаю сброса сточных вод от ЦБК соответствуют одномерные, двумерные, трехмерные математические модели.

Трехмерные математические модели применяют при переносе вещества в трехмерном пространстве. Применение двумерных математических моделей может быть обусловлено соотношением геометрических размеров моделируемой среды. Например, для неглубокого водоема, в котором глубина значительно меньше длины и ширины, можно предположить, что выравнивание концентраций загрязняющих веществ по глубине происходит моментально.

Следовательно, на любой вертикали концентрации загрязняющих веществ будут одинаковыми, а изменение концентраций по глубине можно приравнять к нулю. Аналогично одномерные модели могут применяться, когда один из геометрических параметров значительно превосходит два других.

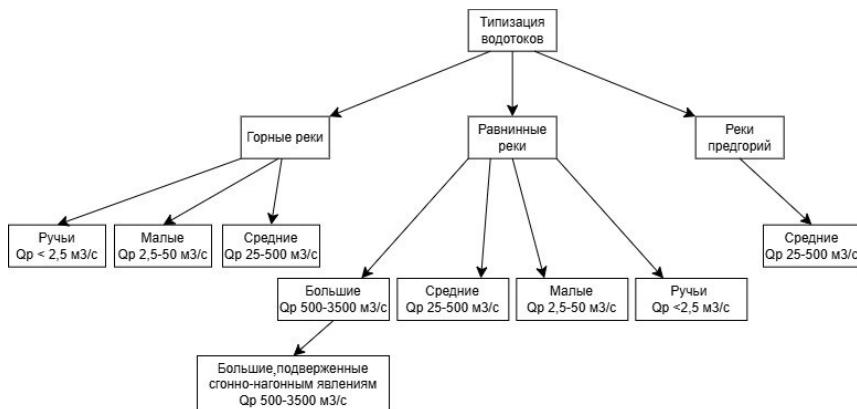


Рис. 1. Типизация водотоков
Fig. 1. Typification of watercourses

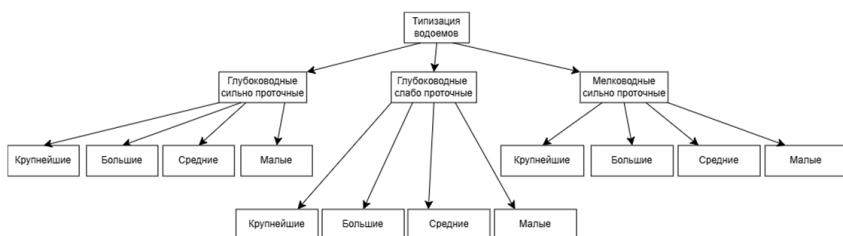


Рис. 2. Типизация водоемов
Fig. 2. Typification of reservoirs

При сбросе сточных вод в крупные водотоки целесообразно применять трехмерные математические модели. В общем случае процесс формирования качества воды описывается системой гидродинамики и системой турбулентной дисперсии для неконсервативных веществ [Дружинин, 1989].

Использование трехмерных математических моделей целесообразно при наличии детальных данных о морфометрических параметрах дна водных объектов и режимах сбросов сточных вод [Клеванный, Смирнова, 2009].

Таблица 7

**Типы водных объектов, в которые сбрасывают сточные воды
крупнейшие ЦБК и КПК РФ**

Types of water bodies into which wastewater is discharged by the largest pulp and paper mills and pulp and paper industry enterprises of the RF

Тип водного объекта	ЦБК России	Водный объект
Большие равнинные реки	ООО «ЦБК «Кама»	река Кама
	АО «Соликамскбумпром»	
	АО «Марийский ЦБК»	
	АО «Сыктывкарский ЛПК»	
	ОАО «Селенгинский ЦКК»	
	АО «Волга»	
	НПАО «Светогорский ЦБК»	
	Котласский ЦБК филиал ОАО «Группа Илим»	
Большие равнинные реки, под- верженные сгонно-нагонным явлению	АО «Архангельский ЦБК»	река Северная Двина
Средние равнинные реки	ООО «Сухонский КБК»	река Сухона
	ПАО «Сокольский ЦБК»	
	АО «Пролетарий»	
	ООО «Кировпейпер»	
Малые равнинные реки	АО «ТБФ»	река Шаня
	АО «БФ «Коммунар»	река Ижора
Большие глубоководные силь- но проточные водоемы	АО «Сясьский ЦБК»	Ладожское озеро
	ООО «РК-Гранд»	
	АО «Кондопожский ЦБК»	Онежское озеро
Средние глубоководные силь- но проточные водоемы	АО «Сегежский ЦБК»	Выгозеро озеро

При сбросе сточных вод в неглубокие большие реки, а также средние равнинные реки во многих случаях достаточно двумерных математических моделей, которые позволят получить результат с инженерной точностью и потребуют умеренной исходной информации [Дружинин, Шишкин, 1989].

При значительных скоростях течения может быть использована следующая модель:

$$Vx \left(\frac{dC}{dx} \right) = Dy \left(\frac{d^2C}{dy^2} \right) - KC, \quad (1)$$

где Vx – средняя скорость течения по оси; C – мгновенное значение концентрации; x, y – координаты по соответствующим осям; Dx, Dy – коэффициент диффузии; K – коэффициент неконсервативности.

При незначительных скоростях течения для учета продольной диффузии применима следующая модель:

$$Vx \left(\frac{dC}{dx} \right) = Dx \left(\frac{d^2C}{dx^2} \right) + Dy \left(\frac{d^2C}{dy^2} \right) - KC, \quad (2)$$

где $Vx \left(\frac{dC}{dx} \right)$ – характеристика конвективного переноса; $Dy \left(\frac{d^2C}{dy^2} \right)$,

$Dx \left(\frac{d^2C}{dx^2} \right)$ – характеристика диффузионного переноса.

Стоит учитывать, что модели 1 и 2 применимы, когда направление течения идет вдоль берега.

Одномерная диффузия может применяться для малых равнинных рек:

$$\frac{v_0}{D} \frac{dC}{dx} = \frac{d^2C}{dx^2}. \quad (3)$$

Согласно табл. 7 в малые равнинные реки сбрасывают сточные воды комбинаты, работающие на вторичном сырье.

Решения для вышеуказанных методов моделирования приводятся в [Караушев, 1981; Дружинин, Шишгин, 1989; Кузина, Кошев, 2014; Зарипов и др., 2018].

Наибольшую сложность представляют равнинные реки, подверженные сгонно-нагонным явлениям. Сгонно-нагонные явления проявляются в изменении уровня воды у берегов водного объекта, которое вызвано действием ветра. Повышение уровня воды называется нагон, понижение – сгон. В этом случае применение стационарных условий становится неприемлемым, т.к. пятно загрязнений с течением времени мигрирует относительно места выпуска. Необходимо использовать нестационарные модели, на основе которых можно выявить неблагоприятные условия, характеризующиеся максимальным негативным воздействием на водные объекты.

Виды нестационарных моделей приведены в работах [Любицкий, 2000; Вишневская, Остроумова, 2019; Проценко и др., 2024].

Под заявленные условия подходит река Северная Двина, в которую сбрасывает свои сточные воды АО «Архангельский ЦБК». В устье Северной Двины при сильных северо-западных ветрах формируются нагоны. Причиной этого являются циклоны над Баренцевым морем или местные ветра на Белом море и в Двинском заливе.

При сбросе сточных вод в водоемы универсальной моделью становится модель «Мелкого моря», решение которой приведено в [Васильев, 2005]

Заключение. Методы расчета кратности разбавления сточных вод, изложенные в Методике, во многих случаях приводят к противоречивым результатам. Приведенные в Методике методы расчета кратности разбавления сточных вод являются упрощенными, позволяющими получить результаты без использования современных вычислительных средств.

В работе предложена модернизированная схема типизации водных объектов, позволившая перейти к типовым математическим моделям переноса загрязняющих веществ для нормирования сбросов сточных вод ЦБК. Определены типы водных объектов, в которые сбрасывают сточные воды крупнейшие ЦБК и КПК РФ и критерии выбора различных математических моделей для нормирования сбросов ЦБК.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Васильев В.С. Моделирование трехмерной гидродинамики мелкого моря в гидростатическом приближении // Известия ЮФУ. Технические науки. 2005. № 9. С. 97.

Вишневская И.А., Остроумова Л.П. Опасные (сгонно-нагонные) явления в устьевой области реки Дон // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и индустриальных вызовов: мат. межд. науч. конф. Ростов-н/Д, 2019. С. 28–32.

Дружинин Н.И., Шишкин А.И. Математическое моделирование и прогнозирование загрязнения поверхностных вод суши. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 389 с.

Епифанова М.А., Епифанов А.В., Аким Э.Л. Расчет величины негативного воздействия на водный объект от предприятий целлюлозно-бумажной промышленности на основе математического моделирования переноса загрязняющих веществ // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 238. С. 254–266.

Епифанов А.В., Мозгушин М.А., Прохорова А.А. Парадоксы нормирования нагрузки на водные объекты // Экологические аспекты современных технологий в химико-лесном комплексе: сб. науч. мат. I и II науч.-практ. конф. Архангельск, 2024. С. 135–138.

Зарипов Ш.Х., Марданов Р.Ф., Гильфанов А.К., Шарафутдинов В.Ф., Никоненкова Т.В. Математические модели переноса загрязнений в окружающей среде: учеб. пособ. Казань: Казанский ун-т, 2018. 47 с.

Караулов А.В. Методические основы оценки антропогенного влияния на качество поверхностных вод: монография. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. 175 с.

Карпенко Н.П., Ширяева М.В. Трехмерная математическая модель прогнозирования загрязнения водного объекта биогенными элементами // Природооустройство. 2022. № 1. С. 63–69.

Клеванный К.А., Смирнова Е.В. Использование программного комплекса CARDINAL // Журнал Университета водных коммуникаций. 2009. Вып. 1. С. 153–162.

Кузина В.В., Кошев А.Н. Математическое моделирование в задачах мониторинга состояния водной среды: монография. Пенза: ПГУАС, 2014. 143 с.

Любичкий Ю.В. Численное гидродинамическое моделирование штормовых нагонов на шельфе Курильских островов // Математика. Компьютер. Образование: мат. 7 межд. конф. Дубна, 2000. С. 23–30.

Мозгушин М.А., Епифанов А.В. Разработка алгоритма расчета кратности разбавления сточных вод // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. 2023. № 3. С. 70–73.

Павловский В.А. Моделирование процесса распространения загрязнений водной среды // Вестник Самарского государственного технического университета. 2005. № 34. С. 178–181.

Проценко Е.А., Панасенко Н.Д., Проценко С.В. Математическое моделирование катастрофических сгонно-нагонных явлений Азовского моря с использованием данных дистанционного зондирования // Computational Mathematics and Information Technologies. 2024. № 8. С. 33–44.

Численное моделирование процессов загрязнения поверхностных и подземных вод. Ростов н/Д: Изд-во ЧП Свидлера, 2004. 168 с.

Шабалин В.В., Кукина Е.А., Рогожина Т.С., Дронов В.М. Применение математического моделирования для прогнозирования переноса загрязняющих веществ в реках // Инновации и инвестиции. 2021. № 5. С. 176–179.

References

Druzhinin N.I., Shishkin A.I. Mathematical modeling and forecasting of land surface water pollution. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989. 389 p. (In Russ.)

Epifanova M.A., Epifanov A.V., Akim E.L. Calculation of the magnitude of the negative impact on a water body from pulp and paper industry enterprises based on

mathematical modeling of pollutant transfer. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2022, iss. 238, pp. 254–266. (In Russ.)

Epifanov A.V., Mozgushin M.A., Prokhorova A.A. Paradoxes of standardizing the load on water bodies. *Ecological aspects of modern technologies in chemical and forest complex*: collection of sci. mat. of the I and II sci.-pract. conf. Arkhangelsk, 2024, pp. 135–138. (In Russ.)

Karaushev A.V. Methodological foundations for assessing the anthropogenic impact on the quality of surface waters: monograph. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1981. 175 p. (In Russ.)

Karpenko N.P., Shiryaeva M.V. Three-dimensional mathematical model for predicting pollution of a water body with biogenic elements. *Nature management*, 2022, no. 1, pp. 63–69. (In Russ.)

Klevanny K.A., Smirnova E.V. Using the CARDINAL software package. *University of Water Communications Journal*, 2009, iss. 1, pp. 153–162. (In Russ.)

Kuzina V.V., Koshev A.N. Mathematical modeling in problems of monitoring the state of the aquatic environment: monograph. Penza: PSUAB, 2014. 143 p. (In Russ.)

Lyubitskiy Yu.V. Numerical hydrodynamic modeling of storm surges on the shelf of the Kuril Islands. *Mathematics. Computer. Education*: mat. of the 7th int. conf. Dubna, 2000, pp. 23–30. (In Russ.)

Mozgushin M.A., Epifanov A.V. Development of an algorithm for calculating the dilution factor of wastewater. *Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design*, 2023, no. 3, pp. 70–73. (In Russ.)

Numerical modeling of surface and groundwater pollution processes. Rostov-on-Don: ChP Svidler Publishing, 2004. 168 p. (In Russ.)

Pavlovskiy V.A. Modeling the process of spreading pollution of the aquatic environment. *Bulletin of the Samara State Technical University*, 2005, no. 34, pp. 178–181. (In Russ.)

Protsenko E.A., Panasenko N.D., Protsenko S.V. Mathematical modeling of catastrophic surge phenomena of the Sea of Azov using remote sensing data. *Computational Mathematics and Information Technologies*, 2024, no. 8, pp. 33–44. (In Russ.)

Shabalin V.V., Kukina E.A., Rogozhina T.S., Dronov V.M. Application of mathematical modeling to predict the transport of pollutants in rivers. *Innovations and Investments*, 2021, no. 5, pp. 176–179. (In Russ.)

Vasilyev V.S. Modeling of three-dimensional shallow sea hydrodynamics in the hydrostatic approximation. *Proceedings of Southern Federal University*, 2005, no. 9, p. 97. (In Russ.)

Vishnevskaya I.A., Ostroumova L.P. Dangerous (surge) phenomena in the mouth area of the Don River. *Patterns of formation and impact of marine, atmospheric hazardous phenomena and disasters on the coastal zone of the Russian Federation in the context of global climatic and industrial challenges*: mat. of int. sci. conf. Rostov-on-Don, 2019, pp. 28–32. (In Russ.)

Zaripov Sh.Kh., Mardanov R.F., Gilfanov A.K., Sharafutdinov V.F., Nikonenkova T.V. Mathematical models of pollution transfer in the environment: textbook. Kazan: Kazan University, 2018. 47 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 18.04.2025

Мозгушин М.А., Епифанов А.В. Нормирование сбросов сточных вод ЦБК // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 473–488. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.473-488

С течением времени усиливается отрицательное влияние человеческой деятельности на окружающую среду. Среди отраслей промышленности особенно выделяется целлюлозно-бумажное производство: оно оказывает значительное негативное воздействие на окружающую среду. Для снижения негативного воздействия существует система нормирования сбросов. Современная система нормирования сбросов сточных вод целлюлозно-бумажных комбинатов предполагает расчет нормативов допустимых сбросов для веществ 1 и 2 классов опасности, а также технологических нормативов сбросов. Величины НДС во многом зависят от рассчитанной величины кратности разбавления. Кратность разбавления сточных вод рассчитывается в соответствии с Методикой разработки норматива допустимых сбросов загрязняющих веществ в водные объекты для водопользователей (далее Методика). Проведенный в работе анализ показал, что в Методике для условий сброса сточных вод через рассеивающие водовыпуски, применяемые на целлюлозно-бумажных производствах, отсутствуют методы расчета кратности разбавления для многих гидрологических и метеорологических режимов. В ряде приведенных методов некорректно указаны границы применимости. Таким образом, принимая во внимание выявленные недостатки существующей Методики расчета кратности разбавления сточных вод, было предложено усовершенствование схемы классификации водных объектов, используемой при нормировании сбросов предприятиями целлюлозно-бумажной промышленности. Новая схема типологии водных объектов обеспечивает возможность перехода к использованию унифицированных стандартных математических моделей, эффективно имитирующих процессы переноса загрязняющих веществ в водных средах различного типа. Это позволило значительно повысить точность расчетов нормативных значений сбросов сточных вод на целлюлозно-бумажных комбинатах. Кроме того, были определены конкретные типы водных объектов, принимающих сточные воды крупных отечественных предприятий целлюлозно-бумажной промышленности и картонно-полиграфической продукции. Исследование показало, что наиболее значимыми факторами являются характер водного объекта и особенности режима сброса сточных вод. Таким образом, каждое предприятие имеет возможность выбрать подходящую

стандартизированную математическую модель, обеспечивающую адекватное описание процесса переноса загрязняющих веществ и точную оценку необходимого уровня разбавления сточных вод перед их попаданием в водные объекты. Такой подход позволит обеспечить соблюдение строгих экологических стандартов и предотвратить дальнейшее ухудшение состояния окружающей среды вследствие производственной деятельности предприятий целлюлозно-бумажной промышленности.

Ключевые слова: математическое моделирование, методика расчета норматива допустимых сбросов, целлюлозно-бумажное производство, норматив допустимого сброса, кратность разбавления.

Mozgushin M.A., Epifanov A.V. Standardization of wastewater discharges from pulp and paper mills. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 473–488 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.473-488

Over time, the negative impact of human activity on the environment increases. Among the industries, the pulp and paper industry stands out in particular: it has a significant negative impact on the environment. To reduce this negative impact, there is a system of discharge standards. The current system of standardization of wastewater discharges of pulp and paper mills involves the calculation of standards for permissible discharges for substances of hazard classes 1 and 2, as well as technological discharge standards. The values of the SDS largely depend on the calculated value of the dilution factor. The dilution factor of wastewater is calculated in accordance with the Methodology for developing the standard for permissible discharges of pollutants into water bodies for water users (hereinafter referred to as the Methodology). The analysis carried out in the work showed that the Methodology for the conditions of wastewater discharge through dispersive outlets used in pulp and paper industries does not contain methods for calculating the dilution factor for many hydrological and meteorological regimes. In a number of the methods provided, the applicability limits are incorrectly indicated. Thus, taking into account the identified shortcomings of the existing Methodology for calculating the dilution factor of wastewater, an improvement was proposed for the classification scheme of water bodies used in standardizing discharges by enterprises of the pulp and paper industry. The new scheme of the typology of water bodies provides the possibility of switching to the use of unified standard mathematical models that effectively simulate the processes of pollutant transfer in aquatic environments of various types. This made it possible to significantly improve the accuracy of calculating the standard values of wastewater discharges at pulp and paper mills. In addition, specific types of water bodies receiving wastewater from large domestic enterprises of the pulp and paper industry and cardboard and printing products were identified. The study showed that the most significant factors are the nature of the water body and the features of the

wastewater discharge regime. Thus, each enterprise has the opportunity to choose an appropriate standardized mathematical model that provides an adequate description of the pollutant transfer process and an accurate assessment of the required level of wastewater dilution before they enter water bodies. This approach will ensure compliance with strict environmental standards and prevent further deterioration of the environment due to the production activities of pulp and paper industry enterprises.

Keywords: mathematical modeling, methodology for calculating the standard of permissible discharges, pulp and paper production, standard of permissible discharge, dilution rate.

МОЗГУШИН Максим Александрович – аспирант Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна. SPIN-код: 9757-0132. ORCID: 0009-0006-4577-0836.

198095, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: maxim120897@mail.ru

MOZGUSHIN Maksim A. – PhD student of the St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. SPIN-code: 9757-0132. ORCID: 0009-0006-4577-0836.

198095. Ivan Chernykh str. 4. St. Petersburg. Russia. E-mail: maxim120897@mail.ru

ЕПИФАНОВ Андрей Валерьевич – кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна. SPIN-код: 6689-6509. ORCID: 0000-0002-3429-9835.

198095, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: epifandr@yandex.ru

EPIFANOV Andrey V. – PhD (Technical), Associate Professor of the St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. SPIN-code: 6689-6509. ORCID: 0000-0002-3429-9835.

198095. Ivan Chernykh str. 4. St. Petersburg. Russia. E-mail: epi-fandr@yandex.ru

А.В. Артёмов, А.В. Вураско, А.Е. Шкуро, В.Г. Бурындина

ИССЛЕДОВАНИЕ САНИТАРНО-ХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ ПРОДУКТАМИ
БИОРАЗЛОЖЕНИЯ ПЛАСТИКА БЕЗ СВЯЗУЮЩЕГО
НА ОСНОВЕ НЕДРЕВЕСНОГО РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Введение. В настоящее время для получения древесно-композиционных материалов широко применяется сырье на основе древесины как в чистом исходном виде [Кулаженко и др., 2024; Horta et al., 2017], так и предварительно подготовленное и обработанное (термомодифицированное, ацетилированное, озонированное и пр.) [Аникеева, Сафин, 2024; Прокопьев и др., 2024; Rozman et al., 1997].

Анализ литературных данных свидетельствует о высоком потенциале применения древесных отходов в виде опилок с целью получения иных материалов и изделий на их основе с широким кругом потребительских возможностей [Дворянкин и др., 2024; Лаврентьев и др., 2024].

Альтернативным ресурсом для получения композиционных материалов в полном объеме может выступать сырье различных недревесных растений в виде порубочных остатков, биомассы, лузги, шелухи и проч. [Мичуров и др., 2024; Подденежный и др., 2024; Радайкина и др., 2024; Zykova et al., 2021].

Приобретает актуальность и представляет практический интерес получение композиционных материалов и изделий на их основе из недревесного растительного сырья без применения связующих веществ [Ершова и др., 2023; Artemov et al., 2023]. Данные композиционные материалы – пластики без применения синтетических связующих веществ (ПБС) – получаются из растительного недревесного сырья природного происхождения путем его пьезотермической обработки.

Так, например, в работах [Савиновских и др., 2014; Бурындина и др., 2016] неизмельчённая шелуха пшеницы и овса с добавлением активатора из смеси пероксида водорода и марганецодержащего ванадомолибдофосфата натрия была использована для получения ПБС методом компрессионного прессования в закрытых пресс-формах. Применение данного активатора при получении ПБС из рассматриваемых растительных остатков

обеспечивает получение более высоких значений прочности при изгибе и ударной вязкости этих материалов по сравнению с ПБС, полученными из древесных (сосновых) опилок.

В работе [Ершова и др., 2020а] представлены результаты изучения влияния технологических факторов при получении растительного пластика на основе шелухи проса (*Panicum miliaceum* L.) и оценка его физико-механических свойств. На основании испытаний на биостойкость был сделан вывод о возможной эксплуатации исследуемых материалов в местах, подверженных биологической деградации, только после соответствующей антисептической обработки.

В другом исследовании [Ершова и др., 2020б] были изучены физико-механические свойства (показатели водостойкости и прочностные показатели) ПБС на основе биомассы борщевика Сосновского. По результатам выполненной работы был сделан вывод, что физико-механические свойства ПБС, полученного из пресс-сырья на основе биомассы борщевика Сосновского, не уступают, а по некоторым показателям даже и превосходят свойства ПБС, полученного из традиционного древесного пресс-сырья.

В продолжение работ по применению биомассы борщевика был исследован процесс предварительной щелочной обработки исходного пресс-сырья с целью химической активации лигнин-углеводного комплекса [Артёмов и др., 2023а]. Было установлено, что из биомассы борщевика, подверженного щелочной обработке, можно получать изделия повышенной прочности с низкой водостойкостью.

Аналогичное исследование по щелочной обработке исходного растительного сырья было выполнено для ПБС на основе шелухи риса [Артёмов и др., 2023б]. На основании экспериментальных данных сделаны выводы о влиянии на формирование материалов на основе ПБС самой структуры исходного пресс-сырья, подверженного щелочной обработке. Результаты проведенных исследований свидетельствуют, что из растительного сырья, подверженного щелочной обработке, можно получать изделия повышенной прочности с низкой водостойкостью, которая обуславливает подверженность деструкции.

Таким образом, композиты на основе ПБС относятся к деструктируемым материалам в естественных условиях окружающей природной среды и обладающим биоразлагаемым потенциалом, который подвержен регуляции за счет оптимизации технологии получения или использования различных химических добавок.

Стоит отметить, что в настоящее время благодаря высокому техногенному воздействию на окружающую среду наблюдается загрязнение потенциального растительного сырья [Вураско и др., 2021; Анищенко и др., 2022].

Сообщается [Артёмов и др., 2022], что при выдержке образцов ПБС на основе растительного сырья в виде костры конопли, листового опада и биомассы борщевика в почвогрунте происходит изменение pH почвенной среды. Показатель pH почвы в выполненном исследовании варьировался от 5,12 до 6,57 за 90 суток выдержки. Изменение pH почвы наблюдалось в разной степени в первые 30 суток выдержки у всех образов ПБС, что говорит об интенсивных процессах миграции химических веществ из материалов на основе ПБС.

Возможная загрязненность растительного сырья может быть причиной химического поражения почв при деструкции исследуемых биоразлагаемых материалов на основе ПБС.

Цель и задачи. Цель данной работы – получение ПБС на основе растительного сырья в виде шелухи риса и шелухи пшеницы методом пьезотермической обработки в герметичной пресс-форме и их испытание на биоразлагаемость по отношению к почвогрунту с последующей оценкой уровня химического загрязнения почв продуктами деструкции ПБС.

Задачи данной работы состояли в изучении физико-механических показателей полученных ПБС, оценке биодеструкции полученных ПБС по отношению к почвогрунту, определении санитарно-химических показателей загрязнения почв продуктами биоразложения ПБС.

Методика исследования. Объектом исследования были образцы ПБС на основе растительных вторичных ресурсов в виде шелухи риса и шелухи пшеницы.

Неизмельчённая шелуха риса и пшеницы была предоставлена учебно-опытным хозяйством Уральского государственного аграрного университета (г. Екатеринбург).

Шелуха промывалась холодной водой для удаления пыли и минеральных примесей и высушивалась при комнатной температуре. Далее сырье измельчалось в лабораторной мельнице и фракционировалось на сите. Для исследований принималась фракция частиц 0,7–1,2 мм.

У измельченного пресс-сырья было определено содержание лигнина (ГОСТ 11960-79 «Полуфабрикаты волокнистые и сырье из однолетних растений для целлюлозно-бумажного производства. Метод определения

лигнина»), целлюлозы (по методу Кюршнера-Хоффера), экстрактивных веществ (по методу ТАРРІТ-5-59) и минеральных веществ (ГОСТ Р 56881-2016 «Биомасса. Определение зольности стандартным методом»).

Были изготовлены образцы-диски диаметром 90 мм и толщиной 2 мм методом горячего компрессионного прессования при следующих условиях: давление прессования – 40 МПа, температура прессования – 170 °C, продолжительность прессования – 10 мин, продолжительность охлаждения под давлением – 10 мин. Влажность исходного сырья – 12%.

По завершении кондиционирования полученных образцов в комнатных условиях (24 ч) подвергались испытаниям их физико-механические свойства: плотность и прочность при изгибе (ГОСТ 4648-2014), твердость по вдавливанию шарика (ГОСТ 4670-2015), модуль упругости при изгибе по прогибу образца-диска [Артёмов и др., 2021], водопоглощение по объему и разбухание по толщине за 24 ч (ГОСТ 4650-2014), угол смачивания [Мичуров и др., 2024].

Для оценки биостойкости исследуемого материала применялась методика на основе ГОСТ Р 57222-2016 «Пластмассы. Методы приготовления образцов для испытания пластмасс на биологическое разложение», которая включала следующие этапы:

1. Подготовка образцов с геометрическими размерами 2,5 x 2,5 x 2 см. Определение линейных размеров и массы, морфологических характеристик (внешний вид лицевой поверхности и бокового среза);

2. Подготовка почвогрунта (согласно ГОСТ Р 57226-2016 «Пластмассы. Определение степени разложения в установленных условиях компостирования в процессе пробных испытаний») на основе рассадного почвенного субстрата (ТУ 0392-001-59264050-03) и компоста (ТУ 0392-001-59264059-03). Достигалась влажность почвенного компоста в 60%, которая поддерживалась на данном уровне на протяжении всего испытания;

3. Выдержка образцов в контейнерах с почвенной средой. Контейнеры на время испытания находились при температуре окружающей среды 20 ± 2 °C;

4. Микроскопирование и оценка степени биоразлагаемости по характерным морфологическим признакам [Артемов и др., 2024] по завершении наблюдений (общее время выдержки в почвогрунте составило 84 суток);

5. Определение уровня химического загрязнения почв продуктами деструкции ПБС (согласно СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»).

При оценке экологической опасности почвенных аномалий принимаются во внимание не только их интенсивность, но и элементный состав, в первую очередь, присутствие элементов, относимых к I и II классам гигиенической опасности в соответствии с ГОСТ Р 70281-2022 «Охрана окружающей среды. Почвы. Классификация химических веществ»: I класс – мышьяк (As), ртуть (Hg), кадмий (Cd), свинец (Pb), цинк (Zn); II класс – никель (Ni), медь (Cu).

Основными показателями, характеризующими степень загрязнения почв, являются коэффициент концентрации (K_c) и суммарный показатель концентрации (Z_c).

Коэффициент концентрации (K_c) – безразмерная величина, характеризующая степень загрязнения почвы каким-либо одним химическим элементом и показывающая, во сколько раз содержание элемента-загрязнителя в пробе выше его фонового природного аналога. Расчет коэффициента концентрации проводится по формуле (1):

$$K_c = C_i / C_\phi, \quad (1)$$

где C_i – содержание элемента в исследуемом образце, мг/кг; C_ϕ – фоновое содержание, мг/кг.

В качестве фонового загрязнения почвогрунта принимались данные по исходному содержанию в почвогрунте исследуемых химических веществ (контроль).

Определение валового содержания тяжелых металлов I и II класса и мышьяка осуществлялось по методике РД 52.18.685-2006 «Методические указания. Определение массовой доли металлов в пробах почв и донных отложений. Методика выполнения измерений методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии», ПНД Ф 16.1:2.2:3.17-98 «Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовой доли (валового содержания) мышьяка и сурьмы в твердых сыпучих материалах атомно-абсорбционным методом с предварительной генерацией гидридов» на атомно-абсорбционном спектрометре «КВАНТ-2», ПНД Ф 14.1:2:3.172-2000 «Методика выполнения измерений массовой доли общей ртути в пробах почв и грунтов на анализаторе ртути РА-915+ с приставкой РП-91С» на приборе «Анализатор ртути РА-915+».

Величины допустимых уровней содержания тяжелых металлов и мышьяка (ПДК/ОДК) приняты согласно СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». Используемый для исследо-

ваний почвогрунт, состоящий из рассадного почвенного субстрата и компоста на основе навоза крупного рогатого скота, по составу и морфологическим характеристикам можно отнести к дерново-подзолистым суглинистым и глинистым типам почв. Показатели ПДК/ОДК химических веществ в почве приняты для данного типа почв в зависимости от их величины рН солевой вытяжки (рН KCl > 5,5).

Обычно зоны технического загрязнения представляют собой избыточную концентрацию не одного, а целого комплекса химических элементов. Их суммарное содержание, характеризующее интегральное воздействие на окружающую среду, оценивается по величине суммарного показателя концентрации (Z_c), который представляет собой сумму превышений над фоновым уровнем накапливающихся элементов и является индикатором неблагоприятного воздействия на здоровье населения, и рассчитываются по формуле (2):

$$Z_c = \Sigma (KC_i + \dots + KC_n) - (n - 1), \quad (2)$$

где n – число определяемых компонентов; KC_i – коэффициент концентрации i -го загрязняющего компонента, равный кратности превышения содержания данного компонента над фоновым значением.

Для оценки категории загрязнения почвогрунтов и расчета Z_c для обобщенной оценки принимались во внимание справочные материалы согласно приложению Д «Ориентировочные значения фоновых концентраций химических элементов в почвах» по СП 502.1325800.2021 «Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ» (применение данного документа носит информационно-справочный характер с целью всесторонней оценки экологических условий, а также составления прогноза возможных изменений этих условий).

Результаты всех испытаний были подвергнуты статистической обработке для выявления грубых промахов и определения доверительных границ погрешности (при доверительной вероятности 0,95) [Глухих и др., 2023].

Результаты и обсуждение. Результаты исследования химико-физических характеристик исходного растительного пресс-сырья представлены в табл. 1.

Содержание в растительном сырье лигнина и целлюлозы, а также их соотношение обуславливают как возможность получения самого материала на основе ПБС, так и его физико-механические свойства.

Таблица 1

Характеристика исходного пресс-сырья

Characteristics of the initial press raw materials

№ п/п	Характеристика	Шелуха пшеницы	Шелуха риса
3	Фракция пресс-сырья, мм	0,7÷1,2	0,7÷1,2
4	Влажность пресс-сырья, %	12±0,1	12±0,1
5	Содержание лигнина, %	21,2±0,2	20,8±0,2
6	Содержание целлюлозы, %	21,0±1,0	34,0±1,0
7	Содержание экстрактивных веществ, %	3,8±0,5	4,2±0,5
8	Зольность, %	4,5±0,1	12,3±0,1
9	pH солевой вытяжки ($\pm\Delta$)	5,6±0,1	5,6±0,1

В ранее выполненных исследованиях [Минин, 1965; Плитные..., 1976] было высказано предположение, что при образовании таких материалов из растительного сырья как древесного, так и недревесного происхождения, в условиях его пьезотермической обработки, целлюлоза выступает в качестве наполнителя и армирующего элемента. Она связывается в монолитный материал за счет лигнина, который преобразуется в естественную термореактивную смолу. Недостаточное или избыточное содержание целлюлозы или лигнина оказывается на самом механизме образования ПБС, а также предопределяет его физико-механические свойства.

Установленное содержание лигнина в исследуемом пресс-сырье (более 20%) обуславливает возможность получения ПБС [Glukhikh et al., 2020]. Однако в пресс-материале в виде шелухи риса наблюдается смещение соотношения «лигнин – целлюлоза» в сторону увеличения содержания последней. Высокое содержание целлюлозы в пресс-сыре может быть причиной низкой водостойкости материала и значительной подверженности биодеструкции [Артемов и др., 2024].

Также необходимо отметить относительно высокое содержание минеральных веществ (зольность) в исходном сырье в виде шелухи риса, которое обусловлено в первую очередь содержанием диоксида кремния [Вурако и др., 2015]. Наличие труднорастворимых соединений в пресс-массе в момент прессования приводит к увеличению коэффициента трения между частицами, препятствуя заполнению пространства между ними, а также

сближению частиц и их взаимному притяжению и, как следствие, приводит к снижению прочностных свойств и показателей водостойкости получаемого материала.

Установленный показатель pH рассматриваемого пресс-сырья относится к слабокислой среде, которая обуславливает гидролизацию кислотами частиц сырья, что приводит к повышению текучести пресс-материала [Минин, 1965; Плитные..., 1976]. Пресс-сырье с низкой текучестью в силу структурных особенностей медленнее прогревается, менее уплотняется и, как следствие, плотность материала, а соответственно и его прочностные показатели, получается невысокой. Кроме того, наличие более кислой среды способствует интенсификации процессов поликонденсации и полимеризации растительного сырья при пьезотермической обработке.

Результаты микрофотографирования исходного пресс-сырья представлены на рис. 1.

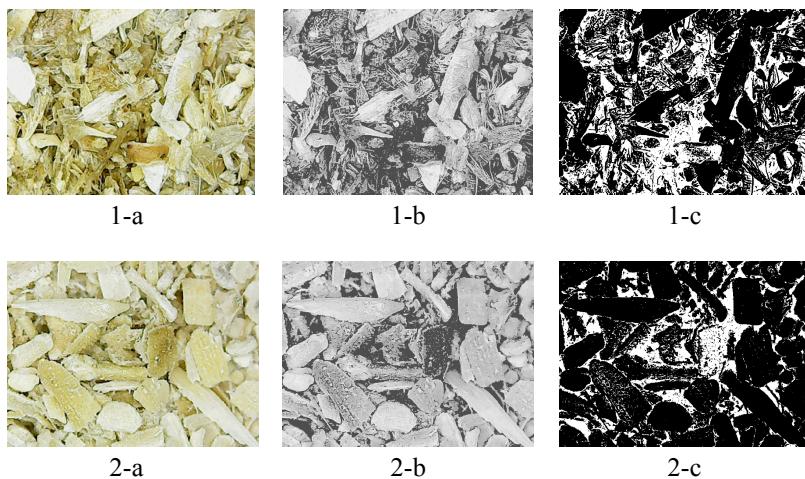


Рис. 1. Микрофотографии пресс-сырья (1×400): 1 – шелуха пшеницы, 2 – шелуха риса; а) цветное; б) серое; в) бинарное изображение

Fig 1. Micrographs press raw materials (1×400): 1 – wheat husk, 2 – rice husk; a) color; b) gray; c) binary image

Визуальный анализ изучаемого пресс-сырья (рис. 1) позволяет говорить о том, что в результате его фракционирования образуются частицы, у которых преобладают игольчатая и волокнистая формы. В большей степени такая форма частиц характерна для шелухи риса. При этом у данного сырья образуются и более крупные частицы.

Форма и размер таких частиц при горизонтальном ориентировании (компрессионное прессование осуществляется с вертикальным усилием) позволяют получать слоистый материал. Основным отличием слоистых композиционных материалов является анизотропность физико-механических свойств. Формируемая структура материала обуславливает высокие пластинчато-прочностные свойства (по длине образуется монолитный материал) и низкие показатели водостойкости из-за несплошности внутренней структуры.

Результаты испытаний на физико-механические свойства образцов ПБС представлены в табл. 2.

*Таблица 2***Физико-механические свойства (средние показатели) образцов ПБС****Physical and mechanical properties (average values) of PWR samples**

№	Физико-механические свойства	Шелуха пшеницы	Шелуха риса
1	Плотность, кг/м ³	1015±17	1180±56
2	Модуль упругости при изгибе (по прогибу образца диска), МПа	335±15	2386±26
3	Твердость по вдавливанию шарика, МПа	16,3±1,3	80,5±1,5
4	Число упругости, %	43±2	88±4
5	Водопоглощение по объему за 24 часа, %	69±8	119±11
6	Разбухание по толщине за 24 часа, %	7,2±0,4	14,6±0,3
5	Краевой угол смачивания, °	61±1	62±1

ПБС на основе шелухи риса обладают более высокими пластинчато-прочностными свойствами, а ПБС на основе шелухи пшеницы – показателями водостойкости. Это подтверждает высказанные выше положения о влиянии свойств растительного сырья (прежде всего химического состава) и способов его подготовки (фракционирования) на ПБС.

Результаты фото- и микрофотографирования образцов ПБС при испытаниях на биоразлагаемость представлены на рис. 2.

Результаты испытаний на биоразлагаемость показали, что определение количественных характеристик маркерных показателей биоразлагаемости на конец испытаний не представлялось возможным: образцы полностью деструктировали в почвогрунте за 84 суток (рис. 2). Оценка степени биоразлагаемости ПБС по каждому показателю в таком случае принималась максимальной [Артемов и др., 2024], а исследуемые образцы ПБС были отнесены к полностью биоразлагаемым материалам.

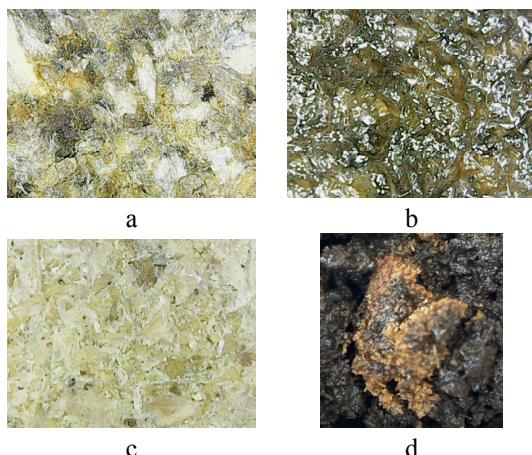


Рис. 2. Фото- и микрофотографии (1×400) ПВС:
а) лицевая поверхность образца ПВС на шелухе пшеницы до испытаний; б) лицевая поверхность образца ПВС на шелухе пшеницы после 30 суток испытаний; в) лицевая поверхность образца ПВС на шелухе риса до испытаний; г) образец ПВС на шелухе риса после 84 суток испытаний

Fig. 2. Photo and micrographs (1×400) of PWR:
a) front surface of PWR sample on wheat husk before testing;
b) front surface of PWR sample on wheat husk after 30 days of testing;
c) front surface of PWR sample on rice husk before testing;
d) PWR sample on rice husk after 84 days of testing

Результаты эколого-геохимического исследования почв при испытаниях ПВС на биоразлагаемость, а также результаты расчетов суммарного показателя химического загрязнения представлены в табл. 3.

В рассматриваемом растительном сырье выявлены тяжелые металлы: свинец, кадмий, цинк, – а также медь и мышьяк (только в шелухе пшеницы) и ртуть (в шелухе риса). При сравнении содержания химических загрязнителей по разным видам сырья отмечается наибольшая степень загрязненности шелухи пшеницы. В других ранее выполненных работах отмечается сильная подверженность загрязнению газопылевыми выбросами сельскохозяйственных земель, что сказывается на содержании и накоплении тяжелых металлов в сельскохозяйственных растениях, в том числе в соломе пшеницы [Самусик, Головатый, 2021]. [Соколова и др., 2006] делают заключение, что первоначальное загрязнение растений происходит

через почву. Южные районы страны, связанные с выращиванием риса, менее подвержены техногенному воздействию в отличие от районов с высокой степенью нагрузки на окружающую природную среду, используемых для культивирования пшеницы.

Таблица 3

Результаты расчетов суммарного показателя химического загрязнения исследуемого почво-грунта

The results of calculations of the total indicator of chemical pollution of the studied soil

Показатель	Содержание, мг/кг					
	ПДК (ОДК)	Сырье	Пластик	Грунт (фоновый)	Грунт после испытаний	
pH	5,5–8,2	5,6±0,1	5,1±0,2	5,8±0,1	6,4±0,1	
		5,6±0,1	5,4±0,2		6,5±0,1	
Pb	130	0,65±0,20	0,0	< 20	6,0±1,8	
		0,37±0,11	0,0		5,1±1,8	
Cd	2,0	0,15±0,05	0,10±0,03	неопред,	< 0,1	
		0,35±0,11	<0,10±0,03		< 0,1	
Zn	220	28±8	68±20	49±15	85±26	
		31±9	10±3		68±20	
Cu	132	6,6±2	7,0±2	23±7	20±6	
		< 5	< 5		15±4	
Hg	2,1	< 0,005	0,0012±0,005	0,034±0,015	0,056±0,025	
		0,010±0,005	0,021±0,009		0,044±0,020	
Ni	80,0	< 10	4,1±1,2	72±25	65±31	
		< 10	1,8±0,53		61±18	
As	10,0	< 0,20	< 0,20	5,1±3,0	5,3±3,2	
		0,20±0,12	< 0,20		4,5±2,7	
Z _c				1,82	1,95	
					1,70	
Категория загрязнения почв			«допустимая»	«допустимая»	«допустимая»	

Примечание: В верхней части спаренных строк представлены данные по шелухе пшеницы, в нижней – по шелухе риса

Анализируемые тяжелые металлы и мышьяк относятся к легко поглощаемым самими растениями и имеют среднюю степень биоаккумуляции [Соколова и др., 2006]. Наличие исследуемых неорганических веществ в растительном сырье обусловлено, скорее всего, высокой сорбционной способностью почв и высокой степенью их антропогенной «металлизации» [Алексеенко, Алексеенко, 2013]. Однако в большинстве случаев загрязнение культурных растений не превышает установленных санитарно-гигиенических нормативов.

Наблюдается изменение концентрации тяжелых металлов и мышьяка в готовых образцах ПБС (следует подчеркнуть, что представленные результаты выходят за рамки применяемой методологии исследования и приведены исключительно для наглядности). Можно говорить о том, что процессы образования ПБС при пьезотермической обработке оказывают влияние на распределение химических компонентов в готовом материале (за счет различной растворимости и химико-физической активности). Это обуславливает необходимость выборочного контроля за содержанием тяжелых металлов и мышьяка получаемых изделий.

Отмечается также изменение показателя pH, по которому можно косвенно судить о миграции загрязняющих веществ из материала в почвенный покров, а также о типе протекающего процесса деструкции материала. К концу испытания показатель pH изменяется от слабокислого до практически нейтрального. Это говорит о том, что наблюдается протекание процессов гидролитической деструкции ПБС, что подтверждается микрофотографиями его лицевой поверхности (рис. 2б) – наличие ослизненной пористой структуры в виде губки.

В соответствии с полученными значениями химического загрязнения почвы по каждому элементу-загрязнителю были рассчитаны значения коэффициентов концентрации токсичных элементов, демонстрирующие, какие из токсических элементов имеют (не имеют) концентрации выше фоновых. Превышений ПДК (ОДК) по содержаниям элементов-загрязнителей I и II класса не зафиксировано.

Рассчитанный суммарный показатель концентрации (загрязнения) почвы по всем пробам не превышает пороговый уровень ($Z_c < 16$) по исследуемым 7 токсичным показателям, следовательно, категория загрязнения почвы согласно СанПиН 1.2.3685-21 – «допустимая».

Выходы. В соответствии с поставленной целью исследования были получены образцы ПБС на основе шелухи риса и шелухи пшеницы путем пьезотермической обработки в герметичной пресс-форме. Полученные образцы прошли испытания на биоразлагаемость по отношению к поч-

вогрунту, после чего был проведен анализ уровня химического загрязнения почвы в результате их деструкции.

В результате комплексной оценки уровня химического загрязнения почвогрунтов продуктами деструкции биоразлагаемого композиционного материала без связующего на основе растительного сырья категория загрязнения исследованной почвы была отнесена к «допустимой».

В соответствии с СанПиНом 2.1.3684-21 «Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организаций и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий» почвы с категорией «допустимая» могут быть использованы без ограничений и под любые культуры растений.

Основной вклад в общий уровень загрязнения почвы продуктами биоразложения ПБС оказывает существующее фоновое загрязнение самого почвенного субстрата, а ожидаемые уровни воздействия продуктов деструкции будет оказывать воздействие на окружающую природную среду в пределах требований, установленных природоохранным и санитарно-гигиеническим законодательством согласно СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

Учитывая высокий уровень антропогенного воздействия на окружающую среду, применение изделий на основе растительного сырья в качестве биоразлагаемых материалов требует проведения всесторонней оценки самого исходного сырья, а также контроля качества получаемых материалов и изделий на их основе. При этом необходимо учитывать существующее химическое загрязнение почв (в первую очередь тяжелыми металлами) в предполагаемых районах применения продукции на основе исследуемых материалов.

Также необходимо отметить, что согласно существующим российским нормативно-правовым актам в настоящее время к биоразлагаемым материалам отнесены только изделия из материалов на основе целлюлозы (такие, как бумага, картон) и натуральных материалов (в виде хлопчатобумажной тканей и других естественных волокон). Расширение списка биоразлагаемых материалов с включением в него композитов на основе различного растительного сырья позволит инициировать разработку регламента по обязательному проведению мониторинга содержания химических веществ на всех стадиях обработки сырья и получения материала.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Алексеенко В.А., Алексеенко А.В. Химические элементы в геохимических системах. Кларки почв селитебных ландшафтов: монография. Ростов н/Д: Южный федеральный университет, 2013. 388 с.

Аникеева К.Г., Сафин Р.Р. Влияние двухступенчатой обработки наполнителя на свойства древесно-полимерного композита // Аграрный научный журнал. 2024. № 6. С. 88–98. DOI: 10.28983/asj.y2024i6pp88-98.

Анищенко Л.Н., Потепай С.Н., Капошко С.Н. Ресурсные и эколого-химические показатели луговых лекарственных растений среднего Подесенья // Агроэкологические аспекты устойчивого развития АПК: мат. XIX межд. науч. конф. Брянск, 2022. Том I. С. 210–223.

Артёмов А.В., Савиновских А.В., Бурындин В.Г. Модуль упругости при изгибе как показатель физико-механических свойств древесных пластиков без добавления связующих // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 1(49). С. 67–71. DOI: 10.18324/2077-5415-2021-1-67-71.

Артёмов А.В., Ершова А.С., Савиновских А.В., Бурындин В.Г. Оценка воздействия биоразлагаемых материалов на основе растительного недревесного сырья на элементы окружающей среды // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2022. № 1(45). С. 5–20. DOI: 10.15593/2409-5125/2022.1.01.

Артёмов А.В., Вурако А.В., Ершова А.С., Бурындин В.Г. Влияние щелочной обработки пресс-сырья на свойства пластика без связующего на основе растительных остатков борщевика Сосновского // Вестник Технологического университета. 2023а. Т. 26, № 3. С. 44–49. DOI: 10.55421/1998-7072_2023_26_3_44.

Артёмов А.В., Вурако А.В., Ершова А.С. Исследование влияния предварительной химической обработки исходного пресс-сырья для получения пластика без связующего на основе шелухи риса // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2023б. № 1. С. 61–76. DOI: 10.15593/2224-9400/2023.1.05.

Артёмов А.В., Ершова А.С., Шкуро А.Е., Бурындин В.Г. Методика для оценки степени биоразлагаемости пластиков на основе лигноцеллюлозосодержащего сырья без добавления связующих веществ // Лесотехнический журнал. 2024. Т. 14, № 1(53). С. 134–150. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2024.1/8.

Бурындин В.Г., Савиновских А.В., Глухих В.В., Кривоногов П.С. Получение пластиков из растительных отходов // XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии: тез. докл. в пяти т. Екатеринбург, 2016. Том 2б. С. 243.

Вурако А.В., Шаповалова И.О., Петров Л.А., Стоянов О.В. Применение плодовых оболочек риса в качестве углерод-кремнеземных пористых материалов для каталитических систем (обзор) // Вестник Технологического университета. 2015. Т. 18, № 11. С. 49–56.

Вураско А.В., Первова И.Г., Шаповалова И.О. Содержание металлов в биомассе растений и в материалах на их основе // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2021. Вып. 234. С. 250–266. DOI: 10.21266/2079-4304.2021.234.250-266.

Глухих В.В., Шкуро А.Е., Артемов А.В., Шишилов О.Ф., Кривоногов П.С. Математическое планирование экспериментов и анализ их результатов с применением компьютерных программ: учеб. пособ. Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2023. 104 с.

Дворянкин Д.Ю., Сафонова М.Е., Клепалова И.А., Первова И.Г. Углеродные сорбенты на основе древесных и растительных отходов // Леса России и хозяйство в них. 2024. № 1(88). С. 171–180.

Ериова А.С., Савиновских А.В., Васильева А.А., Артемов А.В. Растительные пластики на основе шелухи проса // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2020а. № 3(47). С. 39–48. DOI: 10.25686/2306-2827.2020.3.39.

Ериова А.С., Савиновских А.В., Артемов А.В., Бурындин В.Г. Борщевик Сосновского как сырье для получения пластиков // Вестник Технологического университета. 2020б. Т. 23, № 10. С. 34–37.

Ериова А.С., Савиновских А.В., Артемов А.В., Бурындин В.Г., Садыкова К.В. Получение и исследование свойств пластика без связующего на основе волокна конопли технической // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2023. № 2. С. 5–16. DOI: 10.25686/2542-114X.2023.2.5.

Кулаженко Ю.М., Шкуро А.Е., Глухих В.В. Исследование физико-механических свойств композитов на основе пластифицированного ПВХ и сосновых опилок // Деревообрабатывающая промышленность. 2024. № 2. С. 50–59.

Лаврентьев И.В., Гедьо В.М., Симонова Е.И., Демьянцева Е.Ю. Исследование влияния факторов на водопоглощение целлюлозного композита // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 248. С. 317–328. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.248.317-328.

Минин А.Н. Технология пьезотермопластиков. М.: Лесная промышленность, 1965. 296 с.

Мичуров Д.М., Шкуро А.Е., Глухих В.В. Исследование физико-механических свойств композитов с полимерной фазой полилактида и кострой конопли // Вестник Технологического университета. 2024. Т. 27, № 1. С. 59–63. DOI: 10.55421/1998-7072_2024_27_1_59.

Плитные материалы и изделия из древесины и других одревесневших остатков без добавления связующих. М.: Лесная промышленность, 1976. 360 с.

Подденежный Е.Н., Дробышевская Н.Е., Бойко А.А., Шаповалов В.М., Кузьмин А.М. Биоразлагаемые композиционные материалы на основе поликапролактона с наполнением соломой зерновых культур // Вестник Гомельского государ-

ственного технического университета им. П.О. Сухого. 2024. № 2(97). С. 27–33. DOI: 10.62595/1819-5245-2024-2-27-33.

Прокопьев А.А., Галяветдинов Н.Р., Сафин Р.Р. Эксплуатационные характеристики древесно-полимерных композитов на основе ацетилированного древесного наполнителя // ИВУЗ. Лесной журнал. 2024. № 4. С. 147–158. DOI: 10.37482/0536-1036-2024-4-147-158.

Радайкина Е.А., Кузьмин А.М., Конаков А.В. Влияние лузги подсолнечника на свойства пленок поливинилового спирта // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2024. Т. 14, № 1. С. 73–76.

Савиновских А.В., Бурындин В.Г., Стоянов О.В., Ахтямова С.С., Масленникова Е.В. Закономерности образования растительных пластиков на основе шелухи пшеницы без добавления связующих // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17, № 13. С. 231–233.

Самусик Е.А., Головатый С.Е. Тяжелые металлы в почвах и в растениях пшеницы в зоне воздействия предприятия по производству строительных материалов // Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2021. № 4. С. 76–88. DOI: 10.46646/2521-683X/2021-4-76-88.

Соколова О.Я., Стряпков А.В., Антимонов С.В., Соловых С.Ю. Тяжелые металлы в системе элемент – почва – зерновые культуры // Вестник Оренбургского государственного университета. 2006. № 4(54). С. 106–110.

Artemov A.V., Buryndin V.G., Krivonogov P.S., Savinovskikh A.V., Kolpakova M.V., Stoyanov O.V. An Investigation of Complexes of Lignin Found in Plant Raw Materials as a Natural Binder in Obtaining Plastic in Closed Molds // Polymer Science. Series D. 2023. Vol. 16, no. 2. P. 278–284. DOI: 10.1134/s1995421223020028.

Glukhikh V.V., Buryndin V.G., Artyemov A.V., Savinovskikh A.V., Krivonogov P.S., Krivonogova A.S. Plastics: physical-and-mechanical properties and biodegradable potential // Foods and Raw Materials. 2020. Vol. 8, no. 1. P. 149–154. DOI: 10.21603/2308-4057-2020-1-149-154.

Horta J.F., Simões F.J., Mateus A. Study of Wood-Plastic Composites with re-used High Density Polyethylene and Wood Sawdust // Procedia Manufacturing. 2017. Vol. 12. P. 221–229.

Rozman H.D., Kumar R.N., Khalil H.P.S.A., Abusamah A., Abu R. Chemical Modification of Wood with Maleic Anhydride and Subsequent Copolymerization with Diallyl Phthalate // Journal of Wood Chemistry and Technology. 1997. Vol. 17, iss. 4. P. 419–433. DOI: 10.1080/02773819708003142.

Zykova A.K., Pantyukhov P.V., Mastalygina E.E., Chaverri-Ramos C., Nikolaeva S.G., Saavedra-Arias J.J., Popov A.A., Wortman S.E., Poletto M. Biocomposites of low-density polyethylene plus wood flour or flax straw: Biodegradation kinetics across three environments // Polymers. 2021. Vol. 13, no. 13. Art. no. 2138. DOI: 10.3390/polym13132138.

References

- Alekseenko V.A., Alekseenko A.V. Chemical elements in geochemical systems. Clarks of soils of residential landscapes: monograph. Rostov-on-Don: Southern Federal University, 2013. 388 p. (In Russ.)
- Anikeeva K.G., Safin R.R. The effect of two-stage filler processing on the properties of a wood-polymer composite. *Agrarian Scientific Journal*, 2024, no. 6, pp. 88–98. DOI: 10.28983/asj.y2024i6pp88-98. (In Russ.)
- Anishchenko L.N., Potsepai S.N., Kaposhko N.A. Resource and ecological-chemical indicators of meadow medicinal plants of the middle forest. *Agroecological aspects of sustainable development of the agro-industrial complex*: proceedings of the XIX int. sci. conf. Bryansk, 2022, vol. 1, pp. 210–223. (In Russ.)
- Artyomov A.V., Savinovskikh A.V., Buryndin V.G. Modulus of elasticity in bending as an indicator of the physico-mechanical properties of wood plastics without the addition of binders. *Systems. Methods. Technologies*, 2021, no. 1(49), pp. 67–71. DOI: 10.18324/2077-5415-2021-1-67-71. (In Russ.)
- Artyomov A.V., Ershova A.S., Savinovskikh A.V., Buryndin V.G. Assessment of the impact of biodegradable materials based on non-wood plant raw materials on environmental elements. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Applied ecology. Urbanistics*, 2022, no. 1(45), pp. 5–20. DOI: 10.15593/2409-5125/2022.1.01. (In Russ.)
- Artemov A.V., Buryndin V.G., Krivonogov P.S., Savinovskikh A.V., Kolpakova M.V., Stoyanov O.V. An Investigation of Complexes of Lignin Found in Plant Raw Materials as a Natural Binder in Obtaining Plastic in Closed Molds. *Polymer Science. Series D*, 2023, vol. 16, no. 2, pp. 278–284. DOI: 10.1134/s1995421223020028.
- Artyomov A.V., Vurasko A.V., Ershova A.S., Buryndin V.G. The influence of alkaline processing of press raw materials on the properties of plastic without a binder based on plant residues of Sosnowsky's hogweed. *Bulletin of the Technological University*, 2023a, vol. 26, no. 3, pp. 44–49. DOI: 10.5542/1998-7072_2023_26_3_44. (In Russ.)
- Artyomov A.V., Vurasko A.V., Ershova A.S. Investigation of the effect of preliminary chemical treatment of the initial press raw materials for the production of plastic without a binder based on rice husk. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Chemical technology and biotechnology*, 2023b, no. 1, pp. 61–76. DOI: 10.15593/2224-9400/2023.1.05. (In Russ.)
- Artemov A.V., Ershova A.S., Shkuro A.E., Buryndin V.G. A methodology for assessing the degree of biodegradability of plastics based on lignocellulose-containing raw materials without the addition of binders. *Forestry Journal*, 2024, vol. 14, no. 1(53), pp. 134–150. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2024.1/8 (In Russ.)
- Buryndin V.G., Savinovskikh A.V., Glukhikh V.V., Krivonogov P.S. Obtaining plastics from plant waste. *XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: abstracts in five volumes. Yekaterinburg, 2016, vol. 2b, p. 243. (In Russ.)

Dvoryankin D.Y., Safonova M.E., Klepalova I.A., Pervova I.G. Carbon sorbents based on wood and plant waste. *Forests of Russia and their management*, 2024, no. 1(88), pp. 171–180. (In Russ.)

Ershova A.S., Savinovskikh A.V., Vasilyeva A.A., Artemov A.V. Plant plastics based on millet husk. *Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Forest. Ecology. Environmental management*, 2020a, no. 3(47), pp. 39–48. DOI: 10.25686/2306-2827.2020.3.39. (In Russ.)

Ershova A.S., Savinovskikh A.V., Artemov A.V., Buryndin V.G. Sosnowsky's hogweed as a raw material for the production of plastics. *Bulletin of the Technological University*, 2020b, vol. 23, no. 10, pp. 34–37. (In Russ.)

Ershova A.S., Savinovskikh A.V., Artemov A.V., Buryndin V.G., Sadykova K.V. Obtaining and researching the properties of plastic without a binder based on technical hemp fiber. *Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Materials. Constructions. Technologies*, 2023, no. 2, pp. 5–16. DOI: 10.25686/2542-114X.2023.2.5. (In Russ.)

Glukhikh V.V., Buryndin V.G., Artyemov A.V., Savinovskikh A.V., Krivonogov P.S., Krivonogova A.S. Plastics: physical-and-mechanical properties and biodegradable potential. *Foods and Raw Materials*, 2020, vol. 8, no. 1, pp. 149–154. DOI: 10.21603/2308-4057-2020-1-149-154.

Glukhikh V.V., Shkuro A.E., Artemov A.V., Shishlov O.F., Krivonogov P.S. Mathematical planning of experiments and analysis of their results using computer programs: textbook. Yekaterinburg: Ural State Forestry University, 2023. 104 p. (In Russ.)

Horita J.F., Simões F.J., Mateus A. Study of Wood-Plastic Composites with reused High Density Polyethylene and Wood Sawdust. *Procedia Manufacturing*, 2017, vol. 12, pp. 221–229.

Kulazhenko Yu.M., Shkuro A.E., Glukhikh V.V. Investigation of the physico-mechanical properties of composites based on plasticized PVC and pine sawdust. *The woodworking industry*, 2024, no. 2, pp. 50–59. (In Russ.)

Lavrentiev I.V., Gedyo V.M., Simonova E.I., Demyantseva E.Y. Investigation of the influence of factors on the water absorption of a cellulose composite. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 248, pp. 317–328. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.248.317-328. (In Russ.)

Michurov D.M., Shkuro A.E., Glukhikh V.V. Investigation of the physico-mechanical properties of composites with a polymer phase of polylactide and hemp bark. *Bulletin of the Technological University*, 2024, vol. 27, no. 1, pp. 59–63. DOI: 10.55421/1998-7072_2024_27_1_59. (In Russ.)

Minin A.N. Technology of piezothermoplastics. Moscow: Forest industry, 1965. 296 p. (In Russ.)

Poddenezhny E.N., Drobyshevskaya N.E., Boyko A.A., Shapovalov V.M., Kuzmin A.M. Biodegradable composite materials based on polycaprolactone with

straw filling of grain crops. *Bulletin of the Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi*, 2024, no. 2(97), pp. 27–33. DOI: 10.62595/1819-5245-2024-2-27-33. (In Russ.)

Prokopyev A.A., Galyavetdinov N.R., Safin R.R. Operational characteristics of wood-polymer composites based on acetylated wood filler. *IVUZ. Forestry Journal*, 2024, no. 4, pp. 147–158. DOI: 10.37482/0536-1036-2024-4-147-158. (In Russ.)

Radaikina E.A., Kuzmin A.M., Konakov A.V. The influence of sunflower husks on the properties of polyvinyl alcohol films. *Izvestiya Kabardino-Balkarian State University*, 2024, vol. 14, no. 1, pp. 73–76. (In Russ.)

Rozman H.D., Kumar R.N., Khalil H.P.S.A., Abusamah A., Abu R. Chemical Modification of Wood with Maleic Anhydride and Subsequent Copolymerization with Diallyl Phthalate. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 1997, vol. 17, iss. 4, pp. 419–433. DOI: 10.1080/02773819708003142.

Samusik E.A., Golovaty S.E. Heavy metals in soils and in wheat plants in the impact zone of the enterprise for the production of building materials. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*, 2021, no. 4, pp. 76–88. DOI: 10.46646/2521-683X/2021-4-76-88. (In Russ.)

Savinovskikh A.V., Buryndin V.G., Stoyanov O.V., Akhtyamova S.S., Maslennikova E.V. Patterns of formation of plant plastics based on wheat husk without the addition of binders. *Bulletin of the Kazan Technological University*, 2014, vol. 17, no. 13, pp. 231–233. (In Russ.)

Slab materials and products made of wood and other desalinated residues without the addition of binders. Moscow: Forest industry, 1976. 360 p. (In Russ.)

Sokolova O.Ya., Stryapkov A.V., Antimonov S.V., Solovykh S.Yu. Heavy metals in the element – soil – grain crops system. *Bulletin of the Orenburg State University*, 2006, no. 4(54), pp. 106–110. (In Russ.)

Vurasko A.V., Pervova I.G., Shapovalova I.O. The content of metals in plant biomass and in materials based on them. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2021, iss. 234, pp. 250–266. DOI: 10.21266/2079-4304.2021.234.250-266. (In Russ.)

Vurasko A.V., Shapovalova I.O., Petrov L.A., Stoyanov O.V. The use of rice fruit shells as carbon-silica porous materials for catalytic systems (review). *Bulletin of the Technological University*, 2015, vol. 18, no. 11, pp. 49–56. (In Russ.)

Zykova A.K., Pantyukhov P.V., Mastalygina E.E., Chaverri-Ramos C., Nikolaeva S.G., Saavedra-Arias J.J., Popov A.A., Wortman S.E., Poletto M. Biocomposites of low-density polyethylene plus wood flour or flax straw: Biodegradation kinetics across three environments. *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 13, art. no. 2138. DOI: 10.3390/polym13132138.

Материал поступил в редакцию 20.10.2024

Артёмов А.В., Вурако А.В., Шкуро А.Е., Бурындина В.Г. Исследование санитарно-химических показателей загрязнения почв продуктами биоразложения пластика без связующего на основе недревесного растительного сырья // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 489–510. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.489-510

Цель настоящего исследования заключалась в получении пластика без связующего (ПБС) на основе растительных наполнителей недревесного происхождения в виде шелухи пшеницы и риса с использованием метода пьезотермической обработки в герметичной пресс-форме и выполнение испытаний на биоразлагаемость данных материалов в почвогрунте с последующей оценкой уровня химического загрязнения почв в результате их деструкции. Были изготовлены образцы ПБС на основе фракционированной шелухи пшеницы и риса. Образцы были получены путем компрессионного прессования в герметичной пресс-форме под давлением 40 МПа и температуре 170 °C с последующим ее охлаждением без снятия давления до 40 °C. У образцов были определены физико-механические показатели (плотность, модуль упругости при изгибе по прогибу образца диска, твердость по вдавливанию шарика, число упругости, водопоглощение, разбухание, краевой угол смачивания). После проведения исследований физико-механических свойств образцы были подвергнуты испытаниям на биоразлагаемость по отношению к почвогрунту за 84 суток. После завершения испытаний на биоразлагаемость почвогрунт был исследован на уровень химического загрязнения тяжелыми металлами. Результаты проведенных испытаний показали, что пластик, полученный на основе шелухи пшеницы и риса, можно классифицировать как полностью биоразлагаемый материал. В процессе деструкции данных материалов происходит миграция неорганических соединений в почвенную среду, при этом уровень содержания тяжелых металлов не превышает установленных экологических и санитарно-гигиенических норм для почвы. По результатам комплексной оценки химического загрязнения почвогрунтов продуктами деструкции биоразлагаемого композиционного материала без связующего на основе растительного сырья, категория загрязнения исследованной почвы была отнесена к «допустимой». Тем не менее, учитывая существующий уровень загрязнения окружающей среды, при использовании рассматриваемого сырья требуется первоначальная оценка его качества, в том числе и по содержанию элементов-загрязнителей.

Ключевые слова: пластик, растительное сырье, шелуха пшеницы, шелуха риса, физико-механические свойства, биоразложение, почвогрунт, тяжелые металлы, химическое загрязнение

Artyomov A.V., Vurasko A.V., Shkuro A.E., Buryndin V.G. Investigation of sanitary and chemical indicators of soil pollution by biodegradation products of plastic without resins based on non-wood plant raw materials. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj*

Lesotekhnicheskoy Akademii, 2025, iss. 255, pp. 489–510 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.489-510

The purpose of this study was to get plastic without resin (PWR) based on plant fillers of non-wood origin in the form of wheat husks and rice husks using piezothermal treatment in a sealed mold and to perform tests on the biodegradability of these materials in the soil, followed by an assessment of the level of chemical contamination of soils as a result of their destruction. PWR samples based on fractionated wheat husk and rice husk were produced. The samples were obtained by compression pressing in an airtight mold at a pressure of 40 MPa and a temperature of 170 °C, followed by its cooling without pressure relief to 40 °C. The physico-mechanical parameters of the samples were determined (density, modulus of elasticity when bending along the deflection of the disk sample, hardness after indentation of the ball, elasticity number, water absorption, swelling, wetting edge angle). After conducting studies of the physico-mechanical properties, the samples were subjected to biodegradability tests in relation to soil for 84 days. After the biodegradability tests were completed, the soil was examined for the level of chemical contamination with heavy metals. The results of the tests showed that plastic obtained from wheat and rice husks can be classified as a fully biodegradable material. During the destruction of these materials, inorganic compounds migrate into the soil environment, while the level of heavy metals does not exceed the established environmental and sanitary standards for the soil. According to the results of a comprehensive assessment of chemical contamination of soils by degradation products of a biodegradable composite material without a binder based on plant raw materials, the category of contamination of the studied soil was classified as "acceptable". Nevertheless, given the existing level of environmental pollution, when using the raw materials in question, an initial assessment of their quality is required, including the content of pollutants.

Keywords: plastic, plant-based materials, wheat husk, rice husk, physical and mechanical properties, biodegradation, soil, heavy metals, chemical pollution

АРТЁМОВ Артём Вячеславович – доцент кафедры технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров Уральского государственного лесотехнического университета, кандидат технических наук, доцент.

620100, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: artemovav@m.usfeu.ru

ARTYOMOV Artyom V. – PhD (Technical), Associate Professor of the department technology of pulp and paper industries and polymer processing of the Ural State Forest Engineering University

620100. Siberian tract str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: artemovav@m.usfeu.ru

ВУРАСКО Алеся Валерьевна – профессор кафедры технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров Уральского государственного лесотехнического университета, доктор технических наук, профессор.

620100, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: vuraskoav@m.usfeu.ru

VURASKO Alesya V. – DSc (Technical), Professor of the department technology of pulp and paper industries and polymer processing of the Ural State Forest Engineering University.

620100. Siberian tract str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: vuraskoav@m.usfeu.ru

ШКУРО Алексей Евгеньевич – профессор кафедры технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров Уральского государственного лесотехнического университета, доктор технических наук, доцент.

620100, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: shkuroae@m.usfeu.ru

SHKURO Alexey E. – DSc (Technical), Professor of the department technology of pulp and paper industries and polymer processing of the Ural State Forest Engineering University.

620100. Siberian tract str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: shkuroae@m.usfeu.ru

БУРЫНДИН Виктор Гаврилович – профессор кафедры технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров Уральского государственного лесотехнического университета, доктор технических наук, профессор.

620100, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: buryndinvg@m.usfeu.ru

BURYNDIN Victor G. – DSc (Technical), Professor of the department technology of pulp and paper industries and polymer processing of the Ural State Forest Engineering University.

620100. Siberian tract str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: shkuroae@m.usfeu.ru

В.В. Гораздова, Е.В. Дернова, Д.А. Дулькин

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАЗМОЛА КОРОТКОВОЛОКНИСТОЙ ФРАКЦИИ
НА ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА
МАКУЛАТУРНОГО ТАРНОГО КАРТОНА**

Введение. Макулатурная масса является крайне неоднородной полидисперсной системой, которая содержит волокна различной длины и толщины, полученные различными способами из различных пород древесины [Ванчаков и др., 2019]. Бумажную массу из вторичного волокна принято условно делить на коротко- и длинноволокнистую фракции (КВФ и ДВФ).

Длинноволокнистая фракция характеризуется заметно большей средней длиной волокна, низкой степенью помола и потенциально высокими прочностными свойствами [Яблочкин и др., 2004].

Коротковолокнистая фракция имеет невысокую среднюю длину волокна, содержит в своем составе обрывки и фрагменты сильно ороговевших волокон с высокой степенью помола, недостаточными бумагообразующими свойствами и особой способностью к укорочению в процессе размола вследствие недостаточной гибкости. КВФ обуславливает увеличение степени помола массы и препятствует оптимальному воздействию при размоле на ДВФ [Дулькин и др., 2007].

Совместный размол коротко- и длинноволокнистой фракций приводит к еще большему измельчению коротких и недостаточной обработке длинных волокон. Для приготовленной таким образом бумажной массы характерны невысокие бумагообразующие свойства [Дьякова и др., 2009].

Основные цели фракционирования:

- возможность повышения качества готовой продукции;
- сокращение затрат на процесс размола макулатурной массы за счет селективной обработки либо раздельного использования КВФ и ДВФ;
- снижение количества мелочи при обычном размоле.

Следовательно, разнонаправленный характер воздействия на длинное и короткое волокно приводит к повышению бумагообразующих свойств вторичных волокон.

Настоящее исследование направлено на изучение технологических факторов фракционирования и размола, влияющих на стабильность и повышение показателей качества тарного картона.

Целью исследования является усовершенствование режима размола коротковолокнистой фракции для повышения показателей качества макулатурного тарного картона.

Для реализации указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Определить оптимальную степень помола КВФ.
2. Установить влияние характера воздействия укорачивающего и фибрillирующего размола на КВФ.
3. Определить оптимальное содержание доли КВФ в композиции с ДВФ.
4. Провести опытно-промышленные испытания.

Материалы и методика исследования. В качестве объектов исследования использовали пробы бумажной массы, отобранные непосредственно из технологического потока, а также промышленные и лабораторные образцы готовой продукции.

Степень помола бумажной массы определяли на аппарате Шоппер-Риглера в соответствии с ГОСТ 14363.4-89 «Целлюлоза. Метод подготовки проб к физико-механическим испытаниям».

Время обезвоживания бумажной массы характеризует ее способность к водоотдаче в зависимости от степени разработки волокон в процессе размола и, как следствие, является одним из важнейших факторов процесса формирования бумажного полотна на сетке БДМ. Время обезвоживания определяли на аппарате Шоппер-Риглера.

Перед работой на аппарате Шоппер-Риглера производится калибровка прибора, определение так называемого «водного числа».

Определение средней длины волокна выполнено на анализаторе Fiber Tester, который позволяет оперативно измерять структурно-морфологические характеристики отдельных волокон, формировать электронные массивы данных и выполнять их обработку [Дернова и др., 2022]. Анализатор промывается чистой водой после измерения каждой серии проб бумажной массы.

Качество лабораторных образцов картона-лайнера и флютинга оценивали по следующим физико-механическим показателям: сопротивление сжатию на коротком расстоянии SCT в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9895-2013 «Бумага и картон. Определение сопротивления сжатию. Метод испытания на коротком расстоянии между зажимами», сопротивление плоскостному сжатию гофрированного образца СМТ в соответствии с ГОСТ Р ИСО 3035-2013 «Картон гофрированный. Метод определения сопротивления плоскостному сжатию», сопротивление продавливанию BST в соот-

ветствии с ГОСТ Р ИСО 2759-2017 «Картон. Метод определения сопротивления прдавливанию».

Для расчета индекса физико-механических показателей значение делят на массу 1 м² образца. Вариация показателей рассчитывается как разность между максимальным и минимальным значением признака, выражается в %.

Результаты исследования. Исследования проводили в три этапа. На первом этапе определили влияние характера воздействия укорачивающего и фибрillирующего размола, на втором – оптимальную степень помола КВФ, на третьем – оптимальную композицию бумажной массы по волокну для оценки показателей качества лабораторных образцов.

Для решения первой задачи исследования был выбран диапазон степени помола коротковолокнистой фракции 42...51 °ШР с шагом 3 °ШР (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики макулатурной массы

Characteristics of waste paper pulp

Степень помола, °ШР	Время обезвоживания, с	Длина волокна, мм
<i>Укорачивающий размол</i>		
42	56	1,07
45	69	1,03
48	70	0,98
51	75	0,96
<i>Фибрillирующий размол</i>		
42	44	1,15
45	51	1,10
48	54	1,07
51	79	1,04

Для проведения укорачивающего воздействия на волокно была использована мельница НДМ с концентрацией 3,5% при размоле, для фибрillирующего воздействия – мельница Йокро с концентрацией 6%.

Очевидно, что при увеличении степени помола массы время обезвоживания планомерно возрастает, а длина волокна снижается. Размол уже короткой фракции желательно проводить с минимальной потерей длины волокна, следовательно, рекомендован фибрillирующий характер размола.

На следующем этапе эксперимента для определения оптимальной степени помола КВФ были изготовлены лабораторные образцы из 100%-ной коротковолокнистой фракции массой $1\text{ m}^2 120\text{ г}$ с последующим определением сопротивления сжатию на коротком расстоянии. На рис. 1 продемонстрирована зависимость сопротивления сжатию на коротком расстоянии по методу SCT от степени помола КВФ.

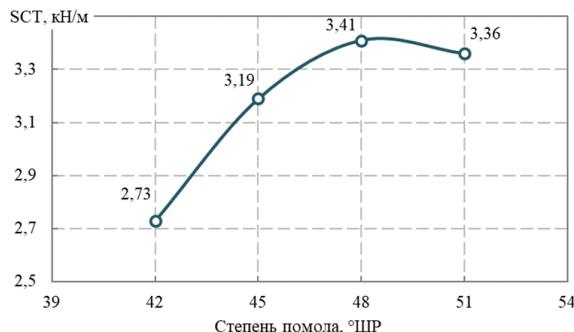


Рис. 1. Зависимость SCT от степени помола КВФ
Fig. 1. Dependence of SCT on the degree of grinding of SFF

Максимальный прирост показателя SCT (на 25%) отмечен у образцов, имеющих степень помола 48 °ШР.

Далее было определено влияние размолотой коротковолокнистой массы в композиции с длинноволокнистой. На рис. 2 представлена зависимость сопротивления сжатию на коротком расстоянии по методу SCT от степени помола КВФ.

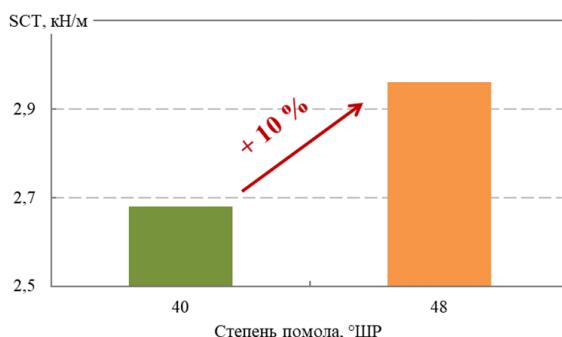


Рис. 2. Прирост значений SCT за счет увеличения степени помола КВФ
Fig. 2. Increase in SCT values due to increase in the degree of grinding of the SFF

При увеличении степени помола КВФ на 8 °ШР в композиции с ДВФ наблюдается прирост показателя SCT на 10%. Состав композиции по волокну ДВФ : КВФ = 42 : 58%.

На заключительном этапе исследований был проведен анализ композиционного состава бумажной массы, а именно влияния повышения доли КВФ в композиции с ДВФ на показатели качества бумажной массы и готовой продукции. В табл. 2 представлены характеристики макулатурной массы с различной долей КВФ в композиции.

Таблица 2
Характеристики макулатурной массы
Characteristics of waste paper pulp

Композиция	Длина волокна, мм	Время обезвоживания, с
55% КВФ + 45% ДВФ	1,42	46,4
60% КВФ + 40% ДВФ	1,32	50,4
65% КВФ + 35% ДВФ	1,25	52,4
70% КВФ + 30% ДВФ	1,16	56,8

Показано, что при увеличении доли КВФ снижается средняя длина волокна и увеличивается время обезвоживания бумажной массы.

На рис. 3 представлены физико-механические показатели лабораторных образцов в зависимости от содержания в композиции доли КВФ.

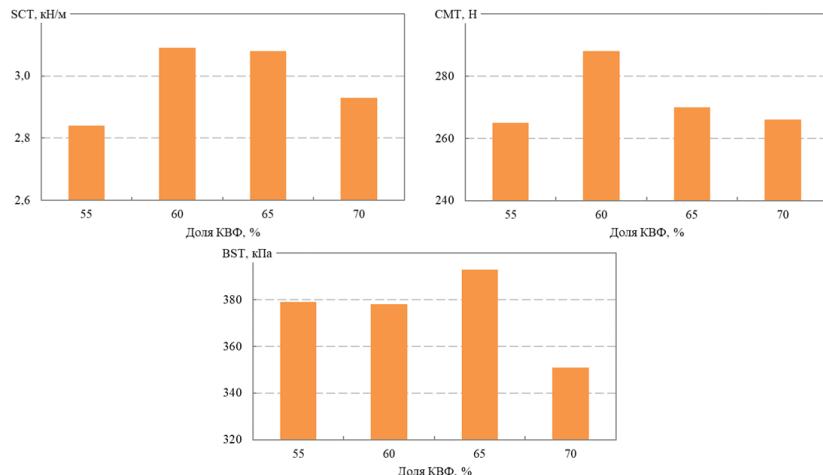


Рис. 3. Физико-механические показатели образцов исследуемых композиций
Fig. 3. Physical and mechanical properties of samples of the studied compositions

Для композиции 60% КВФ и 40% ДВФ обнаружены максимальные значения сопротивления плоскостному сжатию и сопротивления сжатию на коротком расстоянии, прирост составил 10%. Максимальные значения абсолютного сопротивления продавливанию наблюдаются у образцов с композицией 65% КВФ и 35% ДВФ, прирост – 4%. Оптимальным вариантом композиции следует считать 60% КВФ и 40% ДВФ, поскольку для данной композиции обнаружен больший прирост по двум показателям на 10%.

В производственных условиях проведена опытно-промышленная выработка готовой продукции с композиционным составом 60% КВФ и 40% ДВФ и дополнительным размолом КВФ. На рис. 4 показан сравнительный анализ индекса SCT и вариабельность значений без размола и с размолом КВФ. Коротковолокнистая фракция без размола имеет степень помола 40 °ШР, после размола – 48 °ШР.

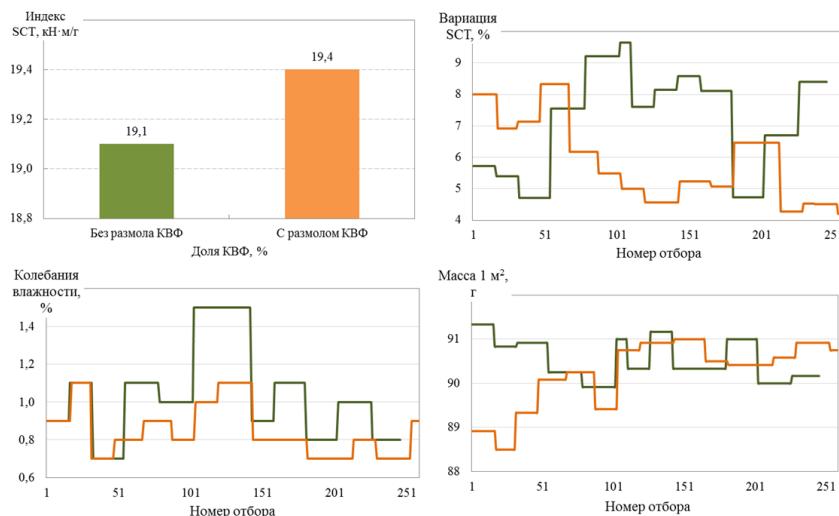


Рис. 4. Показатели качества промышленных образцов:

— без размола КВФ, — с размолом КВФ

Fig. 4. Quality indicators of industrial designs:

— without grinding SFF, — with grinding SFF

Опытно-промышленные испытания проведены успешно с получением прироста по индексу SCT на 0,3 единицы. Дополнительным бонусом является то, что вариация по SCT и колебания влажности по ширине бумажно-

го полотна с размолом КВФ ниже, чем без размола, следовательно, показатели стали стабильнее.

Обсуждение. Отметим, что равномерность влажности по ширине и длине бумажного полотна играет огромную роль в технологичности переработки сырья при производстве гофрированного картона.

Наличие на бумажном полотне сухих и влажных полос (неравномерная влажность) приводит к разной степени впитываемости клея и, как следствие, образованию дефектов, таких как коробление, пузырение и др.

При использовании дополнительного размола КВФ вариабельность показателей снизилась, произошло увеличение показателя СМТ и ССТ, влажность стала наиболее стабильна по всей ширине полотна. Это важный момент для переработчиков тарного картона, т.к. при скорости гофроагрегата свыше 250 м/мин основными факторами, влияющими на качество гофрокартона, являются масса 1 м², равномерность влажности по ширине полотна и высокие показатели качества готовой продукции.

В лабораторных условиях определена оптимальная степень помола КВФ – 48 °ШР, направленный фибрillирующий характер размола, композиция по волокну 60% КВФ и 40% ДВФ. В качестве дальнейшего исследования полезно было бы смоделировать размол при еще большей концентрации бумажной массы, используя, например, лабораторную мельницу РFI.

Исследования подтверждены опытно-промышленными испытаниями, которые показали положительный эффект от проведенных мероприятий.

Заключение. Выявлена оптимальная степень помола коротковолокнистой массы – 48 °ШР, характер размола – фибрillирующий, композиция по волокну 60% КВФ и 40% ДВФ.

Вклад авторов. Вклад каждого автора равнозначен.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Ванчаков М.В., Кулешов А.В., Александров А.В., Гаузе А.А. Технология и оборудование переработки макулатуры: учеб. пособ. Ч. I. СПб., 2019. 107 с.

Дернова Е.В., Гораздова В.В., Гурьев А.В., Дулькин Д.А., Дернов А.И., Окулова Е.О. Практикум по технологии бумаги и картона: учеб. пособ. Часть I: Анализ полуфабрикатов, химиков и бумажной массы. Архангельск: САФУ, 2022. 88 с.

Дулькин Д.А., Спиридонов В.А., Комаров В.И. Современное состояние и перспективы использования вторичного волокна из макулатуры в мировой и отечественной индустрии бумаги. Архангельск: АГТУ, 2007. 1118 с.

Дьякова Е.В., Дулькин Д.А., Комаров В.И. Переработка макулатуры: учеб. пособ. Архангельск: АГТУ, 2009. 172 с.

Яблочкин Н.И., Комаров В.И., Ковернинский И.Н., Дулькин Д.А. Фракционирование вторичного волокна в центробежно-гидродинамическом фракционаторе // ИВУЗ. Лесной журнал. 2004. № 6. С. 62–89.

References

Dernova E.V., Gorazdova V.V., Guryev A.V., Dulkin D.A., Dernov A.I., Okulova E.O. Paper and cardboard technology workshop: textbook. Part I: analysis of semi-finished products, chemicals and paper pulp. Arkhangelsk: NarFU, 2022. 88 p. (In Russ.)

Dulkin D.A., Spiridonov V.A., Komarov V.I. Current state and prospects for the use of secondary fiber from waste paper in the global and domestic paper industry. Arkhangelsk: ASTU, 2007. 1118 p. (In Russ.)

Dyakova E.V., Dulkin D.A., Komarov V.I. Recycling of waste paper: textbook. Arkhangelsk: ASTU, 2009. 172 p. (In Russ.)

Vanchakov M.V., Kuleshov A.V., Aleksandrov A.V., Gause A.A. Technology and equipment for recycling waste paper: textbook. Part I. St. Petersburg, 2019. 107 p. (In Russ.)

Yablochkin N.I., Komarov V.I., Koverninsky I.N., Dulkin D.A. Fractionation of secondary fiber in a centrifugal-hydrodynamic fractionator. IVUZ. Forestry magazine, 2004, no. 6, pp. 62–89. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 27.11.2024

Гораздова В.В., Дернова Е.В., Дулькин Д.А. Анализ влияния размола коротковолокнистой фракции на показатели качества макулатурного тарного картона // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 511–520. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.511-520

Исследования проводили в три этапа. На первом этапе определили влияние характера воздействия укорачивающего и фибрillирующего размола, на втором – оптимальную степень помола КВФ, на третьем – оптимальную композицию бумажной массы по волокну. Для решения первой задачи исследования был выбран диапазон степени помола коротковолокнистой фракции 42...51 °ШР с шагом 3 °ШР. Для проведения укорачивающего размола была использована мельница НДМ с концентрацией 3,5% при размоле, для фибрillирующего – мельница Йокро с концентрацией 6%. На следующем этапе для определения оптимальной степени помола КВФ были изготовлены лабораторные образцы из 100%-ной КВФ массой 1 м² 120 г для определения сопротивления сжатию на коротком расстоянии. Максимальный прирост показателя SCT (на 25%) отмечен у образцов, имеющих степень помола 48 °ШР. При увеличении степени помола КВФ на 8 °ШР в композиции с ДВФ наблюдается прирост показателя SCT на 10%. Состав

композиции по волокну ДВФ : КВФ = 42 : 58%. Для композиции 60% КВФ и 40% ДВФ обнаружены максимальные значения сопротивления плоскостному сжатию и сопротивления сжатию на коротком расстоянии, прирост 10%. Максимальные значения сопротивления прдавливанию наблюдаются у образцов 65% КВФ и 35% ДВФ, прирост – 4%. Оптимальным вариантом композиции следует считать 60% КВФ и 40% ДВФ, поскольку для данной композиции обнаружен прирост по двум показателям на 10%. В производственных условиях проведена опытно-промышленная выработка готовой продукции с композиционным составом 65% КВФ и 35% ДВФ и дополнительным размолом КВФ. Опытно-промышленные испытания проведены с получением прироста по индексу SCT на 0,3 единицы, кроме того, дополнительным благоприятным фактором является то, что вариация по SCT и колебания влажности по ширине бумажного полотна с размолов КВФ ниже, чем без размола, т. е. показатели стали стабильнее. Равномерность влажности по ширине и длине бумажного полотна играет огромную роль в технологичности переработки сырья при производстве гофрированного картона.

Ключевые слова: макулатура, бумажная масса, фракционирование, размол, коротковолокнистая фракция, длинноволокнистая фракция.

Gorazdova V.V., Dernova E.V., Dulkin D.A. Analysis of the influence of grinding the short-fiber fraction on the quality indicators of waste containerboard. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 511–520 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.511-520

The research was conducted in three stages. At the first stage, the influence of the nature of the action of shortening and fibrillating grinding was determined, at the second stage – the optimal degree of grinding of the SFF, at the third – the optimal composition of the paper pulp by fiber. To solve the first task of the study, the range of the degree of grinding of the short-fiber fraction of 42 ... 51 °ShR with a step of 3 °ShR was selected. For shortening grinding, an NDM mill with a concentration of 3.5% during grinding was used, for fibrillating – a Yokro mill with a concentration of 6%. At the next stage, to determine the optimal degree of grinding of the SFF, laboratory samples were made from 100% SFF with a weight of 1 m² 120 g to determine the compression resistance at a short distance. The maximum increase in the SCT indicator (by 25%) was noted for samples with a grinding degree of 48 °ShR. With an increase in the degree of grinding of SFF by 8 °SR, a 10% increase in the SCT index is observed in the composition with LFF. The composition by fiber is LFF: KVF = 42: 58%. For the composition of 60% SFF and 40% LFF, the maximum values of resistance to planar compression and resistance to compression over a short distance were found, an increase of 10%. The maximum values of punching resistance are observed in samples of 65% SFF and 35% LFF, an increase of 4%. The optimal composition option should be considered to be 60% SFF and 40% LFF, since an increase of 10% was found for both indicators for this composition. Under production conditions, a pilot production of finished products with a composite composition of 65% SFF and 35% LFF and additional grinding of SFF was carried out.

Pilot-industrial tests were conducted with an increase in the SCT index of 0.3 units, in addition, an additional favorable factor is that the variation in SCT and fluctuations in humidity across the width of the paper web with SFF refining are lower than without refining, i.e. the indicators have become more stable. The uniformity of humidity across the width and length of the paper web plays a huge role in the technological efficiency of processing raw materials in the production of corrugated cardboard.

Keywords: waste paper, paper pulp, fractionation, grinding, short-fiber fraction, long-fiber fraction.

ГОРАЗДОВА Виктория Валерьевна – ведущий специалист по научно-технологическим вопросам ООО «УК «ОБФ», кандидат технических наук. SPIN-код: 4305-7564. ORCID: 0000-0003-4732-7791.

108811, Киевское шоссе, 22-й километр, поселение Московский, домовл. 4, стр. 1, г. Москва, Россия. E-mail: vgorazdova@ukobf.com

GORAZDOVA Victoria V. – PhD (Technical), leading specialist on scientific and technological issues LLC "MC "CPM". SPIN-code: 4305-7564. ORCID: 0000-0003-4732-7791.

108811. 22nd kilometer of the Kievskoe highway. Moskovsky settlement. Household 4. Build. 1. Moscow. Russia. E-mail: vgorazdova@ukobf.com

ДЕРНОВА Елена Валентиновна – генеральный директор АО «Троицкая бумажная фабрика», доцент, кандидат технических наук. SPIN-код: 5359-3028. ORCID: 0000-0002-7869-9646.

249831, ул. Маяковского, д. 1, г. Кондрово, Калужская обл., Россия. E-mail: edernova@ukobf.com

DERNOVA Elena V. – PhD (Technical), CEO JSC «Troitskaya Paper Mill», assistant professor. SPIN-code: 5359-3028. ORCID: 0000-0002-7869-9646.

249831. Mayakovskiy st. 1. Kondrovo. Kaluga region. Russia. E-mail: edernova@ukobf.com

ДУЛЬКИН Дмитрий Александрович – генеральный директор ООО «УК «ОБФ», доктор технических наук. SPIN-код: 4161-3490. ORCID: 0000-0001-6517-2979.

108811, Киевское шоссе, 22-й километр, поселение Московский, домовл. 4, стр. 1, Москва, Россия. E-mail: ddulkin@ukobf.com

DULKIN Dmitry A. – DSc (Technical), CEO LLC "MC "CPM". SPIN-code: 4161-3490. ORCID: 0000-0001-6517-2979.

108811. 22nd kilometer of the Kievskoe highway. Moskovsky settlement. Household 4. Build. 1. Moscow. Russia. E-mail: ddulkin@ukobf.com

Т.И. Фомичева, Е.В. Колужникова

**МЕТОД ГАЗОВОЙ ХРОМАТОГРАФИИ ДЛЯ СРАВНИТЕЛЬНОГО
АНАЛИЗА ЖИРОВ ПРИРОДНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ
НА СОДЕРЖАНИЕ ПОЛИНЕНАСЫЩЕННЫХ ЖИРНЫХ КИСЛОТ**

Введение. Испокон веков люди использовали различные вещества, в том числе и природные жиры, для лечения болезней, заживления ран, уменьшения боли, улучшения пищеварения, в качестве релаксантов или стимуляторов. И сейчас, несмотря на обилие синтетических фармакологических препаратов, повсеместно и эффективно используют природные соединения, благотворно влияющие на здоровье человека, которые часто называют биологически активными добавками (БАД).

Биологически активные добавки служат для восполнения в организме человека недостатка веществ, которые необходимы для правильного функционирования всех органов [Орасмия-Медер, Шатрова, 2016]. В результате становится возможным предотвратить некоторые заболевания и улучшить самочувствие человека без приема сильнодействующих лекарств.

Современные представления о потребностях человека в незаменимых пищевых продуктах основаны на исследованиях, проведенных еще в предыдущем веке. Это касается потребности в таких веществах, как жирные кислоты, аминокислоты, витамины, неорганические компоненты, включая некоторые металлы и неметаллы.

Химический состав организма поддерживается на основе сбалансированного питания, включающего соединения, которые сам организм не способен синтезировать. К их числу относятся полиненасыщенные жирные кислоты: ПНЖК- ω -3; ПНЖК- ω -6; ПНЖК- ω -9 – входящие в состав различных типов рыбьих жиров.

Рыбий жир является одним из наиболее стабильных, высоко концентрированных природных жиров. В его содержание, по литературным данным, входят следующие триглицериды: эфиры глицерина и жирных кислот – натуральная форма, прежде всего ПНЖК- ω -3 [Рудаков и др., 2005; Таганович, 2008], в меньшем, но достаточном количестве ПНЖК- ω -6 и ПНЖК- ω -9.

В рыбьем жире также много ценных аминокислот, он химически стабилен и не окисляется в течение длительного времени. Сильнейшим анти-

оксидантом, способствующим стабильности рыбьего жира, является олеиновая кислота (ПНЖК- ω -9).

Как правило, наибольшей массовой долей в составе полиненасыщенных жирных кислот, содержащихся в рыбьем жире, являются кислоты группы ПНЖК- ω -3, так называемые Омега-3 ПНЖК, которые находят применение в разных областях медицины: кардиологии, пульмонологии, гастроэнтерологии, – а также принимают участие в обмене веществ, облегчают усвоение жирорастворимых витаминов А, Е. Группа ПНЖК- ω -6 (Омега-6) полиненасыщенных жирных кислот действует на клеточные мембранны, способствует усвоению кальция и регулирует процесс пищеварения, обеспечивая здоровье кожи [Крецу и др., 1989; Патудин и др., 2011]. Пальмитиновая и стеариновая кислоты участвуют в регулировании уровня холестерина, снижают риск появления атеросклероза [Корнена, 2009; Патудин и др., 2011;], арахиновая кислота защищает от бактерий и неблагоприятной микрофлоры; стеариновая кислота обладает смягчающим действием; линолевая кислота питает волосы и кожу; лауриновая и пальмитиновая кислоты увлажняют и заживляют ткани (ГОСТ 31663-2012. «Масла растительные и жиры животные. Определение методом газовой хроматографии массовой доли метиловых эфиров жирных кислот»).

В составе рыбьих жиров различных пород рыбы имеются, по литературным данным, следующие полезные для человека компоненты:

- стеролы – 19 мг (Бета-ситостерол 12 мг) – уменьшают концентрацию холестерина в организме человека более чем на 15% [Нормы..., 2009]. Легко блокируют рецепторы, снижая поглощение холестерина и ускоряют его выведение из организма;

- полиненасыщенные жирные кислоты ПНЖК- ω -3 и ПНЖК- ω -6 оказывают наиболее эффективное позитивное воздействие на организм человека [Нормы..., 2009; Торшин и др., 2020]. Линолевая кислота и продукты ее метаболизма – одно из защитных средств организма в борьбе с преждевременным старением, сердечно-сосудистыми заболеваниями, артритом, аллергией, аутоиммунными заболеваниями. Исследования показали [Волгарёв и др., 2003], что повышенное потребление ω -3 ПНЖК достоверно (почти в 10 раз) снижает риск сердечно-сосудистых заболеваний у здоровых людей, способствует выздоровлению и на 35% снижает смертность среди людей, перенесших эти заболевания.

Цель работы – сравнить исследуемые образцы рыбьего жира рыб различных пород и ареалов обитания путем изучения их состава по содержанию полиненасыщенных жирных кислот и оценить возможную эффективив-

ность их воздействия на работу различных систем жизнеобеспечения организма человека.

Материалы и методика исследования. Методом газовой хроматографии проанализировано содержание жирных кислот в различных образцах рыбьего жира лосося и форели естественной среды обитания и искусственно выращенной форели («Аквакультура»). Использован хроматограф газовый модели Кристалл 5000.2. Анализ осуществляли в соответствии с методикой ГОСТ 31663-2012, используя кислоты для сравнения в качестве стандартных образцов.

Результаты исследования. В табл. 1–3 приведен компонентный состав проанализированных жирных кислот рыбьего жира.

Таблица 1

Состав образцов рыбьего жира (лосось естественной среды обитания)

The composition of fish oil samples (salmon of natural habitat)

Полиненасыщенные жирные кислоты Омега – 3 (ПНЖК- ω -3)	
Кислота	Массовая доля, %
C18:3n3 α -Линоленовая	1,0
C18:4n3 Октадекатетраеновая	4,0
C20:3n3 Эйкозатриеновая	0,0
C20:4n3 Эйкозатетраеновая	1,0
C20:5n3 Эйкозапентаеновая	16,8
C22:5n3 Докозапентаеновая	1,8
C22:6n3 Докозагексаеновая	8,7
Суммарно:	33,7

Полиненасыщенные жирные кислоты Омега-6 (ПНЖК- ω -6)	
Кислота	Массовая доля, %
C18:2n6 Линоловая	1,5
C18:3n6 γ -Линоленовая	0,2
C20:2n6 Эйкозадиеновая	0,2
C20:3n6 Эйкозатриеновая	0,2
C20:4n6 Арахидоновая	0,8
C22:2n6 Докозадиеновая	0,0
Суммарно:	2,8

Окончание табл. 1

Полиненасыщенные жирные кислоты Омега-9 (ПНЖК-ω-9)	
Кислота	Массовая доля, %
C18:1n9 Олеиновая	10,2
C20:1n9 Гондоиновая	2,7
C22:1n9 Эруковая	0,7
C24:1n9 Нервоновая	0,6
Суммарно:	14,2

Таблица 2

Состав образцов рыбьего жира (форель «Аквакультура»)

The composition of fish oil samples (cultivated trout «Aquaculture»)

Полиненасыщенные жирные кислоты – Омега-3 (ПНЖК-ω-3)	
Кислота	Массовая доля, %
C18:3n3 α-Линоленовая	4,8
C18:4n3 Октадекатетраеновая	0,5
C20:3n3 Эйкозатриеновая	0,2
C20:4n3 Эйкозатетраеновая	0,3
C20:5n3 Эйкозапентаеновая	0,7
C22:5n3 Докозапентаеновая	0,4
C22:6n3 Докозагексаеновая	2,0
Суммарно:	8,9

Полиненасыщенные жирные кислоты – Омега-6 (ПНЖК-ω-6)	
Кислота	Массовая доля, %
C18:2n6 Линолевая	14,5
C18:3n6 γ-Линоленовая	0,2
C20:2n6 Эйкозадиеновая	0,7
C20:3n6 Эйкозатриеновая	0,3
C20:4n6 Арахидоновая	0,2
C22:2n6 Докозадиеновая	0,0
Суммарно:	15,9

Окончание табл. 2

Полиненасыщенные жирные кислоты – Омега-9 (ПНЖК- ω -9)	
Кислота	Массовая доля, %
C18:1n9 Олеиновая	45,0
C20:1n9 Гондоиновая	2,3
C22:1n9 Эруковая	0,2
C24:1n9 Нервоновая	0,2
Суммарно:	47,7

Таблица 3

Состав образцов рыбьего жира (форель естественной среды обитания)

The composition of fish oil samples (trout of natural habitat)

Полиненасыщенные жирные кислоты – Омега-3 (ПНЖК- ω -3), %	
Кислота	Массовая доля, %
C18:3n3 α -Линоленовая	6,8
C18:4n3 Октадекатетраеновая	0,8
C20:3n3 Эйкозатриеновая	0,3
C20:4n3 Эйкозатетраеновая	0,6
C20:5n3 Эйкозапентаеновая	1,7
C22:5n3 Докозапентаеновая	0,4
C22:6n3 Докозагексаеновая	2,7
Суммарно:	13,3

Полиненасыщенные жирные кислоты – Омега-6 (ПНЖК- ω -6), %	
Кислота	Массовая доля, %
C18:2n6 Линолевая	17,5
C18:3n6 γ -Линоленовая	0,5
C20:2n6 Эйкозадиеновая	0,9
C20:3n6 Эйкозатриеновая	0,6
C20:4n6 Арахидоновая	0,4
C22:2n6 Докозадиеновая	0,0
Суммарно:	19,9

Окончание табл. 3

Полиненасыщенные жирные кислоты - Омега-9 (ПНЖК- ω -9)	
Кислота	Массовая доля, %
C18:1n9 Олеиновая	53,2
C20:1n9 Гондоиновая	2,7
C22:1n9 Эруковая	0,4
C24:1n9 Нервоновая	0,4
Суммарно:	56,7

Обсуждение. Сравнительный анализ результатов хроматографических исследований позволяет сделать вывод, что состав образцов рыбьего жира лосося естественной среды обитания отличается высоким содержанием основных компонентов Омега-3 жирных кислот – эйкозапентаеновой (ЭПК) и докозагексаеновой (ДГК), которые играют особую роль в формировании всех отделов мозга, сетчатки глаза, способствуют трансмиссии нервных импульсов. Суммарное содержание ПНЖК- ω -3 составляет 33,7%. На долю Омега-6 и Омега-9 ПНЖК приходится, соответственно, 2,8% и 14,2%.

Состав образцов рыбьего жира форели различной среды обитания отличается от предыдущих результатов анализа лосося по качественным и количественным параметрам. Основной вклад ПНЖК в этих жирах приходится на кислоты Омега-6 и Омега-9. Также выявлены различия в количественном составе ПНЖК рыбьего жира форели в зависимости от естественной или искусственной среды обитания. Результаты анализа показывают, что массовая доля ПНЖК в составе «Аквакультуры» форели для Омега-3, Омега-6 и Омега-9 кислот составляет, соответственно, 8,9%, 15,9% и 47,7%. В образцах природной форели их массовая доля равна, соответственно, 13,3%, 19,9% и 56,7%, что указывает на более высокое содержание эссенциальных кислот в образцах форели природного происхождения.

В соответствии с «Нормами физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации» [Нормы..., 2009] потребность в полиненасыщенных жирных кислотах составляет для взрослых 6–10%, а для детей – 5–10% от калорийности суточного рациона. Чтобы восполнить суточную потребность организма в этих веществах, достаточно использовать в своем рационе продукты или биологические активные добавки, в состав которых входят ПНЖК.

Омега-3 полиненасыщенные жирные кислоты: олеиновая, ленолевая, а также эйкозапентаеновая и докозагексаеновая – способствуют снижению

воспалительных процессов в организме, улучшению энергетического обмена в митохондриях, нормализации обмена холестерина. Помимо этого, такие кислоты стимулируют работоспособность желудочно-кишечного тракта, способствуют замедлению развития различных нарушений функций головного мозга, способствуют снижению свертываемости крови, повышению эластичности клеточных мембран и их проницаемости для необходимых компонентов, что способствует улучшению функционального состояния сердечно-сосудистой системы, снижению риска развития сердечно-сосудистых заболеваний. [Волгарёв и др., 2003; Швейнов, 2017; Торшин и др., 2020]. На долю этих ПНЖК в исследуемых образцах приходится около 83%.

Омега-6 кислоты (линолевая, арахидоновая) способствуют стабилизации обменных процессов в организме, потенцируют синтез гормоноподобных веществ, снижают психоэмоциональное напряжение, улучшают функционирование эпидермиса [Уколова и др., 2018]. Полиненасыщенные жирные кислоты группы омега-3 (α -линоленовая), обладают противовоспалительным эффектом, укрепляют суставы, снимают синдром хронической усталости, способствуют метаболизму эссенциальных веществ [Торшин и др., 2020].

С целью профилактики риска онкологических, сердечно-сосудистых заболеваний, сахарного диабета, укрепления иммунитета в пожилом возрасте целесообразно включать в состав рациона в основном мононенасыщенные кислоты, в частности, олеиновую, гондоиновую, эруковую и нерроновую (ω -9) кислоты [Торшин и др., 2020].

Заключение. Сравнительный анализ результатов хроматографических исследований позволяет сделать вывод, что состав образцов рыбьего жира лосося естественной среды обитания отличается высоким содержанием основных компонентов Омега-3 жирных кислот – эйкозапентаеновой и докозагексаеновой. Суммарное содержание ПНЖК- ω -3 составляет 33,7%. На долю Омега-6 и Омега-9 ПНЖК приходится, соответственно, 2,8% и 14,2%.

Установлено, что образцы рыбьего жира лосося и форели различаются по качественному и количественному составу ПНЖК. В образцах жира лосося преобладают ПНЖК Омега-3, их суммарное содержание составляет 33,7%. В образцах жира форели на долю Омега-3 ПНЖК приходится максимально 13,3%. Отличительной чертой жира форели является высокое содержание Омега-6 ПНЖК и Омега-9 ПНЖК. Что касается влияния среды обитания форели, то сравнительный анализ доказывает неоспоримое преимущество рыбьего жира природной форели, где массовая доля Омега-3,

Омега-6 и Омега-9 кислот составляет, соответственно, 13,3%, 19,9% и 56,7% (в «Аквакультуре» – 8,9%, 15,9% и 47,7% соответственно).

Таким образом, результаты сравнительного хроматографического анализа показали, что в исследуемых образцах рыбьего жира содержится значительная концентрация триглицеридов – натуральной формы Омега-кислот, являющихся основным видом энергии для организма.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Волгарёв М.Н., Мустафина О.К., Трушина Э.Н. О механизмах действия полиненасыщенных жирных кислот на иммунную систему // Вопросы питания. 2003. № 3. С. 35–40.

Корнена Е.П. Экспертиза масел, жиров и продуктов их переработки. Качество и безопасность: учеб.-справ. пособ. 3-е изд., испр. и доп. Новосибирск: Сибирское университетское изд-во, 2009. 384 с.

Крецу Л.Г., Домашенко Л.Г., Соколов М.Д. Мир пищевых растений. Кишинев: Тимпул, 1989. 324 с.

Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации: метод. рек. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 36 с.

Орасмияэ-Медер Т., Шатрова О. Наука красоты: из чего на самом деле состоит косметика. М: Альпина Паблишер, 2016. 255 с.

Патудин А.В., Мищенко В.С., Ильенко Л.И. Гомеопатические лекарственные средства, разрешенные в Российской Федерации для применения в здравоохранении и ветеринарии. М.: Знак, 2011. 352 с.

Рудаков О.Б., Пономарев А.Н., Полянский К.К., Любарь А.В. Жиры. Химический состав и экспертиза качества. М.: ДeЛи Принт, 2005. 312 с.

Таганович А.Д. Биологическая химия. Минск: БИНОМ, 2008. 688 с.

Торшин И.Ю., Громова О.А., Зайчик Б.Ц., Ружицкий А.О. Комплексное исследование состава экстрактов жира рыб и количественные критерии для различения стандартизованных экстрактов омега-3 полиненасыщенных жирных кислот // Кардиология. 2020. Т. 60, вып. 5. С. 1–10.

Уколова Н., Исаев А., Амбросов И., Дириш А., Косткина Е. Биоактиваторы нового поколения в омолаживающих процедурах // Kosmetik international. 2018. №1. С. 16–19.

Швейнов А.И. Профилактика аритмических осложнений у пациентов с острым инфарктом миокарда: перспективы применения ω -3-полиненасыщенных жирных кислот // Молодежный инновационный вестник: матер. XI межд. науч.-пр. конф. молодых ученых-медиков, посвящ. 100-летию ВГМУ им. Н.Н. Бурденко. 2017. Т. 6, № 1. С. 49–151.

References

Kornena E.P. Examination of oils, fats and products of their processing. Quality and safety: Textbook. 3rd ed., rev. and add. Novosibirsk: Siberian University Publishing House, 2009. 384 p. (In Russ.)

Kretsu L.G., Domashenko L.G., Sokolov M.D. The World of Food Plants. Kishinev: Timpul, 1989. 324 p. (In Russ.)

Norms of physiological needs in energy and food substances for different population groups of the Russian Federation: methodological recommendations. Moscow: Federal Center of Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2009. 36 p. (In Russ.)

Orasmyae-Meder T., Shatrova O. The science of beauty: what cosmetics really consists of. Moscow: Alpina Publisher, 2016. 255 p. (In Russ.)

Patudin A.V., Mishchenko V.S., Ilyenko L.I. Homeopathic medicines authorized in the Russian Federation for use in public health and veterinary medicine. Moscow: Znak, 2011. 352 p. (In Russ.)

Rudakov O.B., Ponomarev A.N., Polyanovsky K.K., Lyubar A.V. Fats. Chemical composition and quality examination. Moscow: DeLi Print, 2005. 312 p. (In Russ.)

Shveinov A.I. Prevention of arrhythmic complications in patients with acute myocardial infarction: prospects for the use of ω -3-polyunsaturated fatty acids. *Youth Innovation Bulletin*: Proceedings of the XI int. sci.-pract. conf. of young medical scientists, dedicated to the 100th anniversary of N.N. Burdenko VSMU, 2017, vol. 6, iss. 1, pp. 49–151. (In Russ.)

Taganovich A.D. Biological chemistry. Minsk: BINOM, 2008. 688 p. (In Russ.)

Torshin I.Y., Gromova O.A., Zaichik B.C., Ruzhitsky A.O. A comprehensive study of the composition of fish fat extracts and quantitative criteria for distinguishing standardized extracts of omega-3 polyunsaturated fatty acids. *Cardiology*, 2020, vol. 60, iss. 5, pp. 1–10. (In Russ.)

Ukolova N., Isaev A., Ambrosov I., Dirsch A., Kostkina E. New generation bioactivators in anti-aging treatments. *Kosmetik international*, 2018, no. 1, pp. 16–19. (In Russ.)

Volgarev M.N., Mustafina O.K., Trushina E.N. About the mechanisms of action of polyunsaturated fatty acids on the immune system. *Nutritional issues*, 2003, no. 3, pp. 35–40. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 27.11.2024

Фомичева Т.И., Колужникова Е.В. Метод газовой хроматографии для сравнительного анализа жиров природного происхождения на содержание полиненасыщенных жирных кислот // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 521–531. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.521-531

Рыбий жир природного лосося и форели разной среды обитания может значительно различаться по качественному и количественному составу полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК). Целью исследования является сравнение состава исследуемых образцов жира рыбы различных пород и ареалов обитания путем изучения их состава по массовому содержанию ПНЖК как факторов воздействия на функционирование различных систем жизнеобеспечения организма человека. Результаты эксперимента доказывают, что образцы рыбьего жира лосося и форели имеют значительные различия в качественном и количественном составе ПНЖК. В образцах жира лосося преобладают ПНЖК Омега-3, их суммарное содержание составляет 33,7%. В образцах жира форели на долю Омега-3 ПНЖК приходится только 13,3%. Отличительной чертой жира форели является высокое содержание Омега-6 ПНЖК и значительно большее – Омега-9 ПНЖК. Что касается влияния среды обитания форели, то сравнительный анализ доказывает неоспоримое преимущество рыбьего жира природной форели, где массовая доля Омега-3, Омега-6 и Омега-9 кислот составляет, соответственно, 13,3%, 19,9% и 56,7% (в «Аквакультуре» – 8,9%, 15,9% и 47,7%). Таким образом, результаты сравнительного хроматографического анализа доказывают, что исследуемые образцы рыбьего жира имеют высокое содержание триглицеридов – натуральной формы Омега-кислот, являющихся основным видом энергии для обеспечения эффективной жизнедеятельности организма человека.

Ключевые слова: рыбий жир лосося и форели, полиненасыщенные жирные кислоты, хроматографический анализ.

Fomicheva T.I., Koluzhnikova E.V. Gas chromatography method for different natural origin oils analysis for the polyunsaturated fatty acids content. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 521–531 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.521-531

Fish oil from natural salmon and trout of different habitats can differ significantly in the qualitative and quantitative composition of polyunsaturated fatty acids (PUFA). The aim of the study is to compare the composition of the investigated fish fat samples of different breeds and habitat by studying their composition by mass content of PUFA as factors of influence on the functioning of various life-support systems of the human body. The experimental results prove that salmon and trout fish oil samples have significant differences in the qualitative and quantitative composition of PUFAs. Omega-3 PUFAs predominate in salmon fat samples, their total content being 33,7%. In trout fat samples, omega-3 PUFAs account for only 13,3%. A distinctive feature of trout fat is its high content of omega-6 PUFAs and much higher content of omega-9 PUFAs. As for the influence of trout habitat, comparative analysis proves the undeniable advantage of fish oil from natural trout, where the mass fraction of Omega-3, Omega-6 and Omega-9 acids is 13,3%, 19,9% and 56,7%, respectively (in «Aquaculture» – 8,9%, 15,9% and 47,7%, respectively). Thus, the results of

comparative chromatographic analysis prove that the studied fish oil samples have a high content of triglycerides – the natural form of Omega-acids, which are the main type of energy to ensure the effective vital activity of the human body.

Keywords: salmon and trout fish oil, polyunsaturated fatty acids, chromatographic analysis.

ФОМИЧЕВА Татьяна Ивановна – доцент Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, кандидат технических наук. SPIN-код: 9615-1171.

190000, ул. Большая Морская, д. 67, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: mukhlenova@mail.ru

FOMICHEVA Tatiana I. – PhD (Technical), Associate Professor, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. SPIN-code: 9615-1171.

190000. Bolshaya Morskaya str. 67. St. Petersburg. Russia. E-mail: mukhlenova@mail.ru

КОЛУЖНИКОВА Елена Вениаминовна – доцент Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат химических наук. SPIN-код: 1402-0263.

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

KOLUZHNIKOVA Elena V. – PhD (Chemical), Associate Professor, St. Petersburg State Forestry University.

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

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	5
1. ХРОНИКА НАУЧНОЙ ЖИЗНИ	
Костюкевич Н.Г. К 100-летию кафедры химии древесины	6
Костюкевич Н.Г. Памяти Оболенской Артемиды Валентиновны (к 100-летию со дня рождения)	18
2. ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО	
Кабонен А.В., Рязанцев П.А., Суханов Ю.В., Кувшинов Д.А. Изучение структуры корневой системы дерева методом 3D-сканирования	23
Трошин Д.С., Мирин Д.М. Влияние сохранения <i>Populus tremula</i> на вырубках ельников кисличных на динамику древесных компонентов в течение 15 лет	37
Сергеева А.С. Формирование елового подроста в зависимости от парцеллярной структуры в спелых сосново-еловых древостоях Гатчинского района Ленинградской области	55
Чэн Тун, Грязькин А.В., Калайджян Э.Р. Влияние густоты древостоя и сомкнутости крон на видовой состав сырьевых растений в сосновках	69
Стешин И.С., Петухов И.В. Машинное обучение без учителя на основе вегетационных индексов и спектров отражения в задаче классификации деревьев	89
Гибадуллин Н.Ф., Зайцев Д.А., Бачериков И.В., Мусин Х.Г., Мирсиянов Н.И., Галимуллин А.Ф. Особенности формирования плотности древесины сосновок (<i>Pinus sylvestris</i> L.) на постагротических почвах Республики Татарстан	103
Николаева М.А., Гузюк М.Е., Баранов Н.И., Жигунов А.В. Изучение географической изменчивости в двух поколениях культур ели в Ленинградской области	118
Алексеев А.С., Ветров Л.С., Никифоров А.А. Лесоклиматический проект «Борьба с лесными пожарами»: проблемы обоснования, углеродная эффективность, риски и неопределенности (на примере Красноярского края)	142
Демаков Ю.П., Шарапов Е.С., Краснов В.Г., Королев А.С., Нуреева Т.В. Обоснование целесообразности создания плантаций сосны обыкновенной на суглинистых почвах Республики Марий Эл	162
Котельников Р.В., Шварц Е.А. Совершенствование охраны лесов от пожаров в свете последних изменений, внесенных в Лесной кодекс Российской Федерации	181
Новикова Т.П., Ребко С.В., Петрищев Е.П., Новиков А.И. Ранний рост культур (<i>Pinus sylvestris</i> L. Var. Negorelskaya), полученных из семян с известными спектрометрическими и морфометрическими параметрами	196
Трубачева Т.А., Цымбал Г.С. Исследование видового состава некультивируемых трав в газонных сообществах объектов насаждений Санкт-Петербурга и Ленинградской области	225
Добровольский А.А. Анализ текущего состояния исследований в области лесной политики в России: социологический и сравнительный подходы	239
3. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ЛЕСОЗАГОТОВОВОК	
Власов Е.Н. Уравнения динамики транспортного робота для лесопромышленного комплекса	253

Говядин И.К., Чубинский А.Н. Распознавание древесных пород на основе анализа изображений	262
Гнусов М.А., Платонов А.А., Дручинин Д.Ю. Моделирование объёма вороха волочения порубочных остатков, формируемого лесными граблями	277
Шанин И.И., Штандин А.А. Эффективность применения типовых и инновационных разработок в области профилактики и тушения лесных пожаров	292
Сиваков В.В., Заикин А.Н. Совершенствование работы лесозаготовительных машин в условиях внедрения цифровых технологий	320
Трубников В.В., Марков В.А., Ганин С.В., Блиннов С.А., Левитский А.М., Трофимов А.В., Зверев И.А. Анализ коррозионной стойкости порошковых покрытий для защиты деталей лесных машин	336
4. ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ, ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЕРЕВОПЕРЕРАБОТКИ	
Елисеев С.Г., Дук Д.В., Ермолин В.Н. Формирование искусственной текстуры древесины лиственных рассеянно-сосудистых пород за счет лазерной перфорации	357
Богомолов А.А., Молодых Е.И., Галкина Е.А., Куницкая О.А., Хохлов А.А., Пушкиов Ю.Л., Горюнов Н.Д., Андронов А.В., Хитров Е.Г. Разработка модели глубокого обучения для распознавания коры древесины на снимке поперечного распила	375
Мохирев А.П., Храмов И.В., Гузоватова А.Д. Теоретическое обоснование акустических полостей в конструкции деревянных плит	390
Федяев А.А. Определение видов пиломатериалов (радиальные, тангенциальные)	403
Бирман А.Р., Угрюмов С.А. Производство заготовок для торцовых шашек методом раскалывания	417
5. ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ. БИОТЕХНОЛОГИЯ	
Зайцев А.В., Дубовый В.К., Ковернинский И.Н., Симонова Е.И. Исследование качества полимерпесчаных плит с использованием отходов макулатуры МС-5Б и МС-6Б как эффективного связующего	428
Албаррам Ф., Балыбердин К.И., Казаков Я.В. Свойства сульфатной целлюлозы высокого выхода из ветвей осины как волокнистого полуфабриката для производства компонентов гофрокартона	443
Школьников Е.В. Влияние полиморфизма и дисперсности диоксида циркония на растворимость в кислых и щелочных средах	458
Мозгущин М.А., Епифанов А.В. Нормирование сбросов сточных вод ЦБК	473
Артёмов А.В., Вураско А.В., Шкуро А.Е., Бурындик В.Г. Исследование санитарно-химических показателей загрязнения почв продуктами биоразложения пластика без связующего на основе недревесного растительного сырья	489
Гораздова В.В., Дернова Е.В., Дулькин Д.А. Анализ влияния размола коротковолокнистой фракции на показатели качества макулатурного тарного картона	511
Фомичева Т.И., Колужникова Е.В. Метод газовой хроматографии для сравнительного анализа жиров природного происхождения на содержание полиненасыщенных жирных кислот	521
	533

CONTENTS

Preface	5
1. CHRONICLE OF SCIENTIFIC LIFE	
<i>Kostyukevich N.G.</i> On the 100th Anniversary of the Department of Wood Chemistry	6
<i>Kostyukevich N.G.</i> In memory of Artemida Valentinovna Obolenskaya (on the 100th anniversary of her birth)	18
2. FORESTRY	
<i>Kabonen A.V., Ryazantsev P.A., Sukhanov Yu.V., Kuvshinov D.A.</i> Study of the structure of the tree root system using 3D scanning	23
<i>Troshin D.S., Mirin D.M.</i> Impact of <i>Populus tremula</i> conservation on the dynamics of tree components of 15-year clearcuts	37
<i>Sergeeva A.S.</i> Formation of spruce undergrowth depending on the parcel structure in mature pine-spruce stands of the Gatchina district of the Leningrad region	55
<i>Cheng Tun, Gryazkin A.V., Kalaidzhyan E.R.</i> Influence of tree density and crown closure on the species composition of raw materials in pine forests	69
<i>Steshin I.S., Petukhov I.V.</i> Unsupervised machine learning based on vegetation indices and reflectance spectra for tree classification	89
<i>Gibadullin N.F., Zaytsev D.A., Bacherikov I.V., Musin H.G., Mirsiyapov N.I., Galimullin A.F.</i> Features of wood density formation in pine forests (<i>Pinus sylvestris</i> L.) on postagrogenic soils of the republic of Tatarstan	103
<i>Nikolaeva M.A., Guzyuk M.Ye., Baranov N.I., Zhigunov A.V.</i> Study of geographical variability in two generations of spruce culture in the Leningrad region	118
<i>Alekseev A.S., Petrov L.S., Nikiforov A.A.</i> Forest-climatic project on forest fire control: problems of justification, carbon efficiency, risks and uncertainties (on the example of the Krasnoyarsk region)	142
<i>Demakov Yu.P., Sharapov E.S., Krasnov V.G., Korolev A.S., Nureeva T.V.</i> Justification of the feasibility of creating Scots pine plantations on loamy soils of the Mari El Republic	162
<i>Kotelnikov R.V., Shvarts E.A.</i> Improving forest fire protection in the light of recent amendments to the Forest code of the Russian Federation	181
<i>Novikova T.P., Rabko S.U., Petrishchev E.P., Novikov A.I.</i> Early growth of seedling (<i>Pinus sylvestris</i> L. var. Negorelskaya) obtained from seeds with known spectrometric and morphometric features	196
<i>Trubacheva T.A., Tsymbal G.S.</i> Investigation of the species composition of uncultivated herbs in lawn communities of planting sites in St. Petersburg and the Leningrad region	225
<i>Dobrovolsky A.A.</i> Analysis of the Current State of Research in the Field of Forest Policy in Russia: Sociological and Comparative Approaches	239
3. TECHNOLOGY AND EQUIPMENT OF LOGGING INDUSTRIES	
<i>Vlasov E.N.</i> Equations of dynamics of a transport robot for the timber industry	253

Govyadin I.K., Chubinsky A.N. Recognition of tree species based on image analysis	262
Gnusov M.A., Platonov A.A., Druchinin D.Yu. Modeling the volume of a heap of logging residue drag formed by a forest rake	277
Shanin I.I., Shtondin A.A. Efficiency of application of standard and innovative developments in the field of prevention and extinguishing of forest fires	292
Sivakov V.V., Zaikin A.N. Improving the operation of forestry machines under the conditions of digital technologies implementation	320
Trubnikov V.V., Markov V.A., Ganin S.V., Blinov S.A., Levitsky A.M., Trofimov A.V., Zverev I.A. Analysis of corrosion resistance of powder coatings for protection of forestry machine parts	336
4. WOOD SCIENCE. MECHANICAL WOODWORKING INDUSTRY	
Eliseev S.G., Duk D.V., Ermolin V.N. Formation of artificial wood texture of deciduous diffuse vascular rocks due to laser perforation	357
Bogomolov A.A., Molodykh E.I., Galkina E.A., Kunitskaia O.A., Khokhlov A.A., Pushkov Y.L., Goryunov N.D., Andronov A.V., Khitrov E.G. Developing a deep learning model for recognizing wood bark in a cross-section image ..	375
Mokhirev A.P., Khramov I.V., Guzovatova A.D. Theoretical substantiation of acoustic cavities in the construction of wooden slabs	390
Fedyayev A.A. Definition of types of lumber (radial, tangential)	403
Birman A.R., Uglyumov S.A. Production of blanks for end pieces by splitting	417
5. CHEMICAL TECHNOLOGY OF WOOD. BIO TECHNOLOGY	
Zaitsev A.V., Dubovy V.K., Koverninsky I.N., Simonova E.I. Quality study of polymer-sanded slabs using MS-5B and MS-6B waste paper as an effective binder ...	428
Albarram Fatima, 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	443
Shkol'nikov E.V. The influence of polymorphism and dispersity of zirconium dioxide on solubility in acidic and alkaline media	458
Mozgushin M.A., Epifanov A.V. Standardization of wastewater discharges from pulp and paper mills	473
Artyomov A.V., Vurasko A.V., Shkuro A.E., Buryndin V.G. Investigation of sanitary and chemical indicators of soil pollution by biodegradation products of plastic without resins based on non-wood plant raw materials	489
Gorazdova V.V., Dernova E.V., Dulkin D.A. Analysis of the influence of grinding the short-fiber fraction on the quality indicators of waste containerboard	511
Fomicheva T.I., Koluzhnikova E.V. Gas chromatography method for different natural origin oils analysis for the polyunsaturated fatty acids content	521

Научное издание

ИЗВЕСТИЯ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОЙ
ЛЕСОТЕХНИЧЕСКОЙ
АКАДЕМИИ

Выпуск 255

Издаются с 1886 года

Редактор В.Н. Добронравина

Компьютерная верстка Е.А. Корнуковой

Подписано в печать с оригинал-макета 03.11.2025. Выход в свет 26.11.2025. Формат 150*210.
Печать цифровая. Уч.-изд. л. 33.5. Печ. л. 33,5. Тираж 500 экз. Заказ № 111 С 223. Свободная цена

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет
имени С.М. Кирова

Издательско-полиграфический отдел СПбГЛТУ
194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., 5, литер У