

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 252

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, 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. Евтигион, 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. Пронович, д-р биол. наук, Академия Або,

В.Г. Санасев, 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. Ярмишко, д-р биол. наук, проф., СПбГЛТУ, БИН РАН

Адрес редакции, издателя,

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

Факс: (812) 670-93-90.

Сайт издания: izvestiya.spbta@mail.ru

E-mail: izvestiya.spbta@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. 252. Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2025. – 400 с. – ISBN 978-5-9239-1516-7, ISSN-р: 2079-4304, ISSN-е: 2658-5871.

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

Темплан 2025 г. Изд. № 212

ISBN 978-5-9239-1516-7

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 252

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, 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. Evtuginin, 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. Ignatieve, PhD, University of Western Australia (Perte),

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

S.S. Makarov, DSc (Agriculture), Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural,

M.Yu. Mandelshtam, DSc (Biology), St. Petersburg State Forest Technical University,

D.L. Musolin, DSc (Biology), European and Mediterranean Plant Protection Organization (France),

V.Yu. Neshataev, DSc (Biology), St. Petersburg State Forest Technical University,

V.N. Petrov, DSc (Economics), St. Petersburg State Forest Technical University,

E.K. Potokina, DSc (Biology), St. Petersburg State Forest Technical University,

A.V. Pranovich, PhD, Åbo Akademi University (Turku),

V.G. Sanaev, DSc (Technical), Bauman Moscow State Technical University (Moscow),

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

A.P. Sokolov, DSc (Technical), Petrozavodsk State University (Petrozavodsk),

S.A. Ugryumov, DSc (Technical), St. Petersburg State Forest Technical University,

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

D.M. 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 Lesotehniceskoj Akademii: Iss. 252. Saint-Petersburg.: SPbFTU, 2025. – 400 p. – ISBN 978-5-9239-1516-7, ISSN-p: 2079-4304, ISSN-e: 2658-5871.

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

Templan 2025 r. Izd. N 212

ISBN 978-5-9239-1516-7

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

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

ПРЕДИСЛОВИЕ

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

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

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

Редакция

1. ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

УДК 631.527.5

**С.А. Егоров, С.Н. Крючков, А.В. Солонкин, А.С. Соломенцева,
Д.А. Горбушова**

ПОДБОР ОСНОВНЫХ ДРЕВЕСНЫХ ВИДОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ОБЪЕКТОВ ПОСТОЯННОЙ ЛЕСОСЕМЕННОЙ БАЗЫ В ЗАСУШЛИВОЙ ЗОНЕ

Введение. В последнее время в освоении и характере использования лесов происходят существенные изменения, ставятся новые задачи в области ведения лесного хозяйства, из которых основной является повышение продуктивности лесных насаждений [Стратегия..., 2023]. При исследовании формового разнообразия видов особое внимание уделяется изучению лесоводственных особенностей и физиологических свойств насаждений [Крючков, Стольнов, 2018]. В засушливых условиях к настоящему времени оказывается потерянным генетический потенциал главных лесных пород [Справочник..., 1984]. Вследствие этого лучшие биотипы, сформировавшиеся в результате длительного естественного отбора, следует сохранять и размножать для создания базы селекционных работ с основными древесно-кустарниковыми видами. Как известно из многочисленных опытов, в большинстве случаев семена местного происхождения дают лучшие результаты в сравнении с семенами инорайонного происхождения [Агролесомелиорация, 2006]. В связи с этим производство лесных семян должно предусматривать отбор и инвентаризацию плюсовых насаждений как источника улучшенного семенного материала и получения прививочного для создания семенных плантаций путем как семенного, так и вегетативного размножения [Беляев и др., 2023]. Потомство большинства отобранных по признакам хорошего роста и развития растений сохраняет все свойства родительских форм [Царев, 1977]. Отобранные и проверенные по семенному потомству плюсовые насаждения должны быть использованы при создании семенных плантаций – семейственных (при семенном размножении) и клоновых (при вегетативном размножении). При этом подбор

лучшего генофонда должен осуществляться в категории плюсовых насаждений, отличающихся прямовольностью, полнодревесностью, отсутствием раздвоения стволов, хорошим очищением ствола от сучьев, продуктивностью биомассы¹. Работы по выявлению и сбережению оставшихся лучших насаждений и лучших древесно-кустарниковых видов в них вос требованы для создания на их базе правильного семеноводства, что особенно актуально в условиях изменяющихся почвенно-климатических условий и сокращения площади существующих насаждений [Научно-методические..., 2022].

Цель исследований – выделение древесных видов путем селекционной инвентаризации по степени адаптации к местным природно-климатическим условиям, а также по биометрическим показателям для создания селекционно-семеноводческих объектов в засушливых условиях.

Материалы и методика исследования. Исследования насаждений проводились в Кировском селекционно-семеноводческом комплексе (координаты участка 48.588595, 44.414432) (рис. 1).

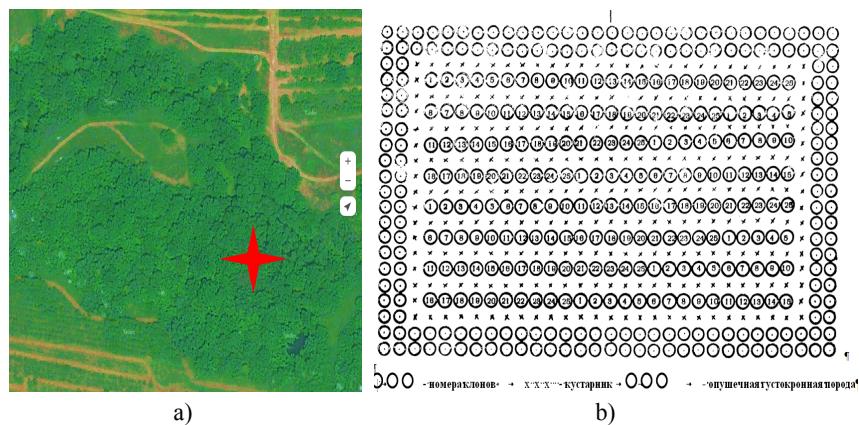


Рис. 1. а) общий вид исследованного участка; б) регулярная схема размещения видов в семенной плантации (5×10 м)

Fig. 1. a) general view of the studied area; b) regular layout of the species in the seed plantation (5×10 m)

¹ Приказ Минприроды России от 20 октября 2015 № 438 «Об утверждении Правил создания и выделения объектов лесного семеноводства (лесосеменных плантаций, постоянных лесосеменных участков и подобных объектов)».

Объектами исследований являлись следующие виды: робиния псевдоакация (*Robinia pseudoacacia* L.), боярышник обыкновенный (*Crataegus laevigata* (Poir.) DC.), гледичия трехколючковая (*Gleditsia triacanthos* L.), клен татарский (*Acer tataricum* L.), клен ясенелистный (*Acer negundo* L.), груша лесная (*Pyrus communis* ssp. *pyraster* (L.) Ehrh.), алыча (*Prunus cerasifera* Ehrh.), дуб черешчатый (*Quercus robur* L.), ирга канадская (*Amelanchier canadensis* (L.) Medik.), сосна крымская (*Pinus nigra* ssp. *pallasiana* (Lamb.) Holmboe), вяз листоватый (*Ulmus minor* Mill.), смородина золотая (*Ribes aureum* Pursh), шелковица белая (*Morus alba* L.), абрикос обыкновенный (*Prunus armeniaca* L.), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), жимолость каприфоль (*Lonicera caprifolium* L.), лох узколистный (*Elaeagnus angustifolia* L.), аморфа кустарниковая (*Amorpha fruticosa* L.) – различных ареалов.

При обследовании посадок учитывали следующие показатели: распускание листвы (полное), заложение верхушечной почки (окончание роста), пожелтение листвы (листопад). Устойчивость к зимним повреждениям оценивали по 4-балльной шкале [Спирина, 1961]: 4 балла – обмерзание отсутствует, прирост идет из верхушечной почки; 3 балла – обмерзание менее половины побегов предыдущего года; 2 балла – обмерзание более половины побега, но не всего побега; 1 балл – обмерзание всего побега, возобновление порослью из корневой шейки; 0 баллов – растение полностью вымерзло. При отборе лучших видов учитывалось время отбора, количество отобранных растений, место их посадки, хорошее развитие стеблей и корневой системы (метод сухой раскопки), сравнительно более ранняя закладка верхушечной почки и пожелтение листвы, отсутствие повреждений во время периода засухи. Действие засухи на растения определялось по следующим признакам [Спирина, 1961]: 0 баллов – отсутствие повреждений; 1 балл – завядание листвы с потерей тurgора; 2 балла – завядание и засыхание части листвы; 3 балла – массовое засыхание листьев; 4 балла – усыхание побегов; 5 баллов – усыхание всего растения. Цветение и плодоношение оценивали по следующей шкале [Спирина, 1961]: 00 – растение регулярно цветет, но не плодоносит; 0 – растение цветет спорадически, нерегулярно, не плодоносит; X – растение плодоносит редко и слабо; XX – растение регулярно плодоносит. Путем систематического осмотра насаждений отмечались сроки наступления основных фенологических фаз развития [Методика..., 1975]. В конце вегетационного периода у всех растений проводились обмеры общей высоты, прироста за последний год, развития кроны (С-Ю, З-В). Статистическую обработку проводили в программах Excel, BioStat, Statistica.

Результаты исследования. Правильный отбор пород для создания лесосеменных плантаций является одним из основных условий, которые могут обеспечить устойчивость и долговечность лесных насаждений. Главные породы обеспечивают наибольшую высоту насаждений и их защитное действие, кустарники затеняют почву в целях борьбы с сорными травами, снижают скорость ветра, усиливают плотность посадки. Быстрорастущие породы устойчивы в засушливых условиях климата и почвы, обладают способностью давать естественное семенное или порослевое возобновление (рис. 2).

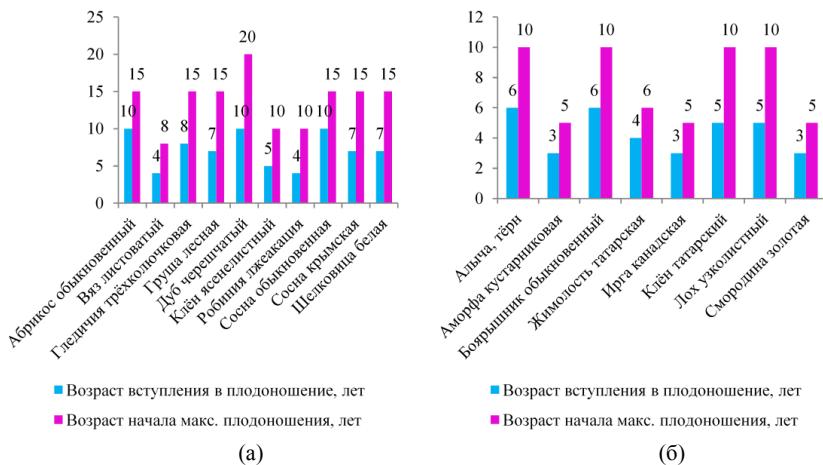


Рис. 2. Возраст вступления в фазу плодоношения и максимального плодоношения в засушливых условиях: (а) древесных видов, (б) кустарниковых видов

Fig. 2. The age of entry into the fruiting phase and maximum fruiting in arid conditions: (a) woody species, (b) shrub species

Кустарниковые породы успешно могут произрастать в сложных почвенно-грунтовых условиях, при этом также являясь засухоустойчивыми и солеустойчивыми. Ценные плоды дают смородина золотая и ирга, хорошей семенной продуктивностью отличаются лох и алыча. Из древесных видов глубокая корневая система дуба черешчатого способна использовать влагу и питательные вещества нижних горизонтов почвы. Единственным его недостатком является медленный рост в первые 3-4 года жизни, это требует тщательного ухода и предохранения его от верхнего затенения другими породами, поэтому дуб не высаживают близко к быстрорастущим деревьям. Его семенная продуктивность гораздо выше, чем у остальных обследуемых.

емых растений. Согласно приказу Минприроды России от 20.10.2015 № 438 «Об утверждении Правил создания и выделения объектов лесного семеноводства (лесосеменных плантаций, постоянных лесосеменных участков и подобных объектов)» возраст дуба в насаждениях для формирования постоянных лесосеменных участков должен составлять в культурах не более 20 лет, в естественных насаждениях – не более 60 лет. Сомкнутость крон не должна превышать 0,6–0,7.

По итогам обследования семенные потомства плюсовых насаждений и виды, формы и породы фильтрующих лесных полос не уступают контрольным по показателям плодоношения и могут быть использованы для заготовки семян в целях воспроизводства лесных насаждений (рис. 3).

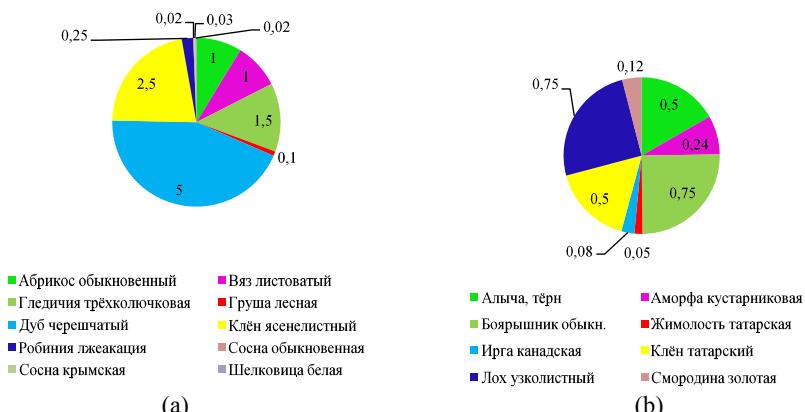


Рис. 3. Семенная продуктивность одного растения (кг):
(а) древесных видов; (б) кустарниковых видов

Fig. 3. Seed productivity of one plant (kg): (a) woody species; (b) shrub species

Широкое применение в защитных лесных насаждениях засушливого региона находит вяз листоватый. Он является одной из самых засухоустойчивых пород, отлично возобновляется порослью, дает обильные корневые отпрыски, что ограничивает его использование в полосных насаждениях. Высокой урожайностью отличаются клен ясенелистный, абрикос, гледичия. Груша лесная менее требовательна к почвенно-грунтовым условиям, чем яблоня, успешно растет на светло-каштановых почвах, переносит засоление. Из кустарников максимальной урожайностью в лесосеменной плантации отличаются лох, алыча, боярышник обыкновенный (рис. 4).

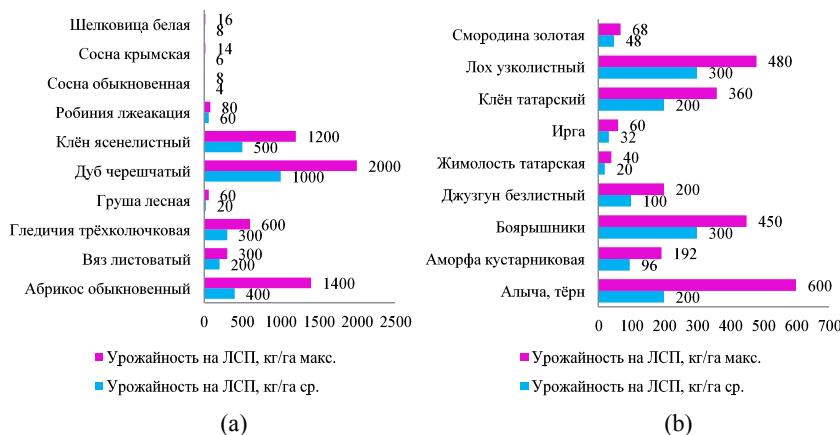


Рис. 4. Урожайность на лесосеменной плантации, (кг/га):

(a) древесных видов; (b) кустарниковых видов

Fig. 4. Yield on a forest seed plantation (kg/ha):

(a) woody species; (b) shrub species

На качестве культур также может сказываться их эдафическое происхождение. Состояние видов в коллекции оценивалось по сохранности, интенсивности роста, репродукционным показателям. Многие интродуцированные древесные виды адаптировались в экстремальных условиях засушливого региона и сформировали устойчивые искусственные популяции. Например, робиния псевдоакация успешно интродуцирована и нашла широкое применение в защитном лесоразведении южных районов региона благодаря быстрому росту, высоким мелиоративным свойствам, ценной древесине, лёгкости размножения, мёдопродуктивности, почвоулучшающим свойствам. Выделены группы растений по продолжительности роста. Необмерзающие (зимостойкие) отличаются коротким периодом роста, обмерзающие – наоборот. Интенсивное цветение и плодоношение наблюдалось у смородины золотой, боярышника обыкновенного, шелковицы белой, облепихи крушиновидной. У остальных видов плодоношение было средним. При правильной организации семенного дела и соответствующем уходе в засушливой зоне можно заготовить семян робинии до 20 кг, боярышника – до 150 кг, ирги до 70 кг, смородины золотой до 20 кг. Эти насаждения могут служить семенным фондом широкого ассортимента древесных и кустарниковых пород (табл. 1).

Таблица 1

**Отношение древесно-кустарниковых видов
к лимитирующему факторам среды**

The ratio of tree and shrub species to limiting environmental factors

Вид	Количество растений по баллам зимостойкости					Засухо- устойчи- вость, балл	Средний балл зимостой- кости	Цветение и плодо- ношение, балл
	0	1	2	3	4			
Робиния псевдоакация	1	9	0	0	0	0	3,1	XX
Абрикос обыкновенный	1	9	0	0	0	0	3,1	X
Гледичия трехколючковая	3	4	0	0	0	0	3,4	X
Дуб черешчатый	8	3	0	0	0	0	3,7	X
Клен татарский	5	2	0	0	0	0	3,7	X
Клен ясенелистный	4	5	1	2	3	1	2,7	XX
Шелковица белая	0	25	0	0	0	0	3,0	XX
Алыча	10	16	0	0	0	0	3,6	X
Боярышник обыкновенный	0	0	6	10	0	1	3,8	XX
Груша лесная	0	0	0	15	0	0	3,9	X
Ирга канадская	0	3	0	12	0	0	4,0	X
Сосна крымская	0	0	0	7	0	0	4,0	X
Вяз листоватый	0	0	0	8	0	0	4,0	X
Смородина золотая	0	0	0	12	0	0	4,0	XX
Сосна обыкновенная	0	0	0	8	0	1	4,0	X
Жимолость киприфоль	9	3	0	0	0	0	3,2	X
Лох узколистный	0	0	0	16	2	0	3,1	X
Аморфа кустарниковая	4	3	0	12	0	0	4,0	X
Среднее	2,50	4,55	0,38	5,66	0,27	0,16	3,57	
Стандартное отклонение	3,43	6,64	1,42	6,01	0,82	0,38	0,43	
Дисперсия	5,0	1,33	2,01	1,2	0,68	0,14	0,09	
Коэффициент вариации	1,37	1,45	3,65	1,06	2,97	2,30	0,12	

У робинии псевдоакации также были выделены ценные морфологические формы – пирамидальная и мачтовая. Но их недостаток – слабая завязываемость плодов и низкая зимостойкость. Однако по таксационным показателям и мелиоративным свойствам они имеют значительное преимущество перед типичными растениями, которое может быть реализовано только в пределах границ их надёжного выращивания (табл. 2).

Таблица 2

Биометрические показатели главных и сопутствующих пород для ЛСП**Biometric indicators of the main and related breeds for FSP**

Вид	Высота, см			Средний прирост, см
	Макс.	Сред.	Мин.	
Робиния псевдоакация	305	199	161	79
Боярышник обыкновенный	281	249	220	60
Гледичия трехколючковая	320	280	160	85
Клен татарский	200	162	140	78
Клен ясенелистный	150	137	125	67
Груша лесная	350	307	250	55
Алыча	285	256	220	73
Дуб черешчатый	340	311	265	77
Ирга канадская	250	209	180	50
Сосна крымская	380	349	335	18
Вяз листоватый	380	220	200	98
Смородина золотая	195	158	100	39
Шелковица белая	190	162	360	75
Абрикос обыкновенный	310	290	145	78
Сосна обыкновенная	460	370	319	67
Жимолость киприфоль	284	258	230	42
Лох узколистный	320	267	130	71
Аморфа кустарниковая	183	167	151	34
Среднее	286,94	244,23	207,64	62,76
Стандартное отклонение	84,09	70,57	77,84	20,64
Дисперсия	0,23	0,22	0,31	0,23
Коэффициент вариации	0,29	0,28	0,37	0,32

Обсуждение. Семенные базы создаются для получения селекционно улучшенных и сортовых семян, обладающих наследственно закреплёнными цennыми признаками. Для данной цели предлагается схема, не затрагивающая стратегических целей перевода лесовыращивания на сортовую основу, но учитывающая современное состояние селекционно-семеноводческих работ для защитного лесоразведения, а также недоработки, допущенные при разработке предыдущих регламентирующих документов и выявляемые в процессе их практической реализации. Она рассчитана, во-первых, на решение текущих задач по формированию местной семенной базы с целью массового получения в кратчайшие сроки семян селекционной категории «улучшенные», во-вторых, на создание объективных предпосылок для последующего перехода к сортовому семеноводству (табл. 3).

Таблица 3

Предложения по совершенствованию региональной системы создания и использования селекционно-семеноводческих объектов для защитного лесоразведения

Proposals for improving the regional system for the creation and use of breeding and seed facilities for protective afforestation

Категория селекционно-семеноводческого объекта	Цель отбора и создания
Плюсовые насаждения	Выделяют в качестве семенных (селекционных) заказников. В практическом семеноводстве пока не используются
Плюсовые деревья	Отбирают для закладки ПЛСУ, ЛСП, архивов клонов, испытательных культур
Постоянный лесосеменной участок	Создают смесью семенных потомств плюсовых деревьев (не менее чем от 50 шт.). Получают улучшенные семена
Лесосеменная плантация первого порядка	Создают преимущественно семенными потомствами плюсовых деревьев (не менее чем от 50 шт.) с соблюдением схем размещения семей. Получают улучшенные семена; используют для оценки плюсовых деревьев по потомству
Архивы клонов	Создают с целью сохранения отобранного генофонда плюсовых деревьев и изучения их лесоводственно-биологических особенностей и репродуктивных свойств

Окончание табл. 3

Категория селекционно-семеноводческого объекта	Цель отбора и создания
Испытательные культуры потомств плюсовых деревьев	Создают для предварительной оценки плюсовых деревьев по семенному потомству. Контроль отсутствует. По достижении II класса возраста отбраковывают 25–40% худших материнских деревьев, остальные используют для закладки ЛСП повышенной генетической ценности
Лесосеменная плантация повышенной генетической ценности (ЛСП ПГЦ)	Создают исключительно клонами плюсовых деревьев, отобранных по результатам комплексной предварительной оценки их семенных и вегетативных потомств в испытательных культурах и архивах клонов. Получают улучшенные семена. Целесообразно введение категории «семена повышенной генетической ценности»
Испытательные культуры семенных потомств ЛСП ПГЦ	Создают для выделения лучших ЛСП ПГЦ в качестве синтетических сортов-популяций. Срок испытания – 30–40 лет. Контроль – культуры из семян популяционной заготовки
Лесосеменная плантация второго порядка	Создают исключительно наборами клонов синтетических сортов-популяций. Получают сортовые семена

В связи с тем, что на ПЛСБ, создаваемых улучшенным по наследственным свойствам посадочным материалом, так же, как на семейственных ЛСП, получают семена одной и той же селекционной категории – «улучшенные», целесообразно на данном этапе отдавать предпочтение закладке ПЛСБ, как более простому и доступному для производства способу. Выбор категории создаваемого лесосеменного объекта – ПЛСБ или семейственная ЛСП – определяется хозяйствующим субъектом исходя из квалификации исполнителей и производственных возможностей.

Заключение. В селекционной работе применяются методы группового (популяционного) и индивидуального отбора, каждый из которых имеет преимущества и недостатки. Из-за отсутствия естественных лесов в аридной зоне отбор плюсовых деревьев проводится в искусственных насаждениях, прошедших неоднократное воздействие экстремальных ситуаций. Критерием отбора генофонда для лесомелиоративных целей в аридной зоне является жизнеспособность древесных видов – их засухо-, соле- и морозоустойчивость, устойчивость к вредителям и болезням при хороших показателях роста и репродукционного развития. Ценным селекционным

материалом для защитного лесоразведения являются также отдельные биотипы с уникальными формами крон, обеспечивающие высокий мелиоративный эффект. На основе разностороннего изучения биологических и морфологических свойств выделенных деревьев проводится их интегральная оценка по всем хозяйственно ценным признакам. Наиболее ценные из них используются для создания лесосеменных баз и плантаций. Наблюдения за древесно-кустарниковыми видами установили, что большинство из них отлично переносят засушливые условия и имеют хорошее развитие и рост. По отношению к лимитирующим факторам среды исследуемые растения расположились в следующем порядке: 1 группа – ирга канадская, сосна крымская, вяз листоватый, смородина золотая, аморфа кустарниковая; 2 группа – боярышник алтайский, клен татарский, алыча, дуб черешчатый, груша лесная; 3 группа – робиния псевдоакация, абрикос обыкновенный, гледичия трехколючковая, шелковица белая, жимолость каприфоль, лох узколистный. По росту и величине приростов побегов к 1 группе относятся робиния псевдоакация, клен татарский, груша лесная, дуб черешчатый, вяз листоватый, абрикос обыкновенный, сосна обыкновенная, сосна крымская, лох узколистный; ко 2 группе – боярышник обыкновенный, алыча, ирга канадская, жимолость каприфоль; в 3 группу входят смородина золотая, аморфа кустарниковая.

Отмечено, что у отдельных видов годичные побеги полностью не вызревают и частично подмерзают в зимний период, но независимо от этого они имеют достаточную высоту, ежегодно плодоносят и могут быть использованы в защитных посадках, озеленении населенных пунктов и технических целях. Исследованиями установлено, что высокопродуктивные лесные культуры дуба и сосны и долговечные защитные лесные насаждения из этих пород возможно создать только из селекционного улучшенного посевного материала, полученного от продуктивных генотипов ценных биотипов, адаптированных к местным условиям, и создание ПЛСБ по улучшенной схеме является наиболее удобным, простым и доступным для производства способом.

Вклад авторов. Егоров С.А. – проведение сравнительного анализа, обобщение результатов исследования, формулировка выводов; Крючков С.Н. – обоснование концепции исследования (формулирование идеи, исследовательских целей и задач); Солонкин А.В. – создание модели исследования, анализ и систематизация экспериментальных данных; Соломенцева А.С. – обобщение результатов исследования, формулировка выводов, интерпретация результатов исследования; Горбушова Д.А. – анализ и обобщение данных литературы, сбор данных литературы, создание метаданных.

Сведения о финансировании исследования. Работа выполнена в рамках Государственного задания № FNFE-2025-0009 «Создание новых генотипов, сортов, форм древесных, кустарниковых, культурных растений с высокоценными признаками продуктивности, качества, устойчивостью к био- и абиострессорам с использованием классических и современных методов селекции, новые инновационные технологии в питомниководстве и семеноводстве, для решения задач по предотвращению деградации и опустынивания агроландшафтов в условиях изменяющегося климата».

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Агролесомелиорация / под ред. А.Л. Иванова, К.Н. Кулика. 5-е изд., перераб. и доп. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2006. 746 с.

Беляев А.И., Крючков С.Н., Пугачёва А.М., Солонкин А.В., Соломенцева А.С., Егоров С.А., Романенко А.К., Горбушова Д.А. Селекционный фонд древесно-кустарниковых видов для лесомелиоративных комплексов и озеленения в засушливых условиях (научно-методические рекомендации). Волгоград: ФНЦ агробиологии РАН, 2023. 48 с.

Крючков С.Н., Стольнов А.С. Стратегия сортового семеноводства для искусственного лесоразведения в экстремально засушливых условиях // Научно-агрономический журнал. 2018. № 2 (103). С. 48–50.

Методика фенологических наблюдений в ботанических садах СССР / сост. И. Лапин. М., 1975. 27 с.

Научно-методические указания по сортовому семеноводству деревьев и кустарников для лесомелиорации аридных территорий: научно-методические рекомендации. Волгоград: ФНЦ агробиологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, 2022. 52 с.

Спирин Т.А. Размножение и внедрение гибридов в дендросад станции. Куйбышев, 1961. 66 с.

Справочник агролесомелиоратора. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 248 с.

Стратегия развития защитного лесоразведения в Российской Федерации до 2035 года. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2023. 40 с.

Царев А.П. Методика сортоиспытания лесных пород. Воронеж: ЦНИИЛГиС, 1977. 41 с.

References

Agroforestry / ed. by A.L. Ivanov, K.N. Kulik. 5th ed., reprint. and add. Volgograd: All-Russian SRI of Agroforestry, 2006. 746 p. (In Russ.)

Belyaev A.I., Kryuchkov S.N., Pugacheva A.M., Solonkin A.V., Solomentseva A.S., Egorov S.A., Romanenko A.K., Gorbushova D.A. Breeding fund of tree and shrub

species for forest reclamation complexes and landscaping in arid conditions (scientific and methodological recommendations). Volgograd: Federal Research Center of Agroecology of the Russian Academy of Sciences, 2023. 48 p. (In Russ.)

Handbook of agroforestry. M.: Lesn. prom-st', 1984. 248 p. (In Russ.)

Kryuchkov S.N., Stol'nov A.S. Strategy of varietal seed production for artificial afforestation in extremely arid conditions. *Scientific and agronomic Journal*, 2018, no. 2 (103), pp. 48–50. (In Russ.)

The methodology of phenological observations in the botanical gardens of the USSR / comp. I. Lapin, M., 1975. 27 p. (In Russ.)

Scientific and methodological guidelines on varietal seed production of trees and shrubs for forest reclamation of arid territories: scientific and methodological recommendations. Volgograd: Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, 2022. 52 p. (In Russ.)

Spirina T.A. Reproduction and introduction of hybrids into the arboretum of the station. Kuybyshev, 1961. 66 p. (In Russ.)

The strategy for the development of protective afforestation in the Russian Federation until 2035. Volgograd: All-Russian SRI of Agroforestry, 2023. 40 p. (In Russ.)

Tsarev A.P. Method of variety testing of forest species. Voronezh: Central SRI of Forest Genetics and Selection, 1977. 41 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 05.04.2024

Егоров С.А., Крючков С.Н., Солонкин А.В., Соломенцева А.С., Горбушова Д.А. Подбор основных древесных видов для создания объектов постоянной лесосеменной базы в засушливой зоне // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 252. С. 6–21. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.6-21

В статье приведены данные по обследованию лесных насаждений с участием робинии псевдоакации (*Robinia pseudoacacia* L.), боярышника обыкновенного (*Crataegus laevigata* (Poir.) DC.), гледичии трехколючковой (*Gleditsia triacanthos* L.), клена татарского (*Acer tataricum* L.), клена ясенелистного (*Acer negundo* L.), груши лесной (*Pyrus communis* ssp. *pyraster* (L.) Ehrh.), алычи (*Prunus cerasifera* Ehrh.), дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), ирги канадской (*Amelanchier canadensis* (L.) Medik.), сосны крымской (*Pinus nigra* ssp. *pallasiana* (Lamb.) Holmboe), вяза листоватого (*Ulmus minor* Mill.), смородины золотой (*Ribes aureum* Pursh), шелковицы белой (*Morus alba* L.), абрикоса обыкновенного (*Prunus armeniaca* L.), сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), жимолости киприфоли (*Lonicera caprifolium* L.), лоха

узколистного (*Elaeagnus angustifolia* L.), аморфы кустарниковой (*Amorpha fruticosa* L.) различных ареалов с целью подбора видов и форм для создания постоянной лесосеменной базы. Установлено, что основными критериями для отбора генофонда являются жизнеспособность, засухо-, соле-, морозоустойчивость, высота и быстрый рост обследуемых насаждений. Несмотря на частичное подмерзание годичных побегов некоторых видов и форм, включая пирамидальную и мачтовую формы робинии псевдоакации, они также могут быть использованы для создания ПЛСБ и в насаждениях различного типа ввиду ежегодного плодоношения и достаточного роста. Выявлены группы растений по отношению к основным лимитирующими факторам среды, из которых наиболее перспективными для создания ПЛСБ в засушливых условиях являются ирга, сосна, вяз, смородина, аморфа, робиния, клен, груша, дуб, абрикос, лох и облепиха. По ростовым показателям максимальная высота отмечена у сосны, дуба, вяза, облепихи, интенсивные приросты побегов – у гледичии. Предложена улучшенная схема по созданию и использованию селекционно-семеноводческих объектов для защитного лесоразведения.

Ключевые слова: постоянная лесосеменная база, древесные виды, подбор, засушливая зона.

Egorov S.A., Kryuchkov S.N., Solonkin A.V., Solomentseva A.S., Gorbushova D.A. Selection of the main tree species for the creation of permanent forest seed base in the arid zone. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 252, pp. 6–21 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.6-21

The article presents data on the survey of forest plantations with the participation of *Robinia pseudoacacia* L., *Crataegus laevigata* (Poir.) DC., *Gleditsia triacanthos* L., *Acer tataricum* L., *Acer negundo* L., *Pyrus communis* ssp. *pyraster* (L.) Ehrh., *Prunus cerasifera* Ehrh., *Quercus robur* L., *Amelanchier canadensis* (L.) Medik., *Pinus nigra* ssp. *pallasiana* (Lamb.) Holmboe, *Ulmus minor* Mill., *Ribes aureum* Pursh, *Morus alba* L., *Prunus armeniaca* L., *Pinus sylvestris* L., *Lonicera caprifolium* L., *Elaeagnus angustifolia* L., *Amorpha fruticosa* L. from various habitats in order to select species and forms for the creation of a permanent forest seed base. It has been established that the main criteria for the selection of the gene pool are viability, drought, salt, frost resistance, height and rapid growth of the surveyed plantations. Despite the partial freezing of annual shoots of some species and forms, including the pyramidal and mast forms of *Robinia pseudoacacia*, they can also be used to create permanent forest seed bases (PFSB) and plantings of various types due to annual fruiting and sufficient growth. Groups of plants have been identified in relation to the main limiting environmental factors, of which Canadian serviceberry, Crimean pine, field elm, golden currant, desert false indigo,

black locust, Tatarian maple, European wild pear, English oak, apricot, Russian olive and sea buckthorn are the most promising for creating PFSB in arid conditions. According to growth indicators, the maximum height was noted in Crimean pine, English oak, field elm, sea buckthorn, intensive growth of shoots – in honey locust. An improved scheme for the creation and use of breeding and seed-growing facilities for protective afforestation is proposed.

Keywords: permanent forest seed base, tree species, selection, arid zone.

ЕГОРОВ Сергей Анатольевич – младший научный сотрудник ФНЦ агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, аспирант. SPIN-код: 8284-0790. ORCID: 0000-0001-8234-7355.

400062, Университетский пр., д. 97, г. Волгоград, Россия. E-mail: egorov-sa@vfanc.ru

EGOROV Sergey A. – PhD student, Junior Researcher, FSC of Agroecology, Complex Land Reclamation and Protective Afforestation RAS. SPIN-code: 8284-0790. ORCID: 0000-0001-8234-7355.

400062. Universitetskiy av. 97. Volgograd. Russia. E-mail: egorov-sa@vfanc.ru

КРЮЧКОВ Сергей Николаевич – главный научный сотрудник ФНЦ агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, доктор сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 5356-4194. ORCID: 0000-0001-8338-6460.

400062, Университетский пр., д. 97, г. Волгоград, Россия. E-mail: kryuchkov@vfanc.ru

KRYUCHKOV Sergey N. – DSc (Agricultural), Chief Researcher, FSC of Agroecology, Complex Land Reclamation and Protective Afforestation RAS. SPIN-code: 5356-4194. ORCID: 0000-0001-8338-6460.

400062. Universitetskiy av. 97. Volgograd. Russia. E-mail: kryuchkov@vfanc.ru

СОЛОНКИН Андрей Валерьевич – заведующий селекционно-семеноводческим центром ФНЦ агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, доктор сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 8724-5383. ORCID: 0000-0002-1576-7824.

400062, Университетский пр., д. 97, г. Волгоград, Россия. E-mail: solonkin-a@vfanc.ru

SOLONKIN Andrey V. – DSc (Agricultural), Head of the Breeding and Seed Center, FSC of Agroecology, Complex Land Reclamation and Protective Afforestation RAS. SPIN-code: 8724-5383. ORCID: 0000-0002-1576-7824.

400062. Universitetskiy av. 97. Volgograd. Russia. E-mail: solonkin-a@vfanc.ru

СОЛОМЕНЦЕВА Александра Сергеевна – старший научный сотрудник ФНЦ агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 6832-7471. ORCID: 0000-0002-5857-1004.

400062, Университетский пр., д. 97, г. Волгоград, Россия. E-mail: alexis2425@mail.ru

SOLOMENTSEVA Aleksandra S. – PhD (Agricultural), Senior Researcher, FSC of Agroecology, Complex Land Reclamation and Protective Afforestation RAS. SPIN-code: 6832-7471. ORCID: 0000-0002-5857-1004.

400062. Universitetskiy av. 97. Volgograd. Russia. E-mail: alexis2425@mail.ru

ГОРБУШОВА Дарья Алексеевна – лаборант-исследователь ФНЦ агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН. SPIN-код: 1234-4534. ORCID: 0009-0006-4978-4143.

400062, Университетский пр., д. 97, г. Волгоград, Россия. E-mail: gorbushova-d@vfanc.ru

GORBUSHOVA Darya A. – Research Assistant, FSC of Agroecology, Complex Land Reclamation and Protective Afforestation RAS. SPIN-code: 1234-4534. ORCID: 0009-0006-4978-4143.

400062. Universitetskiy av. 97. Volgograd. Russia. E-mail: gorbushova-d@vfanc.ru

**Э.И. Трещевская, Е.Н. Тихонова, И.В. Голядкина, С.В. Трещевская,
К.В. Бобрешов, Н.В. Галстян**

**ЗАЩИТНЫЕ ЛЕСНЫЕ ПОЛОСЫ КАК СОСТАВНАЯ ЧАСТЬ
МЕРОПРИЯТИЙ ПО БИОЛОГИЧЕСКОЙ РЕКУЛЬТИВАЦИИ
ТЕХНОГЕННО НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ**

Введение. При добыче полезных ископаемых открытым способом полностью нарушается сложившийся природный ландшафт. При этом создаются отвалы различной высоты и формы, весьма неустойчивые к водной эрозии и дефляции. В результате ухудшается санитарно-гигиеническое состояние окружающей среды близлежащих городов и населенных пунктов, происходит заиление водоемов, снижение урожайности сельскохозяйственных культур. Отвалы Лебединского горно-обогатительного комбината Курской магнитной аномалии (КМА) располагаются вблизи растущих городов: Губкин, Старый Оскол – и других населенных пунктов в Белгородской области.

Несмотря на длительный период изучения и обширную библиографию, проблема рекультивации нарушенных земель является актуальной, что обусловлено, в первую очередь, многообразием видов нарушенных земель и различными природно-климатическими условиями [Осипенко и др., 2022]. Учитывая, что свойства складируемых горных пород недостаточно благоприятны для развития почвообразования, большинство авторов рекомендуют предварительное землевание, то есть нанесение потенциально плодородного слоя почвы определенной мощности. Так, Л.П. Капелькина [2021] важным технологическим приемом восстановления нарушенных земель, адаптированным к суровым климатическим условиям, считает использование маломощного почвенного слоя вместе с растительностью. Данилов и др. [2018] для повышения плодородия песчаных грунтов рекомендуют наносить на поверхность слой плодородных пород и применять способы мелиорации песчаных смесей. Куприянов и др. [2021] в своей работе приводят положительные результаты эксперимента по реконструкции почвенно-растительного слоя на нарушенных землях Кузбасса путем перенесения плодородного слоя почвы, содержащего органы и семена растений, ценозы почвенных беспозвоночных и микробные ассоциации на поверхность песчаникового отвала. McMahan et al. [2022] экспериментально

доказывают, что нанесение даже небольшого количества верхнего плодородного слоя лесной почвы может улучшить приживаемость и первоначальный рост сеянцев, а также способствовать восстановлению почвенных микробных сообществ.

Еще одной характерной особенностью породных отвалов является чрезвычайная неоднородность почвенно-экологических условий. Пигорев и Солошенко [2015] в своей работе указывают, что искусственно сформированные геосистемы техногенных образований с наличием крутосклонов характеризуются экологической нестабильностью, многообразием дефляционно-эррозионных процессов и индивидуальным микроклиматом. При этом неоднородность наблюдается как внутри одной группы геоморфологических участков, так и между различными группами и разными техногенными ландшафтами. Важным фактором, влияющим на формирование благоприятных условий почвообразования, является рельеф, несколько в меньшей степени, но значимо влияет экспозиция склонов (инсолируемость участка). По данным Андроханова и Курачева [2004] на старых угольных разрезах Кузбасса на горизонтальных и слабонаклонных поверхностях для местообитаний с хорошими условиями почвообразования составляет не более 40%, а на склоновых позициях – около 10%. В связи с этим возникает необходимость оценки эффективности мероприятий по биологической рекультивации в зависимости от рельефа и экспозиции склона.

Учитывая сложные почвенно-экологические условия техногенного ландшафта, подбор ассортимента является ключевым вопросом при планировании мероприятий по биологической рекультивации. На сегодняшний день существуют различные подходы к выбору древесных и кустарниковых пород, применяемых на породных отвалах. За рубежом, например, в работе Macdonald et al. [2015] предлагается максимально возможное содействие естественному зарастанию и преимущественное использованиеaborигенных видов. M. Pietrzykowski [2019] рекомендует пропорциональное введение в состав рекультивационных насаждений: 1) пионерных видов; 2) пород с ярко выраженным фитомелиоративными свойствами; 3) целевых пород. При этом необходимо проведение предварительных испытаний по приживаемости и сохранности того или иного вида в условиях техногенных формирований.

Никитина и др. [2020] и Стифеев и др. [2017] для отвалов Михайловского горно-обогатительного комбината КМА рекомендуют такие древесные и кустарниковые породы, как берёза, сосна, тополь, ива, акация, облепиха. В.Н. Анопин [2004] в своей работе к перспективным видам для

лесной рекультивации деградированных урболандшафтов в черноземной зоне относит дуб черешчатый, березу повислую, робинию лжеакацию, тополя, сосну обыкновенную, вяз обыкновенный, клены остролистный, полевой, татарский, а также смородину золотую, терн, скумпии, боярышники и жимолость татарскую. Ковалевский и др. [2021] из-за недостатка азота в техногенных грунтах в посадочный материал рекомендуют обязательно включать представителей семейства Бобовые и другие растения, способные фиксировать атмосферный азот.

Авторами данной статьи в предыдущих работах приводятся результаты долговременного мониторинга состояния лесных культур некоторых древесных и кустарниковых пород на гидроотвале КМА [Трещевская и др., 2020, 2022].

Очень мало научных работ посвящено изучению защитных лесных полос как составной части мероприятий по биологической рекультивации [Гурина, 2013]. Во многом это обусловлено тем, что защитные лесные полосы можно создавать на поверхности суглинистых и глинистых отвалов площадью более 50 га. На поверхности меловых, мело-мергельных, песчаных и песчано-меловых отвалов такой же площади после землевания при условии их сельскохозяйственного освоения целесообразно создание полезащитных и стокорегулирующих лесных полос [Панков, Трещевский, 2005]. Комплекс защитных лесных насаждений на крупноплощадных отвалах позволит не только восстановить производительность рекультивируемых земель, но и получить более высокие урожаи сельскохозяйственных культур как на восстановленных, так и с учетом зоны мелиоративного влияния на зональных прилегающих площадях [Ивонин, 2017]. Особенно это актуально для пополнения земельных ресурсов ключевых аграрных районов нашей страны, где по современным оценкам степень распаханности сельскохозяйственных угодий превышает все разрешенные лимиты и составляет 60–90% [Кулик и др., 2023].

На зональных почвах в системе мер по защите земель от водной эрозии и дефляции лесным полосам принадлежит одно из главных мест [Кулик и др., 2020]. Они регулируют снегораспределение в межполосных пространствах, способствуют большему накоплению влаги в почве, уменьшают скорость ветра, превращают поверхностный сток во внутриводный, улучшают микроклимат в целом, в результате чего повышается урожайность сельскохозяйственных культур в агроландшафтах Центрального Черноземья [Михин, Михина, 2023].

Целью данной работы является обобщение данных многолетнего мониторинга защитных лесных полос и разработка рекомендаций по подбору

ассортимента древесных и кустарниковых растений для линейных защитных насаждений в условиях горнопромышленного ландшафта КМА.

Материалы и методика исследования. Объектами исследований послужили древесные и кустарниковые породы в защитных лесных полосах, созданных на гидроотвале Березовый лог Лебединского ГОКа КМА. Территория Губкинского района находится в северной части Белгородской области Среднерусского агролесомелиоративного района лесостепной зоны европейской части России. Климат района – умеренно континентальный. Годовая сумма осадков находится в пределах 500–550 мм. Ветровой режим характеризуется преобладанием юго-западных, южных и западных ветров в холодный период года, северо-западных и северо-восточных ветров – в летний период.

Гидроотвал Березовый лог начал формироваться с 1965 г. путем гидравлического намыва песчаного грунта в одноименную балку площадью 449 га. Он находится в непосредственной черте г. Губкина с юго-восточной его стороны. Упорная призма представляет собой северо-западную часть гидроотвала. Формирование его осуществлялось отдельными уступами (террасами), которые представлены 1–4 призмами. Гидроотвал сложен кварцевыми песками с включениями альбского яруса и песчано-глинистыми отложениями апского яруса, богатыми слюдой. Сверху на гидроотвал были намыты среднезернистые кварцевые пески с включением фосфоритов сеноманского яруса. Высота гидроотвала составляет 40–45 м, крутизна откосов – 6–30°.

На поверхность гидроотвала, предназначенную под сельскохозяйственную рекультивацию, был нанесен плодородный слой мощностью 30–80 см. На гидроотвале были заложены стокорегулирующие и полезащитные лесные полосы с использованием следующих древесных и кустарниковых пород: тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.), ясения обыкновенного (*Fraxinus excelsior* L.), робинии лжеакации (*Robinia pseudoacacia* L.), рябины обыкновенной (*Sorbus aucuparia* L.), жимолости татарской (*Lonicera tatarica* L.). В полезащитные полосы вводился также дуб красный (*Quercus rubra* L.).

Закладка пробных площадей в защитных лесных полосах и работы на них выполнялись по общепринятым в практике таксации, лесоводства и почловедения методикам с учетом современных требований. Статистическая обработка данных выполнялась с использованием пакета прикладных программ Excel и Statistica.

Результаты исследования. Защитное лесоразведение является важнейшим фактором интенсификации сельского хозяйства, что особенно важно для отвалов, предназначенных для сельскохозяйственного использования. Кроме того, лесные полосы выполняют разнообразные функции в специфических условиях насыпных техноземов, подверженных эрозии и дефляции. При создании защитных лесных полос на отвалах необходимо учитывать мелиоративные функции лесных полос в каждом конкретном случае, а также природно-климатические условия района. Учитывая, что на опытных объектах преобладающее направление ветров – юго-восточное, полезащитные лесные полосы длинной стороной располагаются перпендикулярно к ним. Отклонение в ту или иную сторону составляет не более 30°. Таким образом, защитные полосы на гидроотвале имеют направление с севера-востока на юго-запад.

В нижней части гидроотвала с абсолютной отметкой 191,5 м были заложены 4 стокорегулирующие лесные полосы, разные по протяженности и ассортименту древесных и кустарниковых пород. Они располагаются на территории, прилегающей к первому откосу, в северо-западной, западной и юго-западной частях.

Первая полоса расположена по нижнему краю основания гидроотвала. Общая ее протяженность составляет 813 м, в том числе в северо-западной части – 246 м. Она состоит из ясения обыкновенного, робинии лжеакации и тополя бальзамического. Схема смешения в полосе – Ясо-Ясо-Рбл-Тбз. Длина полосы у основания склона западной экспозиции – 495 м. На протяжении 412 м посадка лесных культур проведена по схеме «Ясо-Ясо-Тбз-Рбл-Тбз», а на участке длиной 83 м в лесную полосу введен кустарник жимолость татарская, схема смешения – Жт-Тбз-Тбз-Жт. Полоса вдоль склона юго-западной экспозиции длиной 318 м была создана по схеме «Жт-Тбз-Рбо-Жт». Расстояние в ряду – 0,8 м, ширина между рядами – 2,0 м. Анализ состояния и роста древесных и кустарниковых пород приводится в табл. 1.

Вторая полоса расположена немного выше первой и имеет общую длину 869 м, состоит из трех участков в зависимости от экспозиции склона. Участок на склоне северо-западной экспозиции имеет длину 248 м, схема смешения – Тбз-Тбз-Ясо-Ясо. Лесная полоса на склоне западной экспозиции протяженностью 258 м вдоль дороги имеет два участка. Схема смешения на первом участке, протяженностью 166 м, – Тбз-Тбз-Ясо-Ясо, на втором длиной 92 м введена рябина обыкновенная (схема смешения – Рбо-Жт-Тбз-Жт-Тбз). Участок на склоне юго-западной экспозиции протяженностью 363 м создан по аналогичной схеме – Рбо-Жт-Тбз-Жт-Тбз. Размещение посадочных мест – такое же, как в первой полосе.

Таблица 1

**Показатели приживаемости и роста древесных и кустарниковых пород
в стокорегулирующих лесных полосах на гидроотвале**

**Survival and growth rates of plant species in effluent-regulating forest belts
on hydraulic dump**

№ по- лосы	Экспозиция склона	Древесная/ кустарнико- вая порода	Прижи- ваемость, %	Биометрические показатели, см	
				средняя высота	текущий прирост
1	северо-западная	Тбз	62	67,9±3,28	23,6±1,18
		Ясо	62	32,7±1,72	5,3±0,68
		Рбл	44	49,4±1,59	13,6±1,04
	западная	Тбз	34	68,0±1,43	18,6±1,58
		Ясо	44	29,0±2,23	8,3±1,16
		Жт	72	34,2±1,16	10,9±1,01
		Рбл	78	25,8±2,12	12,2±1,45
	юго-западная	Тбз	92	34,5±2,58	12,7±1,68
		Жт	78	29,6±1,36	7,5±0,88
		Рбо	70	23,9±3,03	11,0±0,77
2	северо-западная	Тбз	54	68,6±4,45	25,0±0,64
		Ясо	60	29,6±2,54	10,6±1,05
	западная	Тбз	60	59,6±3,68	29,3±1,15
		Ясо	48	30,7±2,14	7,2±0,81
		Жт	78	38,8±3,17	22,2±1,61
		Рбо	55	38,8±2,57	4,9±0,69
		Тбз	90	42,6±3,06	15,9±0,48
3	юго-западная	Жт	84	35,9±2,54	26,2±1,12
		Рбл	79	59,9±2,68	14,5±0,87
		Ясо	70	30,3±3,86	9,7±1,01
	западная	Рбл	58	66,7±2,59	16,6±1,04
		Ясо	52	27,2±3,57	7,4±0,58
		Рбл	78	60,8±2,64	14,6±1,06
		Тбз	62	69,0±2,15	2,5±0,25
		Рбо	94	23,7±1,56	9,2±1,75
		Жт	84	37,4±3,14	12,6±0,84

Окончание табл. 1

№ по- лосы	Экспозиция склона	Древесная/ кустарнико- вая порода	Прижи- ваемость, %	Биометрические показатели, см	
				средняя высота	текущий прирост
4	юго-западная	Тбз	94	68,3±2,56	12,8±1,05
		Рбо	88	18,5±1,14	7,5±0,87
		Жт	90	32,2±2,08	10,8±0,26
4	западная	Ясо	40	36,8±2,84	6,9±0,74
		Рбо	54	39,8±2,46	4,8±0,65
		Жт	66	36,6±2,17	9,5±0,62
	юго-западная	Тбз	88	36,9±3,05	15,6±0,45
		Жт	88	37,2±3,14	10,3±0,3

Примечание: Тбз – тополь бальзамический, Рбо – рябина обыкновенная, Ясо – ясень обыкновенный, Жт – жимолость татарская, Рбл – робinia лжеакация

Третья полоса протяженностью до 829 м на участке северо-западной экспозиции длиной 170 м состоит из четырех рядов – Ясо-Ясо-Рбл-Рбл. На части полосы на склоне западной экспозиции остается тот же ассортимент, а на участке длиной 90 м и в полосе на склоне юго-западной экспозиции, протяженностью 336 м, схема смешения – Рбл-Рбл-Тбз-Жт.

Четвертая полоса имеет небольшую длину и расположена выше первых трех, примыкая непосредственно к первому откосу гидроотвала. Участок полосы длиной 313 м находится в западной части, а участок длиной 300 м – в юго-западной части поверхности основания гидроотвала. В первой части насаждение создано по схеме смешения «Ясо-Рбо-Рбо-Ясо», на втором участке – по схеме «Тбз-Жт-Тбз-Жт». Ширина междурядий – 2,0 м, расстояние в ряду – 0,8 м. Общая площадь насаждения составляет 3,12 га.

Из табл. 1 видно, что приживаемость древесных и кустарниковых пород неодинакова. Наилучшей приживаемостью характеризуется тополь бальзамический, особенно в полосах на склоне юго-западной экспозиции, где она колеблется от 88 до 94%. Приживаемость тополя в полосах на склонах северо-западной и западной экспозиций значительно ниже – 34–62%. Хорошей приживаемостью характеризуется рябина обыкновенная, у которой этот показатель может достигать 88%. У жимолости татарской также отмечается высокая приживаемость. В первой полосе она составляет 72–78% во второй – 78–84%, в третьей – 84–90% и в четвертой полосе – 66–88%. Несколько ниже приживаемость у ясения обыкновенного и робинии лжеакации. Она составляет, соответственно, 40–70% и 44–78%.

Большое влияние на приживаемость оказывает экспозиция склона. У тополя лучшая приживаемость отмечается на юго-западных участках, у жимолости и рябины – на западных и юго-западных. Рябина характеризуется лучшей приживаемостью на склонах северо-западной и западной экспозиций, ясень – также на склонах северо-западной экспозиции. Какой-либо закономерности в приживаемости древесных и кустарниковых пород в различных полосах не наблюдается.

Из всех высаженных пород наибольший прирост отмечен у тополя. В большинстве случаев он колеблется от 18,6 до 25,0 см. Величина прироста тополя в значительной мере также зависит от экспозиции склона. Самый низкий прирост наблюдается в полосах на склонах юго-западной экспозиции. Здесь во всех четырех полосах он составляет 12,7–15,9 см. На склонах западной и северо-западной экспозиций он выше и составляет 18,6–29,3 см. Это объясняется, прежде всего, тем, что испарение с поверхности субстрата на южных склонах больше, что влечет за собой снижение влагообеспеченности растений, а значит, и снижение прироста.

Второе место по величине прироста в высоту занимает робиния лжеакация, у которой он колеблется от 12,2 до 16,6 см. Прирост остальных древесных и кустарниковых пород в различных лесных полосах колеблется в широких пределах. Так, например, в западной и юго-западной частях второй полосы наибольший прирост отмечается у жимолости, он составляет 22,2–26,2 см, в то время как в первой, третьей и четвертой полосах он равен 7,5–12,6 см. Аналогичные показатели получены и для других пород.

На поверхности гидроотвала, в северной его части, посажены две полезащитные полосы. Основная расположена перпендикулярно вредоносным юго-восточным и южным ветрам. Она является приводораздельной. Длина полосы – 1000 м, ширина – 17 м. Схема смешения – Рбл-Тбз-Тбз-Тбз-Рбо. Размещение посадочных мест – 2,5 × 1,0 м. Перпендикулярно к этой полосе в направлении с запада на восток посажена вспомогательная полоса длиной 100 м и шириной 15 м по схеме «Рбл-Дк(дуб красный)-Рбл-Рбл».

Общая площадь полезащитных полос на поверхности гидроотвала составляет 2,15 га. Полосы посажены по 2-летнему пласту многолетней бобово-злаковой смеси. Технозем под посадку предварительно не обрабатывался, но осенью была проведена вспашка с последующим боронованием дисковой тяжелой бороной БДТ-3.

В полезащитную лесную полосу, созданную на поверхности гидроотвала в направлении с запада на восток перпендикулярно вредоносным ветрам, в качестве основной породы был введен дуб красный. В полосах использовались также робиния лжеакация, тополь бальзамический, рябина обыкновенная. Показатели их приживаемости и роста приводятся в табл. 2.

Таблица 2

**Показатели приживаемости и роста древесных пород
в полезащитных лесных полосах на гидроотвале**

**Survival and growth rates of plant species in forest shelter belts
on the hydraulic dump**

Вид полосы	Экспози- ция склона	Дре- весная порода	Прижи- ваемость, %	Биометрические показатели, см	
				средняя высота	текущий прирост
Основная полезащитная	Северо- западная, северо- восточная	Рбл	73	42,5±3,24	14,1±1,06
		Тбз	52	65,8±3,68	12,2±1,19
		Рбо	76	39,9±2,15	2,8±0,12
Вспомогатель- ная полезащит- ная	Западная, восточная	Дк	57	19,2±2,01	2,6±0,26
		Рбл	91	54,8±4,01	20,1±0,57

Примечание: Тбз – тополь бальзамический, Рбо – рябина обыкновенная, Рбл – робиния лжеакация, Дк – дуб красный

В результате неблагоприятного гидротермического режима приживаемость тополя составила 52%, дуба – 57%. Последний имел и незначительный прирост, не только из-за неблагоприятных условий, но и в силу своих биологических особенностей. Дуб и рябина имеют самый маленький прирост, который равен, соответственно, 2,6 и 2,8 см. Приживаемость робинии на участках западной и восточной экспозиций значительно выше, чем на северо-западном и северо-восточном участках, соответственно, она составляет 91% и 73%. Прирост также снизился с 20,1 см до 14,1 см, т.е. в 1,4 раза. Таким образом, приживаемость и рост древесных пород зависят от экологических условий, которыми характеризуются участки различной экспозиции.

Древесные и кустарниковые породы, которые были использованы при создании стокорегулирующих лесных полос, ранее испытывались в условиях отвально-техногенных субстратов. К основанию гидроотвала с северо-западной стороны примыкает пологий возвышенный участок с абсолютной отметкой 191,5 м, на котором в 1976 г. были высажены лесные культуры тополя, робинии и рябины. Жимолость была высажена на втором откосе юго-западной экспозиции с абсолютной отметкой 200 м. У основания гидроотвала в 1984 г. были заложены насаждения из этих же пород. Показатели их роста и сохранности в разном возрасте приводятся в табл. 3.

Таблица 3

Характеристика сохранности и роста древесных и кустарниковых пород на гидроотвале

Characteristics of preservation and growth of plant species on the hydraulic dump

Порода	Возраст, лет	Сохранность, %	Биометрические показатели, см	
			средняя высота	текущий прирост
Тополь бальзамический	8	80	306,0±2,78	40,8±0,51
	42	11	1200,0±5,01	45,5±0,77
Робиния лжеакация	8	90	195,5±3,05	33,9±0,41
	41	42	1050±4,33	20,8±0,44
Рябина обыкновенная	8	78	139,4±1,12	13,0±0,11
	36		выпала	
Жимолость татарская	8	66	101,0±0,80	15,0±1,10
	43	24	280,0±2,12	4,4±0,23

Анализ многолетних данных показывает, что сохранность культур в этих условиях неодинакова. Наибольшая сохранность характерна для тополя и робинии в возрасте 8 лет, соответственно, 80% и 90%. У рябины и жимолости она ниже – соответственно, 78% и 66%.

В возрасте 42 лет насаждение тополя имеет сохранность 11%. Оставшиеся экземпляры растут по III классу бонитета, имея среднюю высоту 12,0 м и средний диаметр 36,61 см. Насаждение робинии в возрасте 41 года отличается наиболее высокой сохранностью – 42%.

Заключение. Мониторинг насаждений позволяет разработать ассортимент древесных и кустарниковых пород для создания лесных полос в техногенных ландшафтах.

Несмотря на то, что тополь бальзамический является быстрорастущей древесной породой, в условиях нарушенных земель он не формирует долговечных устойчивых насаждений и не может быть рекомендован для лесной рекультивации отвалов в техногенных ландшафтах.

Робинию лжеакацию можно использовать на техногенно нарушенных землях для создания защитных лесных насаждений, лесных полос, а также

для создания предварительных насаждений с последующим введением более ценных пород.

Рябина обыкновенная, хоть и отличается в первые годы жизни удовлетворительной сохранностью, к возрасту 35 лет полностью выпала, поэтому является непригодной породой для создания долговечных насаждений.

Жимолость татарскую рекомендуется вводить в лесные полосы по схемам смешения, применяемым на зональных почвах, или в защитные лесные насаждения санитарно-гигиенического, ландшафтно-озеленительного и рекреационного значения в количестве не более 50%.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Андроханов В.А., Курачев В.М. Принципы оценки почвенно-экологического состояния техногенных ландшафтов // Сибирский экологический журнал. 2009. Т. 16, № 2. С. 165–169.

Анотин В.Н. Физико-географические основы лесной рекультивации деградированных урбокландшафтов Нижнего Поволжья: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. Волгоград: ВГАСУ, 2004. 44 с.

Гурнина И.В. О применении комплексных мелиораций при биологической рекультивации нарушенных земель // Мелиорация и водное хозяйство. 2013. № 3. С. 27–28.

Данилов Ю.И., Навалихин С.В., Петров В.А. Рост и продуктивность культур сосны при рекультивации песчаных карьеров // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: матер. третьей Междунар. науч.-технич. конференции. Санкт-Петербург, 2018. Т. 1. С. 92–94.

Ивонин В.М. Обоснование системы лесных мелиораций природно-антропогенных ландшафтов // Научный журнал Российской НИИ проблем мелиорации. 2017. № 3(27). С. 18–31.

Капелькина Л.П. Технологические аспекты рекультивации нарушенных земель на Севере России // Проблемы региональной экологии. 2021. № 5. С. 96–99.

Ковалевский А.В., Тарасова И.В., Лучникова Е.М., Филиппова А.М., Воронина Л.А., Гашков С.И., Ильяшенко В.Б., Зубко К.С., Сметанин А.В., Ефимов Д.А. Лесная рекультивация угольных отвалов с позиции сохранения фаунистического разнообразия Кузбасса // Лесоведение. 2021. № 5. С. 509–522.

Кулак К.Н., Манаенков А.С., Кузенко А.Н., Салугин А.Н. К вопросу о состоянии защитного лесоразведения в Волгоградской области // Известия Нижневолжского агрониверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2020. № 1(57). С. 23–33.

Кулак К.Н., Беляев А.И., Пугачева А.М. Роль защитного лесоразведения в борьбе с засухой и опустыниванием агроландшафтов // Аридные экосистемы. 2023. Т. 29, № 1(94). С. 4–14.

Куприянов А.Н., Манаков Ю.А., Куприянов О.А., Шатилов Д.А. Реконструкция почвенно-растительного слоя на поверхности отвалов в Кузбассе // Уголь. 2021. № 2(1139). С. 46–52.

Михин В.И., Михина Е.А. Лесомелиоративные системы в бассейне Среднего Дона // Охрана, инновационное восстановление и устойчивое управление лесами. Forestry-2023: матер. Междунар. лесного форума. Воронеж, 2023. С. 86–91.

Никитина О.В., Стифеев А.И., Лазарев В.И. Создание фитоценозов на техногенных ландшафтах Курской магнитной аномалии как оптимальный способ их биологической рекультивации // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2020. Т. 13, № 3(66). С. 108–116.

Осипенко Р.А., Залесов С.В., Зарипов Ю.В. Эффективность лесохозяйственного направления рекультивации выработанных карьеров глины в Средне-Уральском таежном лесном районе // Лесохозяйственная информация. 2022. № 4. С. 96–102.

Панков Я.В., Треццевский И.В. Мониторинг процессов биологической рекультивации техногенных ландшафтов КМА // Лес. Наука. Молодежь-2004: сб. матер. по итогам научно-исследовательской работы молодых ученых за 2004 год, посвященный 75-летию со дня рождения профессора А.В. Веретенникова. Воронеж, 2005. С. 60–63.

Пигорев И.Я., Солошенко В.М. Экологические изменения ландшафта Курской магнитной аномалии в ходе открытой добычи железной руды // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. № 9. С. 139–144.

Стифеев А.И., Никитина О.В., Бессонова Е.А., Кемов К.Н. Рекультивация нарушенных земель и технологии их реабилитации на территории Центрального Черноземья // Международный сельскохозяйственный журнал. 2017. № 6. С. 34–38.

Треццевская Э.И., Голядкина И.В., Треццевская С.В., Князев В.И., Кушнир Е.А. Перспективы лесной рекультивации техногенных ландшафтов с помощью культуры тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) // Лесотехнический журнал. 2020. Т. 10, № 2(38). С. 81–92.

Треццевская Э.И., Тихонова Е.Н., Голядкина И.В., Треццевская С.В., Лабоха К.В., Князев В.И. Рост, состояние и продуктивность кустарниковых пород в условиях отвалов железорудных месторождений // Лесотехнический журнал. 2022. Т. 12, № 4(48). С. 60–76.

Macdonald S., Landhäusser S., Skousen J., Franklin J., Frouz J., Hall S., Jacobs D.F., Quideau S. Forest restoration following surface mining disturbance: challenges and solutions // New Forests. 2015. Vol. 46. P. 703–732.

McMahan K., Anglin C.D., Lavkulich L.M., Simard S., Grayston S. Small-volume additions of forest topsoil improve root symbiont colonization and seedling growth in mine reclamation // Applied Soil Ecology. 2022. Vol. 180. Art. no. 104622.

Pietrzykowski M. Tree species selection and reaction to mine soil reconstructed at reforested post-mine sites: Central and eastern European experiences // Ecological Engineering. 2019. Vol. 10, iss. 3. Art. no. 100012.

References

- Androhanov V.A., Kurachev V.M. Principles of the evaluation of soil-ecological state of technogenic landscapes. *Siberian Journal of Ecology*, 2009, vol. 16, no. 2, pp. 165–169. (In Russ.)
- Anopin V.N. Physical and Geographical Bases of Forest Recultivation of Degraded Urbelandscapes of the Lower Volga region: author's abstract. Dis. ... Doctor of Geographical Sciences. Volgograd: Volgograd State Architecture and Construction University, 2004. 44 p. (In Russ.)
- Danilov Yu.I., Navalihin S.V., Petrov V.A. Growth and productivity of Scots pine during sand pit land reclamation. *Forests of Russia: politics, industry, science, education*: mater. Third International sci.-tech. conf. St. Petersburg, 2018, vol. 1, pp. 92–94. (In Russ.)
- Gurina I.V. On the application of reclamation plant in land reclamation. *Melioration and water management*, 2013, no. 3, pp. 27–28. (In Russ.)
- Ivonin V.M. The substantiation of forestry reclamation system of natural-anthropogenic landscapes. *Scientific journal of Russian scientific research institute of land improvement problems*, 2017, no. 3(27), pp. 18–31. (In Russ.)
- Kapel'kina L.P. Technological aspects of recultivation of the disturbed lands in the Russian north. *Regional environmental challenges*, 2021, no. 5, pp. 96–99. (In Russ.)
- Kovalevskiy A.V., Tarasova I.V., Luchnikova E.M., Filippova A.M., Voronina L.A., Gashkov S.I., Il'yashenko V.B., Zubko K.S., Smetanin A.V., Yefimov D.A. Forest reclamation of the coal dumps from the perspective of preserving the fauna diversity on the example of the Kuznetsk coal basin. *Russian Forest Sciences*, 2021, no. 5, pp. 509–522. (In Russ.)
- Kulik K.N., Manayenkov A.S., Kuzenko A.N., Salugin A.N. On the issue of the protective afforestation status in Volgograd region. *Proceedings of Lower Volga Agro-university complex: science and higher education*, 2020, no. 1(57), pp. 23–33. (In Russ.)
- Kulik K.N., Belyaev A.I., Pugacheva A.M. The role of protective afforestation in drought and desertification control in agro-landscapes. *Arid ecosystems*, 2023, no. 1(94), pp. 4–14. (In Russ.)
- Kupriyanov A.N., Manakov Yu.A., Kupriyanov O.A., Shatilov D.A. Reconstruction of the soil-vegetation layer on the rock-dump surface in Kuzbass. *Coal*, 2021, no. 2(1139), pp. 46–52. (In Russ.)
- Macdonald S., Landhäusser S., Skousen J., Franklin J., Frouz J., Hall S., Jacobs D.F., Quideau S. Forest restoration following surface mining disturbance: challenges and solutions. *New Forests*, 2015, vol. 46, pp. 703–732.
- McMahan K., Anglin C.D., Lavkulich L.M., Simard S., Grayston S. Small-volume additions of forest topsoil improve root symbiont colonization and seedling growth in mine reclamation. *Applied Soil Ecology*, 2022, vol. 180, art. no. 104622.

Mihin V.I., Mihina E.A. Forest reclamation systems in the middle Don basin. *Protection, innovative restoration and sustainable management of forests. Forestry-2023*: mater. International forest forum. Voronezh, 2023, pp. 86–91. (In Russ.)

Nikitina O.V., Stifeev A.I., Lazarev V.I. Creation of phytocenoses in technogenic landscapes of Kursk magnetic anomaly as the optimal way of their biological recultivation. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*, 2020, no. (66), pp. 108–116. (In Russ.)

Osipenko R.A., Zalesov S.V., Zaripov Yu.V. Forestry trend reclamation of worked out clay quarries efficiency in the middle Ural taiga forest region. *Forestry information*, 2022, no. 4, pp. 96–102. (In Russ.)

Pankov Ya. V., Treshchhevskiy I.V. Monitoring of biological reclamation of technogenic landscapes of the KMA. *Forest. Science. Youth-2004*: collection of mater. based on the results of young scientists scientific research work in 2004 dedicated to the 75th anniversary of birth of prof. A.V. Veretennikov. Voronezh, 2005, pp. 60–63. (In Russ.)

Pietrzykowski M. Tree species selection and reaction to mine soil reconstructed at reforested post-mine sites: Central and eastern European experiences. *Ecological Engineering*, 2019, vol. 10, iss. 3, art. no. 100012.

Pigorev I.Ya., Soloshenko V.M. Environmental changes in the landscape Kursk magnetic anomaly during open iron ore mining. *Vestnik of the Kursk State Agricultural Academy*, 2015, no. 9, pp. 139–144. (In Russ.)

Stifeev A.I., Nikitina O.V., Bessonova E.A., Kemov K.N. Reclamation of disturbed lands and technologies of their rehabilitation on the territory of the Central Black region. *International Agricultural Journal*, 2017, no. 6, pp. 34–38. (In Russ.)

Treshchhevskaya E.I., Golyadkina I.V., Treshchhevskaya S.V., Knyazev V.I., Kushnir E.A. Prospects for forest recultivation of technogenic landscapes using balsam poplar (*Populus balsamifera* L.). *Forestry Engineering Journal*, 2020, no. 2(38), pp. 81–92. (In Russ.)

Treshchhevskaya E.I., Tihonova E.N., Golyadkina I.V., Treshchhevskaya S.V., Labokha K.V., Knyazev V.I. Growth, state and productivity of perennial shrubs on dumps of iron-ore mine *Forestry Engineering Journal*, 2022, no. 4(48), pp. 60–76. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 06.02.2024

Трещевская Э.И., Тихонова Е.Н., Голядкина И.В., Трешевская С.В., Бобрешов К.В., Галстян Н.В. Защитные лесные полосы как составная часть мероприятий по биологической рекультивации техногенно нарушенных земель // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 252. С. 22–39. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.22-39

Обратной стороной добычи полезных ископаемых является неблагоприятное воздействие человека на окружающую среду, которое проявляется в нарушении сложившихся природных ландшафтов. Ведущая роль в восстановлении техногенно нарушенных земель принадлежит лесной рекультивации. Она заключается в создании насаждений различного назначения. При сельскохозяйственном направлении рекультивации техногенных ландшафтов возможно выращивание защитных лесных полос. Полезащитные и стокорегулирующие полосы создаются на выровненных отвалах площадью более 50 га: на глинистых и суглинистых – без предварительного нанесения плодородного слоя, на песчаных, песчано-меловых и мело-мергельных – после землевания. На гидроотвале Березовый лог Курской магнитной аномалии (КМА) в условиях двухкомпонентных техноземов были заложены полезащитные и стокорегулирующие лесные полосы с использованием следующих древесных и кустарниковых пород: тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.), ясени обыкновенного (*Fraxinus excelsior* L.), робинии лжеакации (*Robinia pseudoacacia* L.), рябины обыкновенной (*Sorbus aucuparia* L.), жимолости татарской (*Lonicera tatarica* L.), дуба красного (*Quercus rubra* L.). Исследования показали, что большое влияние на приживаемость пород оказывает экспозиция склона. У тополя лучшая приживаемость отмечается на юго-западных участках, у жимолости и рябины – на западных и юго-западных. Рябина характеризуется лучшей приживаемостью на склонах северо-западной и западной экспозиций, ясень – также на склонах северо-западной экспозиции. Наблюдения за ранее созданными на техноземах насаждениями в возрасте до 43 лет позволили оценить пригодность испытанных древесных и кустарниковых пород для создания защитных лесных полос в техногенных ландшафтах. Сделаны выводы, что только робиния лжеакация может быть использована при выращивании полезащитных и стокорегулирующих полос, а также других видов защитных лесных насаждений. Тополь бальзамический, хоть и отличается в молодом возрасте высокой приживаемостью и показателями роста, не формирует долговечных устойчивых насаждений, имея в возрасте 42 лет сохранность всего 11%. Он не может быть рекомендован для лесной рекультивации отвалов, так же как и рябина обыкновенная, выпавшая полностью к 35 годам. Жимолость татарскую рекомендуется вводить в лесные полосы по схемам смешения, применяемым на зональных почвах.

Ключевые слова: защитные лесные полосы, биологическая рекультивация, гидроотвал, нарушенные земли, технозём, Курская магнитная аномалия (КМА).

Treshchevskaya E.I., Tikhonova E.N., Golyadkina I.V., Treshchevskaya S.V., Bobreshov K.V., Galstyan N.V. Forest Shelterbelts as an integral part of the land reclamation on post-technogenic areas. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 252, pp. 22–39 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.22-39

The downside of mining is the adverse human impact on the environment, which appears in the disruption of natural landscapes. Forest land reclamation plays a leading role in the restoration of post-technogenic lands. It was key to the creation of plantations for various purposes. It is possible to cultivate Forest Shelterbelts in agricultural areas. Forest Shelterbelts and effluent-regulating Forest Belts are created on specially lined dumps of more than 50 hectares: on clay and loam substrate – without preliminary application of the fertile layer, on sandy, sandy and chalk and chalk and marl substrates – after applying topsoil fertile layer. On the hydraulic dump called ‘Berezovy Log’ related to iron ore basin of the Kursk magnetic anomaly (KMA), in the conditions of two-component Technosols, were laid forest shelter belts and effluent-regulating forest belts using the following plant species: *Populus balsamifera* L., *Fraxinus excelsior* L., *Robinia pseudoacacia* L., *Sorbus aucuparia* L., *Lonicera tatarica* L., *Quercus rubra* L. Studies have shown that slope exposure has a large impact on the survival of plant species. *Populus balsamifera* L. is characterized better survival on the south-western plots, *Sorbus aucuparia* L. and *Lonicera tatarica* L. – on the west and south-west plots. *Sorbus aucuparia* L. is best survivable on the slopes of the north-west and western expositions, and *Fraxinus excelsior* L. – also on the slopes of the north-west exposition. Monitoring of previously created plantations on Technosols up to 43 years old allowed to assess the suitability of tested plant species to create Forest Shelterbelts on post-technogenic lands. The conclusions are made that only *Robinia pseudoacacia* L. can be used when growing forest shelter belts, as well as other types of protective forest plantations. *Populus balsamifera* L., although distinguished at a young age by high survival rate, does not form durable sustainable plantations, having at the age of 42 years of preservation of only 11%. It can not be recommended for forest reclamation of dumps, as well as *Sorbus aucuparia* L., which fell out completely by the age of 35. It is recommended to add *Lonicera tatarica* L., into Forest Shelterbelts according to the mixing schemes used on zonal soils.

К e y w o r d s : Forest Shelterbelts, biological land reclamation, hydraulic dump, post-technogenic lands, Technosol, the Kursk Magnetic Anomaly (KMA).

ТРЕЩЕВСКАЯ Элла Игоревна – профессор кафедры лесных культур, селекции и лесомелиорации Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, доктор сельскохозяйственных наук, доцент. SPIN-код: 7620-6032. ORCID: 0000-0003-1454-4095.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: ehllt@yandex.ru

TRESHCHEVSKAYA Ella I. – DSc (Agriculture), Professor of Silviculture, Selection and Forest melioration Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Associate Professor. SPIN-code: 7620-6032. ORCID: 0000-0003-1454-4095.

394087. Timiryazev str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: ehllt@yandex.ru

ТИХОНОВА Елена Николаевна – заведующий кафедрой ландшафтной архитектуры и почвоведения Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, кандидат биологических наук, доцент. SPIN-код: 4458-6010. ORCID: 0000-0002-9039-9822.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: tichonova-9@mail.ru

TIKHONOVA Elena N. – PhD (Biological), Head of Landscape Architecture and Soil Science Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Associate Professor. SPIN-code: 4458-6010. ORCID: 0000-0002-9039-9822.

394087. Timiryazev str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: tichonova-9@mail.ru

ГОЛЯДКИНА Инна Вячеславовна – доцент кафедры ландшафтной архитектуры и почвоведения Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент. SPIN-код: 6628-5384. ORCID: 0000-0002-4532-3810.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: golyadkina@post.vgltu.ru

GOLYADKINA Inna V. – PhD (Agriculture), Associate Professor of Landscape Architecture and Soil Science Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Associate Professor. SPIN-code: 6628-5384. ORCID: 0000-0002-4532-3810.

394087. Timiryazev str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: golyadkina@post.vgltu.ru

ТРЕЩЕВСКАЯ Светлана Викторовна – старший преподаватель кафедры ландшафтной архитектуры и почвоведения Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 9504-4375. ORCID: 0000-0002-2363-8512.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: streshchevskaya@mail.ru

TRESHCHEVSKAYA Svetlana V. – PhD (Agriculture), Senior Teacher of Landscape Architecture and Soil Science Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov. SPIN-code: 9504-4375. ORCID: 0000-0002-2363-8512.

394087. Timiryazev str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: streshchevskaya@mail.ru

БОБРЕШОВ Константин Викторович – аспирант кафедры лесных культур, селекции и лесомелиорации Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: 1993177.21@mail.ru

BOBREHOV Konstantin V. – PhD student of Silviculture, Selection and Forest melioration Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov.

394087. Timiryazev str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: 1993177.21@mail.ru

ГАЛСТЯН Нарек Вараздатович – аспирант кафедры лесных культур, селекции и лесомелиорации Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова. ORCID: 0009-0003-6668-4708.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: galstyannar007@gmail.com

GALSTYAN Narek V. – PhD student of Silviculture, Selection and Forest melioration Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov. ORCID: 0009-0003-6668-4708.

394087. Timiryazev str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: galstyannar007@gmail.com

А.В. Данчева, С.В. Залесов, К.Э. Рапопорт, А.Р. Янишева

**ОСОБЕННОСТИ ЛЕСОВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА
ГАРЕЙ МАЛЫХ ПЛОЩАДЕЙ
В ЛЕСОСТЕПНОЙ И ТАЕЖНОЙ ЗОНАХ ТЮМЕНСКОЙ ОБЛАСТИ**

Введение. В основе принципа рационального, непрерывного, неистощительного лесопользования лежит решение одной из главных задач, а именно, устойчивого воспроизводства лесов, включающей в себя комплекс исследований закономерностей динамики лесов на этапе их возобновления под воздействием факторов природного и антропогенного характера и структурно-функциональных связей с внешними факторами окружающей среды [Макаров и др., 2019; Станкевич, 2021; Гаврилова, Грязькин, 2022; Танцырев, 2022].

В силу отмечаемой в последнее время устойчивой тенденции ежегодного увеличения площади лесных пожаров, особо актуальным на сегодняшний день становится оценка успешности послепожарного восстановления лесных участков [Галдин и др., 2018; Малиновских, Савин, 2019; Санникова и др., 2019; Цветков, Кудинов, 2019; Буряк, Каленская, 2020; Носов, Данчева, 2021]. Лесные пожары в большинстве случаев представляют собой катастрофический фактор резкой трансформации окружающей среды и компонентов лесных насаждений, в том числе возобновления, динамики, формирования и микроэволюции популяций большинства древесных пород. Это обосновывает необходимость понимания закономерностей лесообразовательного процесса на гарях в различных лесорастительных условиях с последующим моделированием динамики развития лесов в изменившейся обстановке.

Немаловажную роль в особенностях процесса лесовосстановления лесных участков, пройденных пожарами, играют природно-климатические условия [Жила и др., 2019; Морозов и др., 2021; Целитан и др., 2021; Макаров и др., 2022; Башегуров и др., 2023; Грязькин и др., 2023]. Определяющими факторами успешности адаптации к изменившимся после лесного пожара экологическим и лесорастительным условиям являются показатели достаточной обеспеченности территории гари соответствующими параметрами естественного лесовозобновления. В большинстве случаев с ухудшением условий произрастания отмечается сложность лесовосстановления. В связи с этим одним из условий успешности лесовосстановительного процесса гарей является использование зонально (подзонально)-типологической основы для анализа, учета состояния и прогноза ожидаемых результатов лесовосстановления, а также разработки лесохозяйствен-

ных мероприятий для сохранения и повышения формирующегося в этих условиях лесного насаждения.

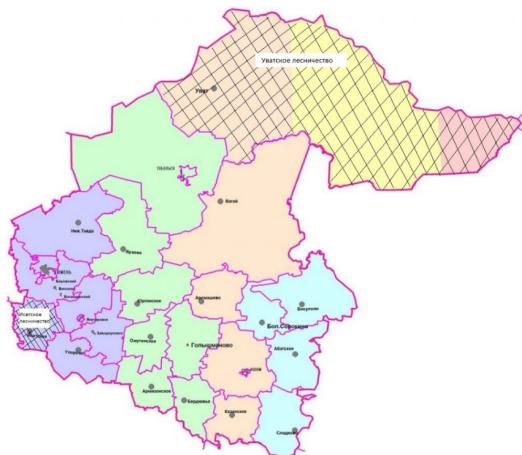
Одним из негативных с лесоводственной точки зрения последствий лесного пожара является замена хозяйствственно ценных лесообразующих пород на менее ценные, которая приводит к снижению выполнения соответствующих целевому назначению функций лесов. По статистическим данным за последние годы в Тюменской области до 600 тыс. га лесов каждый год подвергаются воздействию лесных пожаров.

Важное практическое значение имеет знание процессов естественного лесовозобновления и формирования молодняков на гарях в конкретных лесорастительных условиях.

Особенности естественного лесовосстановления гарей малых площадей в современных условиях ведения лесного хозяйства в Тюменской области с учетом специфики лесорастительных условий изучены недостаточно. В связи с этим обоснование режимов и условий успешности процесса лесовосстановления гарей малых площадей в Тюменской области является одним из важных и весьма актуальных вопросов.

Цель исследований – оценка успешности послепожарного лесовосстановления гарей малых площадей (до 10 га) в эксплуатационных лесах Исетского и Уватского лесничеств Тюменской области.

Объекты и методы исследования. Объектами исследований являлись две гари в Исетском и Уватском лесничествах Тюменской области (рис. 1).



*Рис. 1. Расположение Уватского и Исетского лесничеств
в Тюменской области*

Fig. 1. Location of the Uvatsky and Isetsky forestry in the Tyumen region

Объект I. Гарь, образовавшаяся после низового устойчивого пожара в 2008 г. в выделе 12 квартала 89 Исетского лесничества Тюменской области. Тип леса до пожара – сосняк ягодно-мшистый. Состав древостоя до пожара – 8С2Б+Ос. Площадь гари составляет 10 га.

Исетское лесничество Тюменской области находится в ее юго-западной части. По действующей классификации лесорастительного районирования леса Исетского лесничества относятся к Западно-Сибирскому подтаежному лесостепному району¹.

По целевому назначению в Исетском лесничестве преобладают эксплуатационные леса, доля которых составляет в среднем 85% от общей площади лесов лесничества. Главные лесообразующие породы – береза и сосна, доля которых составляет 59 и 28% соответственно.

Объект II. Гарь, образовавшаяся после низового устойчивого пожара осенью 2017 г. в выделе 14 квартала 303 Чебутанского участкового лесничества Уватского лесничества Тюменской области. Тип леса до пожара – сосняк зеленомошниково-травяной. Площадь гари составляет 4,5 га.

Уватский район территориально относится к Ханты-Мансийскому автономному округу – Югре. По действующей классификации лесорастительного районирования леса Уватского лесничества относятся к Западно-Сибирскому южно-таежному равнинному лесному району².

По целевому назначению в лесном фонде Уватского лесничества доминируют эксплуатационные леса, на долю которых приходится до 90% от общей площади лесов лесничества. Сосна и береза, на долю насаждений которых приходится до 38 и 37% от общей площади лесов соответственно, являются основными лесообразующими породами.

На объектах после пожара была проведена расчистка территории гари от древесины погибших деревьев для дальнейшего процесса ее естественного защ�ивания.

Исследования проведены во второй половине июля 2023 г. В процессе сбора экспериментального материала применялась методика сплошного перечета всходов и подроста на учетных лентах, заложенных на расстоянии 50 и 100 м от стены леса [Данчева и др., 2023]. При этом к всходам относился самосев в возрасте до двух лет. На учетных лентах через равное расстояние (5 м) закладывались учетные площадки размером $2 \times 2 \text{ м}^2$. Оценка возобновительного процесса на гарях проведена по данным заложенных 30 учетных площадок общей площадью 120 м^2 на каждой гари.

¹ Лесохозяйственный регламент Исетского лесничества Тюменской области. Тюмень, 2023. 268 с.

² Лесохозяйственный регламент Уватского лесничества Тюменской области. Тюмень, 2023. 357 с.

В процессе перечета подроста всех древесных пород распределялся по высотным группам. Учитывая отсутствие подроста высотой более 1,5 м на объекте II, нами была установлена следующая градация распределения подроста по высоте: мелкий (до 0,5 м), средний (0,5–1,0 м), крупный (свыше 1,0 м). Состояние подроста оценивалось по следующим категориям: жизнеспособный (Ж), сомнительный (С), нежизнеспособный (НЖ).

По результатам сбора данных определялся показатель встречаемости (Р) подроста, который рассчитывался по формуле:

$$P = \frac{n \times 100}{N}, \%, \quad (1)$$

где N – общее количество учетных площадок на пробной площади, шт.; n – число площадок с наличием подроста, шт.

В расчете показателя встречаемости учитывался только жизнеспособный подрост. При этом руководствовались нормативными значениями встречаемости подроста³. При встречаемости 65% и выше подрост характеризовался как равномерный, 40–65% – как неравномерный, а при наличии в биогруппах не менее 10 шт. мелких или 5 шт. средних и крупных экземпляров – как групповой.

Результаты исследований. Средние значения количественных показателей всходов и подроста в зависимости от расстояния от стены леса на изучаемых объектах представлены на рис. 2 и табл. 1.

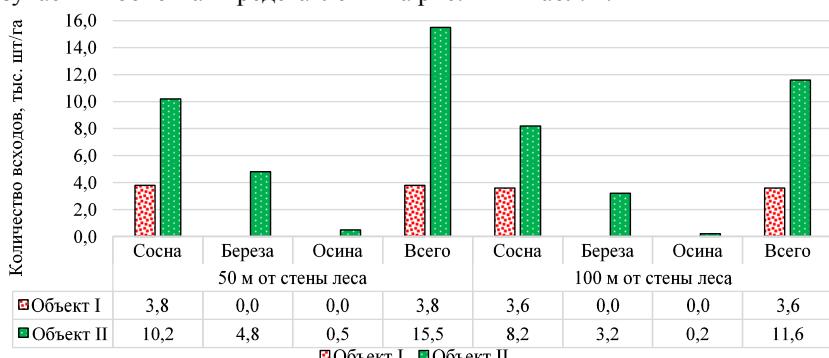


Рис. 2. Соотношение количества всходов на изучаемых объектах в зависимости от расстояния от стены леса

Fig. 2. The ratio of the number of seedlings on the studied objects depending on the distance from the forest wall

³ Приказ Минприроды России от 29.12.2021 № 1024 «Об утверждении Правил лесовосстановления, формы, состава, порядка согласования проекта лесовосстановления, оснований для отказа в его согласовании, а также требований к формату в электронной форме проекта лесовосстановления»

Таблица 1

Количество подроста и всходов на гарях в Тюменской области, шт./га**Seedlings and undergrowth quantity in the burned areas in the Tyumen region, pcs/ha**

Древесная порода	Объект I				Объект II			
	Высотная группа подроста			Всего	Высотная группа подроста			Всего
	мелкий	средний	крупный		мелкий	средний	крупный	
Расстояние от стены леса 50 м								
Сосна	16500	20800	24500	61800	25100	14100	–	39200
Береза	600	1200	–	1800	11800	16400	2700	30900
Осина	–	–	–	–	1600	1600	–	3200
Всего	17100	22000	24500	63600	38500	32100	2700	73300
Расстояние от стены леса 100 м								
Сосна	14500	1700	17500	49000	17200	7000	–	24200
Береза	200	–	200	400	6400	8600	1100	16100
Осина	–	–	–	–	800	1000	–	1800
Всего	14700	1700	17900	49400	24400	16600	1100	42100

По данным, приведенным на рис. 2, на объекте I возобновление представлено двумя древесными породами – сосновой и березой, на объекте II – тремя древесными породами: сосновой, березой и осиной.

На объекте I всходы представлены сосновой, на объекте II – сосновой, березой и осиной. При этом по общему количеству всходов на объекте II преобладает сосна (ее всходов в 3–8 раз больше в сравнении с количеством всходов березы и осины). С удалением от стены леса на объекте II отмечается снижение количества всходов в 1,3–2,0 раза. На объекте I количество всходов практически одинаково на анализируемых расстояниях от стены леса.

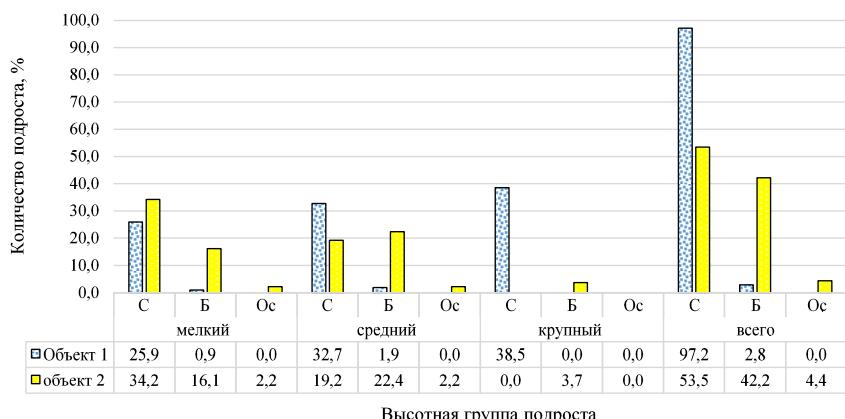
Анализ количественных показателей подроста на изучаемых гарях (табл. 1) показывает, что через 15 лет после лесного пожара на объекте I отмечается наличие подроста сосны во всех высотных группах, количества которого варьирует в среднем от 15,0 до 25,0 тыс. шт./га. Подрост березы присутствует в незначительном количестве (до 1,2 тыс. шт./га), характеризуется только мелкой и средней высотной группой.

На объекте II общее количество подроста сосны и березы варьирует в пределах 25–40 и 16–30 тыс. шт./га соответственно. Количество подроста осины не превышает 3 тыс. шт./га.

На изучаемых объектах наблюдается уменьшение количества подроста сосны (главной породы) с увеличением расстояния от стены леса. При этом стоит отметить, что на гари в Исетском лесничестве данная закономерность менее выражена в сравнении с гарью в Уватском лесничестве. Так, если на объекте II количество подроста сосны и березы снижается в среднем в 1,6 раза, то на объекте I – в 1,2 раза.

По данным, приведенным на рис. 3 и 4, в общем количестве подроста всех анализируемых высотных групп на каждом объекте преобладает подрост сосны. При этом на объекте I на расстоянии 50 м от стены леса наибольшим количеством характеризуется крупный по высоте подрост сосны. На расстоянии 100 м подрост распределен между высотными группами практически поровну. Одним из объяснений данного факта является 15-летний период послепожарного восстановления гари и естественного процесса перехода подроста из мелких высотных категорий в более крупные.

На объекте II отмечается преобладание подроста березы в средней высотной группе по сравнению с аналогичным показателем сосны. Данный факт объясняется вегетативной способностью березы.



Rис. 3. Соотношение подроста различных высотных групп на исследуемых гарях на расстоянии 50 м от стены леса

Fig. 3. The ratio of undergrowth of various altitude groups in the studied burned areas at a distance of 50 m from the forest wall

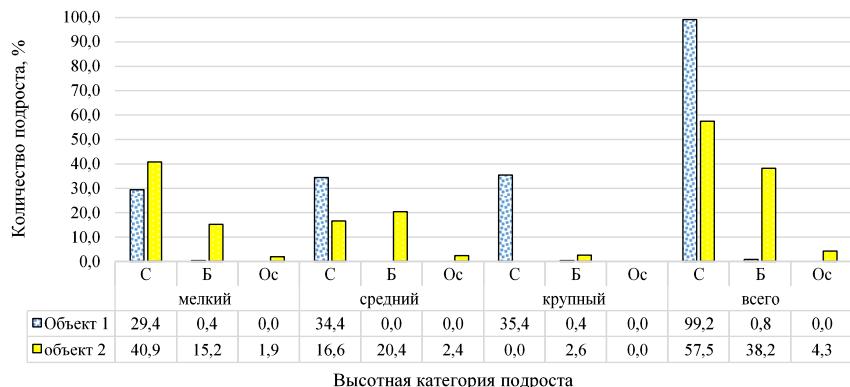


Рис. 4. Соотношение подроста различных высотных групп на исследуемых гарях на расстоянии 100 м от стены леса

Fig. 4. The ratio of undergrowth of various altitude groups in the studied burned areas at a distance of 100 m from the forest wall

По данным, приведенным на рис. 5 и 6, на изучаемых гарях преобладает жизнеспособный подрост сосны и березы, на долю которых в среднем приходится 67–100% от общего количества во всех высотных группах. На объекте II количество жизнеспособного подроста осины составляет не более 45%, что свидетельствует о преобладании сомнительного и нежизнеспособного подроста осины на данной гари.

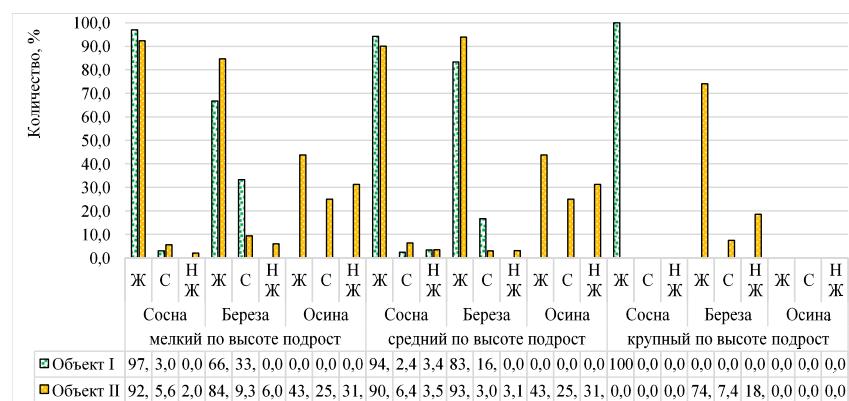


Рис. 5. Соотношение подроста каждой древесной породы по состоянию на объектах на расстоянии 501 м от стены леса, %

Fig. 5. The ratio of undergrowth of each tree species according to the condition of objects at a distance of 50 m from the forest wall, %

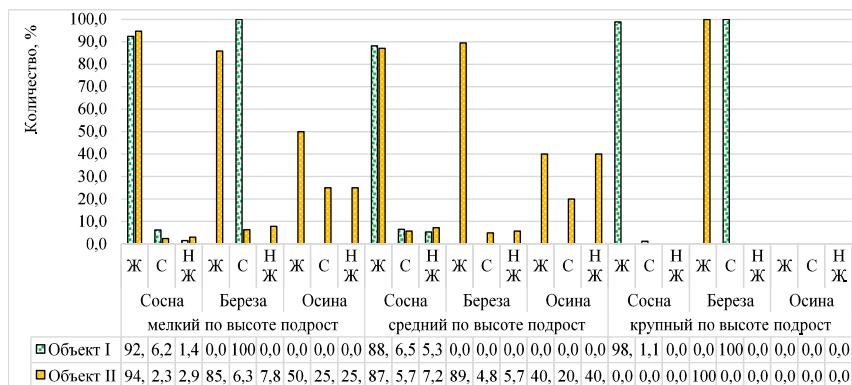


Рис. 6. Соотношение подроста каждой древесной породы по состоянию на объектах на расстоянии 100 м от стены леса, %

Fig. 6. The ratio of undergrowth of each tree species according to the condition of objects at a distance of 100 m from the forest wall, %

Для достоверности оценки успешности естественного лесовосстановления изучаемых гарей руководствовались несколькими нормативными показателями. По разработанным В.Г. Нестеровым критериям естественного возобновления леса [1948] изучаемые объекты характеризуются достаточным (хорошим), превышающим необходимое значение показателя количества жизнеспособного подроста (более 10 тыс. шт./га), возобновительным процессом.

Согласно действующим нормативам оценки лесовосстановительного процесса с учетом лесорастительных условий⁴ доля жизнеспособного подроста главной древесной породы (сосны) на объекте I составляет 93–97%, на объекте II – 90–93%, что в количественном выражении составляет 45–60 тыс. шт./га и 15–39 тыс. шт./га соответственно. Полученные значения в десятки раз превышают нормативные показатели (2,0 тыс. шт./га), что является достаточным условием для характеристики успешности лесовосстановительного процесса изучаемых гарей после 5–15 лет после лесного пожара.

Согласно данным, приведенным на рис. 7 и 8, на объекте I показатель встречаемости подроста сосны во всех высотных категориях составляет в

⁴ Приказ Минприроды России от 29.12.2021 № 1024 «Об утверждении Правил лесовосстановления, формы, состава, порядка согласования проекта лесовосстановления, оснований для отказа в его согласовании, а также требований к формату в электронной форме проекта лесовосстановления»

среднем 100%, что указывает на равномерное размещение его по всей площади гари. При этом показатель встречаемости жизнеспособного подроста березы, даже на расстоянии 50 м от стены леса, не превышает 8%, что свидетельствует о его куртинном (групповом) размещении. Одним из объяснений этого является преобладание вегетативного возобновления березы от пня на данной гари.

На объекте II наблюдается равномерное распределение подроста сосны и березы всех высотных групп по площади гари, за исключением крупного подроста сосны, который отсутствует. При этом показатель встречаемости подроста осины указывает на его неравномерное (куртинное) размещение по площади гари.

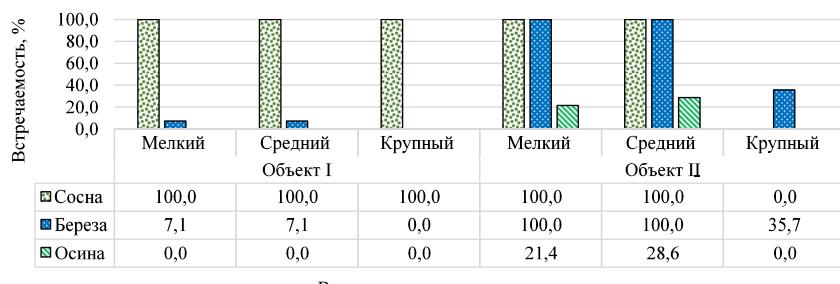


Рис. 7. Показатели встречаемости жизнеспособного подроста на исследуемых объектах на расстоянии 50 м от стены леса, %

Fig. 7. Indicators of the occurrence of viable undergrowth at the studied sites at a distance of 50 m from the forest wall, %

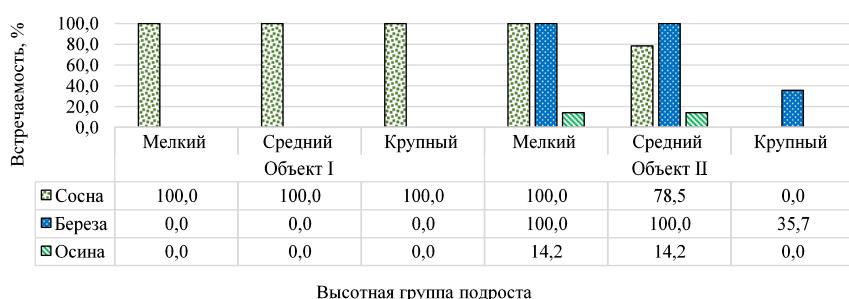


Рис. 8. Показатели встречаемости жизнеспособного подроста на исследуемых объектах на расстоянии 100 м от стены леса, %

Fig. 8. Indicators of the occurrence of viable undergrowth at the studied sites at a distance of 100 m from the forest wall, %

Выходы.

1. На изучаемых гарях в свежих лесорастительных условиях Исетского и Уватского лесничеств Тюменской области площадью до 10 га процесс естественного лесовосстановления спустя 5–15 лет после лесного пожара протекает довольно успешно;
2. Непрерывность естественного лесовозобновительного процесса на объектах исследования подтверждается наличием всходов и подроста различных высотных групп;
3. На гарях через 15 лет после лесного пожара формируется практически идентичный допожарному состав подроста с преобладанием сосны;
4. На всех объектах наблюдается преобладание жизнеспособного подроста сосны и березы, в среднем до 60–100% от общего его количества;
5. Подрост осины, встречающийся на объекте II и представленный мелкой высотной группой, характеризуется количеством, в среднем, до 3 тыс. шт./га. В силу биологической особенности осины, заключающейся в интенсивном росте, в дальнейшем необходимо проводить мониторинг состояния и количества подроста осины и применять соответствующие мероприятия для предотвращения смены пород;
6. Показатель встречаемости подроста сосны во всех высотных группах, за исключением крупного подроста на объекте II, составляет в среднем 80–100%, что указывает на достаточно равномерное размещение его по всей площади гары;
7. Согласно действующим нормативам по количеству жизнеспособного подроста на изучаемых гарях естественное лесовосстановление на данном этапе развития оценивается как успешное или хорошее. При этом необходимо уделять внимание накоплению подроста березы и осины для недопущения смены пород;
8. В качестве лесохозяйственных мероприятий можно предложить проведение мониторинга состояния подроста и мероприятия по уходу за ним. Для более детального анализа и получения достоверных данных лесовосстановления вырубок исследуемого района необходимо продолжить исследования.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Башегуров К.А., Белов Л.А., Залесов С.В., Осипенко А.Е., Попов А.С., Розинкина Е.П. Эффективность естественного и искусственного лесовосстановления на гарях Западно-Сибирского северо-таежного равнинного лесного района // Леса России и хозяйство в них. 2023. № 2(85). С. 4–15. DOI: 10.51318/FRET.2023.39.51.001

Буряк Л.В., Каленская О.П. Влияние пожаров на формирование насаждений Нижнего Приангарья. Пушкино: ВНИИЛМ, 2020. 140 с.

Гаврилова О.И., Грязькин А.В. Особенности самовозобновления сосны на гарях // Лесной вестник. 2022. Т. 26, № 3. С. 69–74.

Галдин В.К., Беспаленко О.Н., Михин В.И. Пирогенные изменения в порослевых дубравах // Лесотехнический журнал. 2018. № 4. С. 58–66. DOI: 10.12737/article_5c1a3209194713.59798372

Грязькин А.В., Гаврилова О.И., Чэн Тун, Семенова Е.А. Структурные особенности лесных фитоценозов формирующихся на скальниках после пожара // Лесной вестник / Forestry Bulletin. 2023. Т. 27, № 3. С. 18–25. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-18-25

Данчева А.В., Залесов С.В., Попов А.С. Лесной экологический мониторинг. Екатеринбург: УГЛТУ, 2023. 145 с.

Жила С.В., Иванова Г.А., Иванов В.А., Цветков П.А. Лесовозобновление после пожаров разной интенсивности в сосновках Средней Сибири // Сибирский лесной журнал. 2019. № 6. С. 53–62. DOI: 10.15372/SJFS20190606

Макаров В.П., Малых О.Ф., Горбунов И.В., Пак Л.Н., Зима Ю.В., Банщикова Е.А., Желибо Т.В. Влияние пожаров на флористическое разнообразие сосновых лесов Восточного Забайкалья // ИВУЗ. Лесной журнал. 2019. № 1. С. 77–86. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.77.11

Макаров В.П., Желибо Т.В., Малых О.Ф., Банщикова Е.А., Зима Ю.В. Изменения структуры и биоразнообразия лиственничных лесов в верхнем течении р. Хилок (бассейн оз. Байкал) под воздействием пожаров // Лесной вестник. 2022. Т. 26, № 5. С. 54–63. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-5-54-63

Малиновских А.А., Савин М.А. Естественное лесовосстановление на гарях в ленточных борах Западной Сибири // Хвойные бореальные зоны. 2019. Т. 37, № 3–4. С. 223–228.

Морозов А.Е., Холкин С.В., Строганов Е.А. Эффективность лесной рекультивации земель, нарушенных при добыче торфа (на примере Басыновского месторождения) // Леса России и хозяйство в них. 2021. № 1(76). С. 12–22.

Нестеров В.Г. Методика изучения естественного возобновления леса. Красноярск: СИБТИ, 1948. 75 с.

Носов А.А., Данчева А.В. Особенности естественного лесовозобновления гарий Урайского лесничества ХМАО // Леса России и хозяйство в них. 2021. № 3(78). С. 38–47. DOI: 10.51318/FRET.2021.66.66.005

Санникова Н.С., Санников С.Н., Кочубей А.А., Петрова И.В. Естественное возобновление сосны на гарях в лесостепи Западной Сибири // Сибирский лесной журнал. 2019. № 5. С. 22–29. DOI: 10.15372/SJFS20190503

Станкевич Т.С. Прогнозирование пространственного поведения лесного пожара при неопределенности и нестационарности процесса // ИВУЗ. Лесной журнал. 2021. № 1. С. 20–34. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-20-34

Танцырев Н.В. Начальная фаза формирования послепожарных горных кедровников на Северном Урале // Хвойные бореальные зоны. 2022. Т. 40, № 5. С. 395–403. DOI: 10.53374/1993-0135-2022-5-395-403

Цветков П.А., Кудинов Е.Н. Оценка пожароустойчивости сосняков Красноярской лесостепи, пройденных несплошными рубками // Сибирский лесной журнал. 2019. № 5. С. 54–60. DOI: 10.15372/SJFS20190507

Целитан И.А., Соколов В.А., Данилин И.М. Структура и рост насаждений, формирующихся на гарях и вырубках в Красноярском Приангарье // Сибирский лесной журнал. 2021. № 4. С. 34–47. DOI: 10.15372/SJFS20210403

References

- Bashegurov K.A., Belov L.A., Zalesov S.V., Osipenko A.E., Popov A.S., Rozinkina E.P. Efficiency of natural and artificial forest management in the burning areas of the West Siberian North Taiga lowland Forest region. *Forests of Russia and their management*, 2023, no. 2(85), pp. 4–15. DOI: 10.51318/FRET.2023.39.51.001. (In Russ.)
- Buryak L.V., Kalenskaya O.P. The influence of fires on the formation of the population of the Lower Angara region. Pushkino: All-Russian Scientific Research Institute of Forestry and Forestry Mechanization, 2020. 140 p. (In Russ.)
- Gavrilova O.I., Gryaz'kin A.V. Features of spontaneous combustion of pine on Burning. *Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 3, pp. 69–74. (In Russ.)
- Galdin V.K., Bespalenko O.N., Mikhin V.I. Pyrogenic changes in oak forests. *Russian Forestry Journal*, 2018, no. 4, pp. 58–66. DOI: 10.12737/article_5c1a3209194713.59798372. (In Russ.)
- Gryaz'kin A.V., Gavrilova O.I., Cheng Tong, Semenova E.A. Structural features of forest phytocenoses formed on rocks after a fire. *Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 3, pp. 18–25. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-18-25. (In Russ.)
- Dancheva A.V., Zalesov S.V., Popov A.S. Forest ecological monitoring. Yekaterinburg: Ural State Forestry University, 2023. 146 p. (In Russ.)
- Makarov V.P., Malykh O.F., Gorbunov I.V., Pak L.N., Zima Yu.V., Banshchikova E.A., Zhelibo T.V. The effect of fires on the floristic diversity of pine forests of Eastern Transbaikalia. *IVUZ. Forestry Journal*, 2019, no. 1, pp. 77–86. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.77.11. (In Russ.)
- Makarov V.P., Zhelibo T.V., Malykh O.F., Banshchikova E.A., Zima Yu.V. Changes in the structure and biodiversity of larch forests in the upper reaches of the Khilok River (Lake Baikal basin) under the influence of fires. *Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 5, pp. 54–63. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-5-54-63. (In Russ.)
- Malinovskykh A.A., Savin M.A. Natural reforestation on burning fires in ribbon forests of Western Siberia. *Coniferous boreal zones*, 2019, vol. 37, no. 3–4, pp. 223–228. (In Russ.)
- Morozov A.E., Kholkin S.V., Stroganov E.A. Efficiency of forest reclamation of lands disturbed during peat extraction (on the example of the Basyanovskoye field). *Forests of Russia and their management*, 2021, no. 1(76), pp. 12–22. (In Russ.)

Nesterov V.G. Methodology for studying forest natural regeneration. Krasnoyarsk: SibTI, 1948. 75 p. (In Russ.)

Nosov A.A., Dancheva A.V. Features of natural afforestation of the burned areas in Urai forestry of the KhMAO. *Forests of Russia and their management*, 2021, no. 3(78), pp. 38–47. DOI: 10.51318/FRET.2021.66.66.005. (In Russ.)

Sannikova N.S., Sannikov S.N., Kochubey A.A., Petrova I.V. Natural reproduction of pine on burning grounds in the forest-steppe of Western Siberia. *Siberian Forest Journal*, 2019, no. 5, pp. 22–29. DOI: 10.15372/SJFS20190503. (In Russ.)

Stankevich T.S. Forecasting the spatial behavior of a forest fire under uncertainty and unsteadiness of the process. *Russian Forestry Journal*, 2021, no. 1, pp. 20–34. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-20-34. (In Russ.)

Tantsyrev N.V. The initial phase of the formation of post-fire mountain cedar forests in the Northern Urals. *Coniferous boreal zones*, 2022, vol. 40, no. 5, pp. 395–403. DOI: 10.53374/1993-0135-2022-5-395-403. (In Russ.)

Tselitan I.A., Sokolov V.A., Danilin I.M. Structure and growth of plantations formed on burning and cutting in the Krasnoyarsk Angara region. *Siberian Forest Journal*, 2021, no. 4, pp. 34–47. DOI: 10.15372/SJFS20210403. (In Russ.)

Tsvetkov P.A., Kudinov E.N. Assessment of fire resistance of pine forests of the Krasnoyarsk forest-steppe, traversed by impassable logging. *Siberian Forest Journal*, 2019, no. 5, pp. 54–60. DOI: 10.15372/SJFS20190507. (In Russ.)

Zhila S.V., Ivanova G.A., Ivanov V.A., Tsvetkov P.A. Reforestation after fires of varying intensity in the pine forests of Central Siberia. *Siberian Forest Journal*, 2019, no. 6, pp. 53–62. DOI: 10.15372/SJFS20190606. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 12.02.2024

Данчева А.В., Залесов С.В., Рапопорт К.Э., Янишева А.Р. Особенности лесовосстановительного процесса гарей малых площадей в лесостепной и таежной зонах Тюменской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 252. С. 40–54. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.40-54

Представлены результаты исследований естественного лесовосстановления гарей площадью до 10 га в условиях Западно-Сибирского южно-таежного равнинного лесного района (на примере Уватского лесничества) и Западно-Сибирского подтаежного лесостепного лесного района (на примере Исетского лесничества). Данные исследований показали, что через 5–15 лет после лесного пожара на анализируемых гарях по количественным и качественным показателям возобновления основных лесообразующих пород (сосна, береза) отмечается достаточно непрерывный процесс лесовозобновления. По количеству всходов и подроста преобладает сосна. Количественные показатели жизнеспособного подроста сосны, превышающие в 5–10 раз нормативные значения,

свидетельствуют об успешности лесовосстановления. Установлено, что с увеличением расстояния от стены леса отмечается общая закономерность снижения количественных показателей всходов и подроста. Так, на расстоянии 100 м от стены леса происходит уменьшение количества всходов и подроста во всех высотных категориях в 1,5–2 раза в сравнении с аналогичными показателями на расстоянии 50 м от стены леса независимо от вида древесной породы. Наблюдается преобладание жизнеспособного подроста сосны – до 60–100% от общего его числа во всех высотных категориях. По рассчитанному показателю встречаемости подроста с характеристикой состояния «жизнеспособный» во всех высотных категориях возобновление главной древесной породы (сосны) можно оценивать как равномерное. В таежных условиях отмечается наличие крупного по высоте жизнеспособного подроста осины в количестве до 2,0 тыс. шт./га. Данный факт является поводом для более внимательного анализа лесовосстановительного процесса в этих условиях с последующими действиями по недопущению смены пород. Для этого можно предложить проведение лесохозяйственных мероприятий таких, как мониторинг состояния подроста и рубки ухода за подростом.

Ключевые слова: гарь, естественное лесовозобновление, древесные породы, показатели подроста.

Dancheva A.V., Zalesov S.V., Rapoport K.E., Yanyshsheva A.R. Features of the reforestation process of small-area burned area in the forest-steppe and taiga zone of the Tyumen region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 252, pp. 40–54 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.40-54

The results of post-fire natural forest restoration on burned area up to 10 hectares of the south taiga zone of Western Siberia (e.g. Uvat forestry) and the subtaiga forest-steppe forest area (e.g. Iset forestry) are presented. Research data have shown that in 5–15 years after a wildfire according to the quantitative and qualitative indicators of main forest-forming species (pine, birch) regeneration there is a continuous forest restoration process. Pine natural regeneration is assessed as “normal” due to normative indicators. It was found that with the increasing distance from the forest border there is a common pattern of decreasing quantity of seedlings and undergrowth. It is proved that at a distance of 100 m from the forest border the number of seedlings and undergrowth in all height categories is by 1.5–2 times lower compared at a distance of 50 m from the forest border. There is a predominance of vital pine undergrowth – up to 60–100%. According to the indicator of pine undergrowth frequency, reforestation is going in the entire territory of the burnt area. In taiga conditions, there is a sufficient amount of large-sized viable aspen undergrowth in sufficient quantity (up to 2.0 thousand pcs / ha). This is the evidence of the successful reforestation of burned areas at this stage of development.

Keywords: burned area, natural reforestation, tree species, undergrowth indicators.

ДАНЧЕВА Анастасия Васильевна – профессор кафедры лесного хозяйства, деревообработки и прикладной механики Государственного аграрного университета Северного Зауралья, доктор сельскохозяйственных наук. ORCID: 0000-0002-5230-7288.

425003, ул. Республики, д. 7, г. Тюмень, Россия. E-mail: a.dancheva@mail.ru

DANCHEVA Anastasiya V. – DSc (Agricultural), Professor of the Department of Forestry, Woodworking and Applied Mechanics, State Agrarian University of the Northern Urals. ORCID: 0000-0002-5230-7288.

425003. Respubliki str. 7. Tyumen. Russia. E-mail: a.dancheva@mail.ru

ЗАЛЕСОВ Сергей Вениаминович – заведующий кафедрой лесоводства Уральского государственного лесотехнического университета, доктор сельскохозяйственных наук, профессор. ORCID: 0000-0003-3779-410x.

620100, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: Zalesovsv@m.usfeu.ru

ZALESOV Sergey V. – DSc (Agricultural), Head of the Department of Forestry, Ural State Forestry Engineering University. ORCID: 0000-0003-3779-410x.

620100. Siberian Tract str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: Zalesovsv@m.usfeu.ru

РАПОПОРТ Карина Эдуардовна – магистрант Государственного аграрного университета Северного Зауралья.

425003, ул. Республики, д. 7, г. Тюмень, Россия.

RAPOPORT Karina E. – master's student, State Agrarian University of the Northern Urals.

425003. Respubliki str. 7. Tyumen. Russia.

ЯНИШЕВА Алина Ренатовна – магистрант Государственного аграрного университета Северного Зауралья.

425003, ул. Республики, д. 7, г. Тюмень, Россия.

YANISHEVA Alina R. – master's student, State Agrarian University of the Northern Urals.

425003. Respubliki str. 7. Tyumen. Russia.

Н.Н. Бессчетнова, В.П. Бессчетнов

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ХВОИ СОСНЫ ГОРНОЙ ПРИ ИНТРОДУКЦИИ В НИЖЕГОРОДСКУЮ ОБЛАСТЬ

Введение. Интродукция, как одна из традиционных сфер хозяйственной деятельности [Головкин, 1981], располагает хорошо развитой теоретической платформой [Базилевская, 1964; Лапин и др., 1979; Бессчетнова, 1983], совершенным арсеналом методических инструментов, системой объективных критериев и индикаторов оценки эффективности проводимых мероприятий [Культиасов, 1953; Шлыков, 1963]. В наши дни она неизменно выступает действенным средством расширения и совершенствования породного состава искусственных насаждений различного целевого назначения и конструкций [Лапин и др., 1979; Бессчетнова и др., 2017; Кулькова и др., 2018, 2020; Бабаев и др., 2021; Есичев и др., 2022; Kulkova et al., 2022]. При этом особую важность приобретают усилия по адаптации и введению в культуру представителей наиболее значимых в хозяйственном плане древесных пород [Лапин и др., 1979; Воробьев, Тебенькова, 2013а, б; Бессчетнов и др., 2018; Кулькова и др., 2018; Есичев и др., 2022; Kulkova et al., 2022]. В данный перечень, безусловно, входят многочисленные виды рода Сосна (*Pinus L.*). Их высокая адаптивность и экологическая пластичность, обширность зоны распространения и многостороннее практическое применение подробно описаны российскими [Алехин, 1951; Правдин, 1964; Мамаев, 1972; Моллаева, Темботова, 2024] и зарубежными [Mátyás et al., 2023; Alade et al., 2024; Bravo-Fernández et al., 2024] исследователями. В настоящее время на территории России идентифицировано 16 аборигенных и 73 инорайонных вида сосен [Орлова, 2001], среди которых сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris L.*) рассматривается как наиболее востребованная в утилитарном отношении [Алехин, 1951; Правдин, 1964; Мамаев, 1972], а сосна горная (*Pinus mugo Turra*) признается весьма перспективной в указанном плане [Popovic, 1976; Nardi, Minghetti, 1999; Charra-Vaskou, Mayr, 2011; Dai et al., 2017]. Они неизменно находятся в поле зрения российских [Besschetnova et al., 2023; Feklistov et al., 2023; Gorelov et al., 2023] и иностранных исследователей [Bobowicz, Krzakowa, 1986; Christensen, 1987; Hamerník, Musil,

2007], в работах которых нашли отражение итоги проведения селекционных [Старова и др., 1990; Раевский, 2013; Besschetnova et al., 2023; Gorelov et al., 2023] и интродукционных [Zeidler et al., 2012; Korznikov, 2016] мероприятий, вскрыты многие аспекты, касающиеся морфологии [Бессчетнова, Бессчетнов, 2017; Boratyńska et al., 2004, 2015], физиологии [Васфилов, 2005; Шавнин и др., 2023; Charra-Vaskou, Mayr, 2011; Celiński et al., 2019], пигментного состава [Тарханов и др., 2023; Wachowiak et al., 2004; Peguero-Pina et al., 2008] и других характеристик хвои [Boratyńska et al., 2004]. Традиционно используемая в целом ряде стран сосна горная [Bobowicz, Krzakowa, 1986; Christensen, 1987; Hamerník, Musil, 2007] относится к числу экзотов Нижегородского Поволжья, которые лишь в последнее время стали широко использоваться в создании объектов городского озеленения. Перспективность её успешного расселения в новых местах обитания обусловливается тем, что сложившиеся в регионе лесорастительные условия предопределяют широкое распространение и успешное развитие хвойных древесных пород средней полосы Северного полушария [Алехин, 1951; Аверкиев, 1954]. Во многом это подтверждается имеющимися сведениями о генетической близости и гибридизации между естественно произрастающей здесь сосновой обыкновенной и инорайонной сосновой горной [Christensen, 1987; Boratynska, Boratynski, 2007; Wachowiak et al., 2016; Kormutak et al., 2019; Klobučník et al., 2021, 2022]. На фоне проведения масштабных и разносторонних исследований сосны обыкновенной в Нижегородской области [Бессчетнова, Бессчетнов, 2017; Besschetnova et al., 2023; Gorelov et al., 2023] сосна горная здесь пока еще мало изучена.

Цель работы – сравнительная оценка морфометрических параметров хвои сосны горной и сосны обыкновенной в лесорастительных условиях Нижегородского Поволжья.

Материалы и методика исследований. Объектом исследований служили саженцы сосны горной и сосны обыкновенной, произраставшие в школьном отделении учебно-опытного питомника Нижегородского государственного агротехнологического университета с географическими координатами $56^{\circ}19'43''$ с.ш. $44^{\circ}00'07''$ в.д. и абсолютной высотой 141 м. Для выращивания сеянцев, а затем саженцев сосны горной, равно как и сосны обыкновенной, использованы семена местной репродукции (ГАО НО «Семеновский спецсемлесхоз») одного года заготовки. Маточные растения сосны горной (источники семян) дислоцированы на интродукционном участке указанного спецсемлесхоза, куда были завезены из ГУП МО

«Ивантеевский лесной селекционный опытно-показательный питомник». Семена сосны обыкновенной заготовлены в нормальных насаждениях Семеновского лесничества. По лесорастительному районированию его территории лежит в границах района хвойно-широколиственных лесов европейской части Российской Федерации, который входит в зону хвойно-широколиственных лесов. В нем распространены серые лесные, а также дерново-подзолистые и подзолистые почвы, климат относительно влажный с умеренно тёплым и влажным летом и умеренно сухой снежной зимой. Методологический подход предусматривал реализацию принципа единственного логического различия и соблюдение ключевых требований к организации опыта – пригодности, типичности, целесообразности и надежности. Элиминация дифференцирующего эффекта экологических факторов достигалась введением в комплекс сравнения объектов и соответствующих им биологических образцов только в пределах одного опытного участка с едиными схемами и сроками рядовой посадки, одинаковой агротехникой создания и выращивания, однотипным видом и одним возрастом исходного посадочного материала. Размещение посадочных мест (70×35 см) рандомизировано, что позволило реализовать принципы случайности, равномерности и повторности учетных единиц для каждого вида сосны. Это исключило целенаправленное предоставление какому-либо из семенных потомств (аборигенов и интродуцентов) преимуществ в условиях произрастания и формирования габитуальных и иных характеристик, в частности, побегов и хвои. Сведенное к минимуму влияние факторов среды на проявление различий по анализируемым признакам позволило объяснить их наличие только влиянием генотипически обусловленной специфики изучаемых объектов на межвидовом и внутривидовом уровне. Исключение влияния фактора времени, порождающего хронографическую изменчивость, обеспечивалось одновременной заготовкой образцов, синхронными наблюдениями и учетами показателей, сравнением только одновозрастных деревьев, их частей и органов.

Теоретической платформой проведенных исследований служили имеющиеся фундаментальные публикации по заданной тематике [Цельниker, 1955; Котов, 1995]. Работы выполнены полевым стационарным и лабораторным методами в третьей декаде ноября 2023 г., что в фенологическом плане соответствовало завершению фазы перехода растений в состояние зимнего покоя. Оба вида сосны были представлены в 14 повторностях, которыми выступали учетные деревья, выбранные в случайному порядке по принципу типичности. С каждого из них заготовлено по 5 побегов приро-

ста текущего года, которые служили источником биологических проб (20 парных пучков хвои с каждого побега). Общее количество последних составило 1400 единиц по каждому виду, содержащих в сумме 5600 хвоинок. Брахибласты с признаками поражения хвои биотическими и абиотическими факторами отбраковывались и не включались в выборку. Предметом исследования выступала способность особей сравниваемых видов, находящихся в ювенильной фазе онтогенеза, формировать в течение одного вегетационного периода листовой аппарат. Измерения линейных параметров хвои проведены электронным штангенциркулем FinePower DC0220 с точностью до 0,01 мм. Массу навески определяли на прецизионных аналитических весах Acculab Vicon VIC-300d3 с точностью до 0,001 г. Статистический и дисперсионный анализ осуществлен согласно традиционным организационно-методическим схемам, масштабы изменчивости определяли по шкале С.А. Мамаева [1972].

Результаты исследования. Установлены заметные фенотипические различия по линейным параметрам и массе 1-летней хвои как между сравниваемыми видами, так и между особями, принадлежащими каждому из них (табл. 1–3).

Таблица 1

Длина 1-летней хвои двух видов сосны
The length of 1-year-old needles of two pine species

Зоны	M±m	СКО	max.	min.	Δlim	Cv, %	t	P, %
Сосна горная								
Дерево 1	6,14±0,085	0,85	8,70	4,20	4,50	13,85	72,22	1,38
Дерево 2	7,91±0,162	1,62	10,35	4,30	6,05	20,48	48,84	2,05
Дерево 3	5,81±0,129	1,29	8,65	3,85	4,80	22,23	44,98	2,22
Дерево 4	7,54±0,150	1,50	9,40	4,10	5,30	19,90	50,25	1,99
Дерево 5	6,88±0,147	1,47	9,80	4,40	5,40	21,41	46,70	2,14
Дерево 6	7,08±0,193	1,93	10,50	3,40	7,10	27,25	36,69	2,73
Дерево 7	7,72±0,241	2,41	13,20	3,60	9,60	31,27	31,98	3,13
Дерево 8	5,89±0,082	0,82	8,90	4,00	4,90	13,88	72,03	1,39
Дерево 9	6,34±0,130	1,30	9,00	4,30	4,70	20,53	48,71	2,05
Дерево 10	7,32±0,156	1,56	9,90	4,30	5,60	21,30	46,94	2,13

Окончание табл. 1

Зоны	M±m	СКО	max.	min.	Δlim	Cv, %	t	P, %
Дерево 11	6,73±0,177	1,77	11,00	4,00	7,00	26,23	38,12	2,62
Дерево 12	8,33±0,101	1,01	10,60	3,35	7,25	12,13	82,44	1,21
Дерево 13	7,16±0,079	0,79	8,65	3,85	4,80	11,02	90,77	1,10
Дерево 14	8,08±0,215	2,15	11,40	3,00	8,40	26,63	37,56	2,66
Total	7,07±0,046	1,72	13,20	3,00	10,20	24,34	153,71	0,65
Сосна обыкновенная								
Дерево 1	4,60±0,095	0,95	6,50	2,05	4,45	20,57	48,61	2,06
Дерево 2	3,90±0,072	0,72	5,20	2,00	3,20	18,47	54,13	1,85
Дерево 3	5,60±0,157	1,57	7,50	1,50	6,00	28,05	35,65	2,80
Дерево 4	4,63±0,065	0,65	6,10	3,05	3,05	14,05	71,15	1,41
Дерево 5	4,21±0,103	1,03	6,40	2,20	4,20	24,55	40,73	2,45
Дерево 6	4,17±0,075	0,75	8,50	2,30	6,20	17,97	55,66	1,80
Дерево 7	3,92±0,063	0,63	5,40	2,50	2,90	15,96	62,67	1,60
Дерево 8	4,96±0,098	0,98	6,95	2,15	4,80	19,82	50,44	1,98
Дерево 9	4,58±0,129	1,29	6,90	2,00	4,90	28,27	35,38	2,83
Дерево 10	5,10±0,105	1,05	7,70	3,00	4,70	20,56	48,65	2,06
Дерево 11	5,06±0,126	1,26	7,50	1,80	5,70	24,84	40,26	2,48
Дерево 12	3,50±0,050	0,50	5,00	2,00	3,00	14,34	69,72	1,43
Дерево 13	4,85±0,179	1,79	9,20	2,40	6,80	37,00	27,03	3,70
Дерево 14	3,50±0,040	0,40	4,50	2,50	2,00	11,30	88,46	1,13
Total	4,47±0,032	1,20	9,20	1,50	7,70	26,90	139,11	0,72

Примечание: M – среднее арифметическое, см; m – ошибка выборочного среднего, см; СКО – среднеквадратическое отклонение, см; max. – абсолютный максимум, см; min. – абсолютный минимум, см; Δlim – диапазон лимитов, см; Cv – коэффициент вариации, %; t – опытное значение критерия Стьюдента ($t_{0,05} = 1,98$; $t_{0,01} = 2,63$); P – относительная ошибка или точность опыта, %; Total – обобщенное среднее в пределах вида, см

Весьма информативным параметром хвои выступает её длина, в нашем случае рассматривавшаяся как среднее значение для пары хвоинок, сформировавшихся в пучке на одном брахибласте (табл. 1). Так, у сосны горной указанные значения учетных деревьев составили от $5,81\pm0,129$ см и

$5,89 \pm 0,082$ см до $8,33 \pm 0,101$ см и $8,08 \pm 0,215$ см. При этом на фоне обобщенного среднего ($7,07 \pm 0,046$ см) внутривидовое превышение большего над меньшим достигло 2,52 см (иными словами, они различаются в 1,43 раза). Разброс величин, оцениваемый диапазоном лимитов ($\Delta\text{lim} = \text{max.} - \text{min.}$), оказался равным 10,20 см ($\text{max.} = 13,20$ см; $\text{min.} = 3,00$ см), а их отношение – 4,40, что в оценках по коэффициенту вариации ($Cv = 24,34\%$) соответствовало среднему уровню изменчивости по шкале Мамаева ($Cv = 16\dots25\%$). В пределах отдельного учетного дерева изменчивость хотя и относилась к тому же уровню (от 11,02% до 26,63%), но в среднем была несколько меньше (20,58%). Аналогичные параметры у сосны обыкновенной в целом были заметно ниже – от $3,50 \pm 0,040$ см до $5,60 \pm 0,157$ см, что дало превышение большего над меньшим на 2,10 см (в 1,6 раза). Обобщенное в пределах представителей вида среднее зафиксировано на уровне $4,47 \pm 0,032$ см, а соответствующий ему абсолютный диапазон Δlim составил 7,70 см ($\text{max.} = 9,20$ см; $\text{min.} = 1,50$ см) при отношении лимитов 6,13. Внутривидовая фенотипическая дисперсия в этом случае оказалась более заметной. Сопоставление средних величин разных видов сосен обнаружило превосходство сосны горной по этому признаку на 2,60 см или в 1,58 раза.

Близким в смысловом отношении признаком (который, как и средняя длина хвоинок в пучке, относится к производным от длины, зафиксированной при непосредственном измерении) является суммарная длина хвои в её парном пучке, сформировавшемся на отдельном брахибласте (табл. 2).

Таблица 2

Суммарная длина хвои в одном пучке у двух видов сосны

The total length of needles in one bundle of two pine species

Зоны	$M \pm m$	СКО	max.	min.	Δlim	$Cv, \%$	T	P, %
Сосна горная								
Дерево 1	$12,29 \pm 0,170$	1,70	17,40	8,40	9,00	13,85	72,22	1,38
Дерево 2	$15,83 \pm 0,324$	3,24	20,70	8,60	12,10	20,48	48,84	2,05
Дерево 3	$11,62 \pm 0,258$	2,58	17,30	7,70	9,60	22,23	44,98	2,22
Дерево 4	$15,07 \pm 0,300$	3,00	18,80	8,20	10,60	19,90	50,25	1,99
Дерево 5	$13,75 \pm 0,294$	2,94	19,60	8,80	10,80	21,41	46,70	2,14
Дерево 6	$14,16 \pm 0,386$	3,86	21,00	6,80	14,20	27,25	36,69	2,73

Окончание табл. 2

Зоны	M±m	СКО	max.	min.	Δlim	Cv, %	T	P, %
Дерево 7	15,44±0,483	4,83	26,40	7,20	19,20	31,27	31,98	3,13
Дерево 8	11,78±0,163	1,63	17,80	8,00	9,80	13,88	72,03	1,39
Дерево 9	12,68±0,260	2,60	18,00	8,60	9,40	20,53	48,71	2,05
Дерево 10	14,64±0,312	3,12	19,80	8,60	11,20	21,30	46,94	2,13
Дерево 11	13,47±0,353	3,53	22,00	8,00	14,00	26,23	38,12	2,62
Дерево 12	16,67±0,202	2,02	21,20	6,70	14,50	12,13	82,44	1,21
Дерево 13	14,32±0,158	1,58	17,30	7,70	9,60	11,02	90,77	1,10
Дерево 14	16,15±0,430	4,30	22,80	6,00	16,80	26,63	37,56	2,66
Total	14,13±0,092	3,44	26,40	6,00	20,40	24,34	153,71	0,65

Сосна обыкновенная

Дерево 1	9,21±0,189	1,89	13,00	4,10	8,90	20,57	48,61	2,06
Дерево 2	7,81±0,144	1,44	10,40	4,00	6,40	18,47	54,13	1,85
Дерево 3	11,20±0,314	3,14	15,00	3,00	12,00	28,05	35,65	2,80
Дерево 4	9,25±0,130	1,30	12,20	6,10	6,10	14,05	71,15	1,41
Дерево 5	8,43±0,207	2,07	12,80	4,40	8,40	24,55	40,73	2,45
Дерево 6	8,34±0,150	1,50	17,00	4,60	12,40	17,97	55,66	1,80
Дерево 7	7,85±0,125	1,25	10,80	5,00	5,80	15,96	62,67	1,60
Дерево 8	9,91±0,197	1,97	13,90	4,30	9,60	19,82	50,44	1,98
Дерево 9	9,16±0,259	2,59	13,80	4,00	9,80	28,27	35,38	2,83
Дерево 10	10,20±0,210	2,10	15,40	6,00	9,40	20,56	48,65	2,06
Дерево 11	10,12±0,251	2,51	15,00	3,60	11,40	24,84	40,26	2,48
Дерево 12	7,01±0,101	1,01	10,00	4,00	6,00	14,34	69,72	1,43
Дерево 13	9,70±0,359	3,59	18,40	4,80	13,60	37,00	27,03	3,70
Дерево 14	7,00±0,079	0,79	9,00	5,00	4,00	11,30	88,46	1,13
Total	8,94±0,064	2,41	18,40	3,00	15,40	26,90	139,11	0,72

Примечание: M – среднее арифметическое, см; m – ошибка выборочного среднего, см; СКО – среднеквадратическое отклонение, см; max. – абсолютный максимум, см; min. – абсолютный минимум, см; Δlim – диапазон лимитов, см; Cv – коэффициент вариации, %; t – опытное значение критерия Стьюдента ($t_{05} = 1,98$; $t_{01} = 2,63$); P – относительная ошибка или точность опыта, %; Total – обобщенное среднее в пределах вида, см

Характер распределения значений учетных деревьев и формат их соотношения практически не отличались от таковых по вышеописанному признаку (табл. 1). В частности, у сосны горной наибольшее ($16,67\pm0,202$ см) и наименьшее ($11,62\pm0,258$ см) средние значения образовали превосходство первого над вторым на 5,05 см или в 1,43 раза. Остальные оценки сравнительно равномерно распределились относительно обобщенного для рассматриваемого массива данных среднего ($14,13\pm0,092$ см). При заметных количественно-размерных отличиях ($\text{max.}=26,40$ см; $\text{min.}=6,00$ см; $\Delta\text{lim}=20,40$ см) соотношения между лимитами логически стабильны – 4,40 (табл. 1). Фон изменчивости в пределах представителей данного вида также сопоставим с аналогичными показателями по предыдущему признаку ($Cv = 24,34\%$) и соответствовал среднему уровню ($Cv = 16\dots25\%$) той же шкалы. Сходным образом сложилась картина распределения значений данного признака в массиве учетных деревьев сосны обыкновенной – от $7,00\pm0,079$ см и $7,01\pm0,101$ см до $11,20\pm0,314$ см. Такое их соотношение создало разницу на 4,20 см или в 1,6 раза. При этом в большинстве своем они в той или иной степени приближались к обобщенному среднему ($8,49\pm0,064$ см). Абсолютные величины рассматриваемого параметра при их синхронно возросшем размере ($\text{max.}=18,40$ см; $\text{min.}=3,00$ см), образовав больший диапазон ($\Delta\text{lim}=15,40$ см), сохранили баланс ($\text{max./min.}=6,13$). Индивидуальная изменчивость особей сосны обыкновенной ($Cv = 26,90\%$) в рассматриваемом примере соответствует повышенному уровню шкалы Мамаева ($Cv = 26\dots35\%$). И в этом случае (табл. 2) большие значения признака наблюдались у сосны горной, она превосходила сосну обыкновенную на 5,19 см или в 1,58 раза.

Надежным критерием сравнительных испытаний двух рассматриваемых видов сосны выступала масса одного парного пучка хвои (табл. 3).

Таблица 3

Масса отдельного пучка хвои у двух видов сосны

The mass of a separate bundle of needles of two pine species

Зоны	$M\pm m$	СКО	max.	min.	Δlim	$Cv, \%$	t	P, %
Сосна горная								
Дерево 1	$0,06\pm0,002$	0,02	0,11	0,01	0,10	38,44	26,02	3,84
Дерево 2	$0,11\pm0,002$	0,02	0,17	0,07	0,10	21,69	46,10	2,17
Дерево 3	$0,04\pm0,001$	0,01	0,08	0,02	0,06	33,14	30,18	3,31
Дерево 4	$0,09\pm0,002$	0,02	0,13	0,05	0,08	21,57	46,36	2,16
Дерево 5	$0,07\pm0,001$	0,01	0,09	0,03	0,06	21,26	47,03	2,13

Окончание табл. 3

Зоны	M±m	СКО	max.	min.	Δlim	Cv, %	t	P, %
Дерево 6	0,09±0,003	0,03	0,15	0,03	0,12	32,14	31,11	3,21
Дерево 7	0,08±0,003	0,03	0,18	0,03	0,15	40,18	24,89	4,02
Дерево 8	0,07±0,001	0,01	0,10	0,04	0,06	19,45	51,42	1,94
Дерево 9	0,06±0,002	0,02	0,10	0,03	0,07	26,93	37,14	2,69
Дерево 10	0,09±0,002	0,02	0,14	0,03	0,11	28,25	35,39	2,83
Дерево 11	0,08±0,003	0,03	0,15	0,03	0,12	37,49	26,67	3,75
Дерево 12	0,10±0,002	0,02	0,13	0,05	0,08	17,57	56,93	1,76
Дерево 13	0,07±0,002	0,02	0,10	0,01	0,09	31,30	31,95	3,13
Дерево 14	0,08±0,004	0,04	0,16	0,01	0,15	46,26	21,62	4,63
Total	0,08±0,001	0,03	0,18	0,01	0,17	37,33	100,22	1,00

Сосна обыкновенная

Дерево 1	0,04±0,001	0,01	0,07	0,01	0,06	34,58	28,92	3,46
Дерево 2	0,03±0,001	0,01	0,05	0,01	0,04	32,21	31,05	3,22
Дерево 3	0,07±0,004	0,04	0,15	0,01	0,14	56,77	17,62	5,68
Дерево 4	0,04±0,001	0,01	0,08	0,02	0,06	36,35	27,51	3,64
Дерево 5	0,04±0,002	0,02	0,08	0,01	0,07	42,65	23,45	4,26
Дерево 6	0,03±0,001	0,01	0,05	0,01	0,04	32,27	30,99	3,23
Дерево 7	0,03±0,001	0,01	0,05	0,02	0,03	26,86	37,23	2,69
Дерево 8	0,04±0,002	0,02	0,07	0,01	0,06	44,07	22,69	4,41
Дерево 9	0,04±0,002	0,02	0,06	0,01	0,05	41,92	23,86	4,19
Дерево 10	0,04±0,002	0,02	0,09	0,02	0,07	36,40	27,47	3,64
Дерево 11	0,05±0,002	0,02	0,09	0,01	0,08	39,62	25,24	3,96
Дерево 12	0,03±0,001	0,01	0,04	0,02	0,02	23,34	42,84	2,33
Дерево 13	0,04±0,002	0,02	0,08	0,01	0,07	47,91	20,87	4,79
Дерево 14	0,03±0,001	0,01	0,05	0,01	0,04	27,42	36,47	2,74
Total	0,04±0,001	0,02	0,15	0,01	0,14	50,82	73,62	1,36

Примечание: M – среднее арифметическое, г; m – ошибка выборочного среднего, г; СКО – среднеквадратическое отклонение, г; max. – абсолютный максимум, г; min. – абсолютный минимум, г; Δlim – диапазон лимитов, г; Cv – коэффициент вариации, %; t – опытное значение критерия Стьюдента ($t_{05} = 1,98$; $t_{01} = 2,63$); P – относительная ошибка или точность опыта, %; Total – обобщенное среднее в пределах вида, г

В этом случае различия между особями сосны горной более заметны: масса отдельного пучка меняется в диапазоне от $0,04\pm0,001$ г до $0,11\pm0,002$ г при их обобщенном среднем значении $0,08\pm0,001$ г. Большее из указанных значений превосходило меньшее на 0,068 г или в 2,59 раза. Лимиты (max. = 0,18 г; min.=0,01 г) различались еще более контрастно – на 0,17 г или в 18 раз. Отмеченный разброс значений образовал изменчивость ($Cv = 37,33\%$), соответствующую высокому уровню по шкале Мамаева ($Cv = 36\dots50\%$). Выступавшая в опыте контролем сосна обыкновенная обладала свойственной именно ей картиной баланса значений данного показателя – от $0,03\pm0,001$ г до $0,07\pm0,004$ г; при обобщенном среднем значении $0,04\pm0,001$ г; большее из них превосходило меньшее на 0,041 г или в 2,57 раза. Абсолютные величины (max.=0,15 г; min.=0,01 г) различались между собой более весомо – на 0,14 г или в 15 раз. В сложившейся ситуации оцениваемая коэффициентом вариации изменчивость ($Cv = 50,82\%$) соответствовала её очень высокому уровню ($Cv >50\%$). Вполне логично, что по данному параметру сохранилось превосходство сосны горной над сосной обыкновенной (в данном конкретном случае на 5,19 г или в 1,58 раза).

Остальные признаки имели характерные для каждого из них описательные статистики. Весь полученный на данном этапе вычислений материал статистически надежен, что можно признать исходя из оценок критерия Стьюдента, намного превысивших свои табличные величины как на 5-процентном, так и на 1-процентном уровне значимости, а также судя по размерам относительной ошибки, которая в подавляющем большинстве случаев не преодолела допустимый 5-процентный рубеж. Поскольку описываемые различия между сравниваемыми особями проявились на выравненном фоне экологических условий, то причиной их возникновения с большой долей вероятности можно признать специфику генотипов самих растений семенного происхождения, сформировавшуюся как на межвидовом уровне, так и в пределах каждого вида. Это нашло подтверждение в результатах однофакторного дисперсионного анализа, проведенного по всему комплексу тестируемых признаков каждого вида (табл. 4).

По всем анализируемым признакам 1-летней хвои сосны горной опытные значения критерия Фишера ($F_{оп}$) во много раз превышали критические значения, установленные для 5-процентного и 1-процентного уровней значимости. Такой исход дисперсионного анализа позволил продолжить его в части нахождения доли влияния организованных факторов. В рассматриваемом случае ими выступали различия между собственно учетными деревьями

Таблица 4

Существенность различий в морфометрических признаках хвои**The significance of differences in the quantitative parameters of needles**

Признаки	F _{оп}	Доля влияния фактора ($h^2 \pm s_h^2$)				Критерии различий		
		по Плохинскому		по Сnedекору				
		h^2	$\pm s_h^2$	h^2	$\pm s_h^2$	HCP ₀₅	D ₀₅	
Сосна горная								
Признак 1	27,79	0,2068	0,0074	0,2113	0,0074	0,427	0,723	
Признак 2	27,79	0,2068	0,0074	0,2113	0,0074	0,853	1,447	
Признак 3	53,38	0,3336	0,0063	0,3438	0,0062	0,007	0,011	
Признак 4	123,25	0,5362	0,0044	0,5500	0,0042	0,018	0,031	
Признак 5	54,92	0,3400	0,0062	0,3503	0,0061	0,339	0,575	
Сосна обыкновенная								
Признак 1	35,98	0,2523	0,0070	0,2592	0,0069	0,290	0,491	
Признак 2	35,98	0,2523	0,0070	0,2592	0,0069	0,579	0,982	
Признак 3	38,56	0,2656	0,0069	0,2730	0,0068	0,005	0,008	
Признак 4	0,94	0,0088	0,0093	—	—	0,015	0,026	
Признак 5	22,14	0,1719	0,0078	0,1745	0,0077	0,317	0,537	

Примечание: F_{оп} – опытное значение критерия Фишера; F_{05/01} – табличное значение на 5-процентном и 1-процентном уровне значимости ($F_{05}/F_{01} = 1,75/2,12$); h^2 – доля влияния организованного фактора; s_h^2 – ошибка доли влияния организованного фактора; F_h^2 – критерий достоверности доли влияния организованного фактора; HCP₀₅ – наименьшая существенная разность на 5-процентном уровне значимости; D₀₅ – критерий Тьюки на 5-процентном уровне значимости. Число первичных единиц выборки по одному признаку – 1400; общая ёмкость базы данных – 14000 единиц

Признаки хвои: признак 1 – средняя длина хвои в парном пучке на одном брахибласте, см; признак 2 – суммарная длина хвои в парном пучке на одном брахибласте, см; 3 – масса хвои в парном пучке на одном брахибласте, г; признак 4 – коэффициент асимметрии длины хвоинок в их парном пучке на одном брахибласте; признак 5 – распределенная масса хвои как отношение массы её парного пучка к суммарной длине хвоинок в нем, г/см.

семенного происхождения. В расчетах по алгоритму Плохинского указанный показатель принимал значения от $20,68 \pm 0,74\%$ (признаки 1, 2) до $53,62 \pm 0,44\%$ (признак 4) при их весьма высокой достоверности: $F_h = 22,79 \dots 123,25$ при $F_{05}/F_{01} = 1,75/2,12$. В отношении сосны обыкновенной

получен сходный по смыслу результат за исключением оценок по коэффициенту асимметрии длины хвои в отдельном пучке на одном брахибласте. Указанный признак для всех учетных деревьев оказался практически одинаковым – максимально приближенным к единице, что означало предельно выравненное развитие хвоинок в их отдельном пучке, что явилось причиной отсутствия существенных различий ($F_{оп} < F_{05}/F_{01}$). По остальным параметрам хвои различия статистически значимы, что позволило определить для них эффекты влияния организованных факторов. Привлечение для этих целей алгоритма Плохинского показало, что указанные оценки достигли величин от $17,19 \pm 0,78\%$ (признак 5) до $26,56 \pm 0,69\%$ (признак 3) при их достаточной достоверности: $F_h = 22,14 \dots 38,56$ при $F_{05}/F_{01} = 1,75/2,12$. Проведение тех же расчетов по алгоритму Сnedекора дало вполне сопоставимый результат. Величины наименьшей существенной разности (HCP_{05}) и критерия Тьюки (D_{05}) позволили установить, между какими именно объектами рассматриваемых совокупностей (табл. 1–3) различия относятся к категории существенных.

Подтверждение факта наследственной обусловленности изменчивости рассматриваемых параметров хвои (табл. 4) при достоверности их описательных статистик (табл. 1–3) дало основания для сопоставления фенотипических проявлений признаков у сосны горной и сосны обыкновенной и выявления масштабов межвидовых различий в ходе проведения двухфакторного дисперсионного анализа (табл. 5).

Таблица 5

**Результаты двухфакторного дисперсионного анализа параметров хвои
сосны горной и сосны обыкновенной**

**The results of a two-way ANOVA of the mountain pine
and Scots pine needle parameters**

Фактор влияния, источник дисперсии	Критерий Фишера $F_{оп}$	Доля влияния фактора ($h^2 \pm s_h^2$)			
		по Плохинскому		по Сnedекору	
		h^2	$\pm s_h^2$	h^2	$\pm s_h^2$
Средняя длина хвои в парном пучке на одном брахибласте, см (признак 1)					
Видоспецифичность (A)	2724,76	0,4335	0,0002	0,5560	0,0002
Повторности (B)	7,62	0,0158	0,0046	0,0095	0,0046
Взаимодействие (AB)	53,06	0,1097	0,0042	0,1488	0,0040
Остаток (Z)	–	0,4410	0,5590	0,2858	0,7142

Окончание табл. 5

Фактор влияния, источник дисперсии	Критерий Фишера $F_{оп}$	Доля влияния фактора ($h^2 \pm s_h^2$)			
		по Плохинскому		по Снедекору	
		h^2	$\pm s_h^2$	h^2	$\pm s_h^2$
Суммарная длина хвои в парном пучке на одном брахибласте, см (признак 2)					
Видоспецифичность (A)	2724,76	0,4335	0,0002	0,5560	0,0002
Повторности (B)	7,62	0,0158	0,0046	0,0095	0,0046
Взаимодействие (AB)	53,06	0,1097	0,0042	0,1488	0,0040
Остаток (Z)	–	0,4410	0,5590	0,2858	0,7142
Масса хвои в парном пучке на одном брахибласте, г (признак 3)					
Видоспецифичность (A)	2570,83	0,3893	0,0002	0,4969	0,0002
Повторности (B)	19,18	0,0378	0,0045	0,0246	0,0046
Взаимодействие (AB)	77,76	0,1531	0,0040	0,2078	0,0037
Остаток (Z)	–	0,4198	0,5802	0,2707	0,7293
Коэффициент асимметрии длины хвоинок в их парном пучке (признак 4)					
Видоспецифичность (A)	65,59	0,0138	0,0004	0,0216	0,0004
Повторности (B)	71,59	0,1965	0,0038	0,1654	0,0039
Взаимодействие (AB)	74,52	0,2045	0,0037	0,3445	0,0031
Остаток (Z)	–	0,5852	0,4148	0,4685	0,5315
Распределенная масса хвои как отношение её массы к суммарной длине, г/см (признак 5)					
Видоспецифичность (A)	849,76	0,1826	0,0003	0,2642	0,0003
Повторности (B)	17,98	0,0502	0,0045	0,0370	0,0045
Взаимодействие (AB)	61,34	0,1714	0,0039	0,2630	0,0035
Остаток (Z)	–	0,5958	0,4042	0,4358	0,5642

Примечание: факторы влияния: A – организованный фактор, действие которого обусловлено межвидовыми различиями представителей рода Сосна; B – организованный фактор, действие которого связано с различиями между повторностями опыта (учетные деревья); AB – эффект взаимодействия организованных факторов A и B; Z – неорганизованный фактор или остаточная дисперсия, соответствующая внутригрупповой (случайной) изменчивости, индуцируемой пестротой фона не учитываемых в опыте факторов среды

Обозначения: $F_{оп}$ – опытное значение критерия Фишера; $F_{05/01}$ – табличное значение критерия Фишера на 5-процентном уровне значимости ($F_{05/01}A = 3,84/6,64$; $F_{05/01}B = 1,72/2,12$; $F_{05/01}AB = 1,72/2,12$); h^2 – доля влияния организованного фактора; s_h^2 – ошибка доли влияния организованного фактора. Число первичных единиц выборки каждого признака – 2800; общая емкость базы данных – 14000 единиц

Существенность различий по фактору **A**, что в нашем случае отражает влияние видоспецифичности, получила подтверждение по всем анализируемым признакам: опытные критерии Фишера ($F_{опA} = 65,59\dots2724,76$) уверенно преодолели свой предельный порог ($F_{05/01A} = 3,84/6,64$). Это создало предпосылки для выполнения второго этапа анализа с вычислением значений доли факториальной дисперсии. В расчетах по алгоритму Плохинского оценки колебались в пределах от $1,38\pm0,04$ (признак 4) до $43,35\pm0,02$ (признаки 1 и 2) при их высокой достоверности. Фактор **B**, действие которого связано с внутривидовыми особенностями учетных деревьев, также вызывал возникновение различий, соответствующих уровню существенных, по всем рассматриваемым параметрам. Соответствующие ему расчетные критерии Фишера ($F_{опB} = 7,62\dots71,59$) столь же успешно превысили предельно допустимый минимум ($F_{05/01B} = 1,72/2,12$). Однако доля влияния этого фактора в большинстве случаев была ниже – от $1,58\pm0,46$ (признаки 1 и 2) до $19,65\pm0,38$ (признак 4). Эффект взаимодействия организованных факторов (фактор **AB**) оказался достоверным и достаточно результативным. Он, как и в вышеописанных случаях, генерировал существенные различия по каждой из тестируемых характеристик листового аппарата исследованных сосен: $F_{опAB} = 53,06\dots77,76$ при $F_{05/01AB} = 1,72/2,12$. При этом его доля в общей фенотипической дисперсии была выше, чем по фактору **B** – от $10,97\pm0,42$ (признаки 1 и 2) до $20,45\pm0,37$ (признак 4), хотя и уступала аналогичным оценкам по фактору **A**. Остаточная дисперсия (фактор **Z**), возникновение которой традиционно связывают с пестротой фона не учитываемых в опыте факторов среды, как правило, доминировала при вполне ощутимых размерах (от 41,98% до 59,58%).

Выводы. 1. Сосна горная при её переносе в Нижегородскую область развивает хвою, сопоставимую по своим количественным характеристикам с аналогичными параметрами типичных представителей вида, произрастающих в границах естественного ареала, что позволяет признать определенное соответствие её биологии лесорастительным условиям, сложившимся в зоне интродукции;

2. Внутривидовая фенотипическая изменчивость рассматриваемых признаков сосны горной и сосны обыкновенной, в значительной степени обусловленная спецификой генотипов принадлежащих им особей, указывает на возможность выделения из их состава растений с наиболее ценными в декоративном и общебиологическом отношении характеристиками;

3. Отсутствие признаков постинтродукционной депрессии и следов поражения биотическими и абиотическими факторами особей сосны гор-

ной в местах её расселения позволяет признать адекватность экологических реакций зоне интродукции и достаточную адаптированность вида, свидетельствует о широких возможностях её введения в состав искусственных насаждений различного целевого назначения, что, в свою очередь, будет способствовать расширению регионального ассортимента привлекаемых для этих целей древесных и кустарниковых пород.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Аверкиев Д.С. История развития растительного покрова Горьковской области и ее ботанико-географическое деление // Ученые записки Горьковского университета. 1954. Вып. XXXV. С. 119–136.

Алехин В.В. Растительность СССР в основных зонах. 2-е изд. М.: Советская наука, 1951. 512 с.

Бабаев Р.Н., Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П. Лигнификация ксилемы разных видов березы при интродукции в условиях Нижегородской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2021. Вып. 235. С. 40–56. DOI: 10.21266/2079-4304.2021.235.40-56

Базилевская Н.А. Теории и методы интродукции растений. М.: Московский государственный университет, 1964. 131 с.

Бессчетнов В.П., Бессчетнова Н.Н., Есичев А.О. Оценка физиологического состояния представителей рода лиственница (*Larix Mill.*) в условиях Нижегородской области // ИВУЗ. Лесной журнал. 2018. № 1. С. 9–17. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.1.9.

Бессчетнова М.В. Адаптационные процессы с позиции интродукции растений // Бюллетень Главного ботанического сада. 1983. Вып. 128. С. 1–6.

Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П. Изменчивость морфометрических признаков хвои на клоновой плантации плюсовых деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris L.*) // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2017. Т. 21, № 2. С. 198–206. DOI 10.18699/VJ17.237

Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Кулькова А.В., Мищукова И.В. Содержание крахмала в тканях побегов разных видов ели (*Picea A. Dietr.*) в условиях интродукции // ИВУЗ. Лесной журнал. 2017. № 4. С. 57–68. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.4.57

Васфилов С.П. Изменчивость сухой массы и содержание воды в хвое *Pinus sylvestris* (Pinaceae) // Ботанический журнал. 2005. Т. 90, № 8. С. 1235–1247.

Воробьев Р.А., Тебенькова Д.Н. Содержание основных пигментов в однолетней и двухлетней хвое интродуцентов рода Ель (*Picea L.*) в условиях подзоны южной тайги (на примере Нижегородской области) // Лесоведение. 2013а. № 3. С. 8–15.

Воробьев Р.А., Тебенькова Д.Н. Развитие вегетативных и генеративных органов представителей рода Ель (*Picea L.*), интродуцированных в Нижегородской области // Лесной вестник / Forestry Bulletin. 2013б. № 7. С. 97–105.

Головкин Б.Н. История интродукции растений в ботанических садах. М.: Московский государственный университет, 1981. 123 с.

Есичев А.О., Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Бабич А.Н., Кентбаев Е.Ж., Кентбаева Б.А. Содержание и баланс запасных веществ в побегах лиственницы сибирской в условиях реинтродукции в Нижегородскую область // Лесной вестник / Forestry Bulletin. 2022. Т. 26, № 1. С. 17–27. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-1-17-27

Котов М.М. Отбор сеянцев сосны для лесосеменных плантаций // Лесное хозяйство. 1995. № 1. С. 44–46.

Кулькова А.В., Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П. Многопараметрический анализ в оценке видоспецифичности представителей рода ель (*Picea*) // ИВУЗ. Лесной журнал. 2018. № 6. С. 23–38. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.6.23

Кулькова А.В., Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П. Применение стимулирующей обработки в укоренении черенков ели Коника // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020. Вып. 232. С. 79–91. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.232.79-91.

Культиасов М.В. Эколого-исторический метод в интродукции растений // Бюллетень Главного ботанического сада. 1953. Вып. 15. С. 24–40.

Лапин П.И., Калуцкий К.К., Калуцкая О.Н. Интродукция лесных пород. М.: Лесная промышленность, 1979. 224 с.

Мамаев С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений (на примере семейства Pinaceae на Урале). М.: Наука, 1972. 283 с.

Моллаева М.З., Темботова Ф.А. Морфологическая изменчивость ассимиляционного аппарата *Pinus sylvestris* L. в пределах Тебердинского национального парка // ИВУЗ. Лесной журнал. 2024. № 1. С. 91–100. DOI: 10.37482/0536-1036-2024-1-91-100

Орлова Л.В. О диагностических признаках вегетативных органов в роде *Pinus* (Pinaceae) // Ботанический журнал. 2001. Т. 86, № 9. С. 33–44.

Правдин Л.Ф. Сосна обыкновенная. Изменчивость, внутривидовая система и селекция. М.: Наука, 1964. 190 с.

Раевский Б.В. Особенности вегетативного роста клонов сосны обыкновенной в Карелии // ИВУЗ. Лесной журнал. 2013. № 4. С. 7–15.

Старова Н.В., Янбаев Ю.А., Юмадилов Н.Х., Адлер Э.Н., Духарев В.А., Шигапов З.Х. Генетическая изменчивость сосны обыкновенной в возрастных группах // Генетика. 1990. Т. 26, № 3. С. 498–505.

Тарханов С.Н., Пинаевская Е.А., Аганина Ю.Е., Паход А.С. Изменчивость биохимических признаков *Pinus sylvestris* (Pinaceae) при адаптации форм в условиях избыточного увлажнения // ИВУЗ. Лесной журнал. 2023. № 4. С. 58–75. DOI: 37482/0536-1036-2023-4-58-75

Цельникер Ю.Н. Скорость потери воды изолированными листьями древесных пород и устойчивость их к обезвоживанию // Труды института леса АН СССР. 1955. Т. 27. С. 6–28.

Шавнин С.А., Юсупов И.А., Монтиле А.А., Голиков Д.Ю., Марина Н.В. Сезонная динамика содержания компонентов антиокислительной системы хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в зоне локального теплового воздействия // ИВУЗ. Лесной журнал. 2023. № 2. С. 38–57. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-2-38-57

Шлыков Г.Н. Интродукция и акклиматизация растений. М.: Сельхозиздат, 1963. 488 с.

Alade A.A., Hoette C., Militz H. Coatings Adhesion on Chemically Modified Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Woods // Forests. 2024. Vol. 15, iss. 3. Art. no. 526. DOI: 10.3390/f15030526

Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Babich N.A., Bryntsev V.A. Differentiation of the plus trees of Scots pine on the physiological status of xylem // IVUZ. Lesnoy Zhurnal. 2023. No. 4. P. 9–25.

Bobowicz M.A., Krzakowa M. Morphological differences between *Pinus mugo* Turra populations from the Tatra Mts. revealed by cone traits // Acta Societatis Botanicorum Poloniae. 1986. Vol. 55, no. 2. P. 263–273. DOI: 10.5586/asbp.1986.027

Boratyńska K., Muchewicz E., Drojma M. *Pinus mugo* Turra geographic differentiation based on needle characters // Dendrobiology. 2004. Vol. 51. P. 9–17.

Boratyńska K., Boratyński A. Taxonomic differences among closely related pines *Pinus sylvestris*, *P. mugo*, *P. uncinata*, *P. rotundata* and *P. uliginosa* as revealed in needle sclerenchyma cells // Flora – Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants. 2007. Vol. 202, iss. 7. P. 555–569. DOI: 10.1016/j.flora.2006.11.004

Boratyńska K., Jasińska A.K., Boratyński A. Taxonomic and geographic differentiation of *Pinus mugo* complex on the needle characteristics // Systematics and Biodiversity. 2015. Vol. 13, iss. 6. P. 1–15. DOI: 10.1080/14772000.2015.1058300

Bravo-Fernández J.A., García-Viñas J.I., Serrada R. Soil Compaction and Productivity Evolution in a Harvested and Grazed Mediterranean Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Forest // Forests. 2024. Vol. 15, iss. 3. Art. no. 451. DOI: 10.3390/f15030526

Celiński K., Chudzińska E., Gmur A., Piosik Ł., Wojnicka-Półtorak A. Cytological characterization of three closely related pines – *Pinus mugo*, *P. uliginosa* and *P. × rhaetica* from the *Pinus mugo* complex (Pinaceae) // Biologia. 2019. Vol. 74, iss. 7. P. 751–756. DOI: 10.2478/s11756-019-00201-6

Charra-Vaskou K., Mayr S. The hydraulic conductivity of the xylem in conifer needles (*Picea abies* and *Pinus mugo*) // Journal of Experimental Botany. 2011. Vol. 62, no. 12. P. 4383–4390. DOI: 10.1093/jxb/err157

Christensen K.I. Taxonomic revision of the *Pinus mugo* complex and *P. × rhaetica* (*P. mugo* × *sylvestris*) (Pinaceae) // Nordic Journal of Botany. 1987. Vol. 7, no. 4. P. 383–408. DOI: 10.1111/j.1756-1051.1987.tb00958.x

Dai L., Palombo C., Van Gils H., Rossiter D.G., Tognetti R., Luo G. *Pinus mugo* Krummholz Dynamics During Concomitant Change in Pastoralism and Climate in the Central Apennines // Mountain Research and Development. 2017. Vol. 37, no. 1. P. 75–86. DOI:10.1659/MRD-JOURNAL-D-14-00104.1

Feklistov P.A., Sobolev A.N., Babich N.A., Sungurova N.R., Melekhov V.I., Bologov I.N. Edge Effect in Pine Stands in the Northern Taiga // IVUZ. Lesnoy Zhurnal. 2023. No. 2. P. 26–37. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-2-26-37

Gorelov A.N., Besschetnova N.N., Besschetnov V.P. Comparative assessment of the taxation indicators of plus trees of Scots pine on a forest seed plantation // Conifers of the boreal area. 2023. Vol. 40, no. 7 (special). P. 577–584.

Hamerník J., Musil I. The *Pinus mugo* complex – its structuring and general overview of the used nomenclature // Journal of Forest Science. 2007. Vol. 53, iss. 6. P. 253–266. DOI: 10.17221/2020-JFS

Klobučník M., Galgóci M., Bolecek P., Gömöry D., Kormuták A. Crossability of Putative Hybrids of *Pinus sylvestris* and *Pinus mugo* with Their Parents // American Journal of Plant Sciences. 2021. Vol. 12, iss. 8. P. 1246–1258. DOI: 10.4236/ajps.2021.128087

Klobučník M., Galgóci M., Gömöry D., Kormuták A. Molecular Insight into Genetic Structure and Diversity of Putative Hybrid Swarms of *Pinus sylvestris* × *P. mugo* in Slovakia // Forests. 2022. Vol. 13, iss. 2. Art. no. 205. DOI: 10.3390/f13020205

Kormuták A., Brana M., Galgóci M., Manka P., Sukenikova D., Libantova J., Gömöry D. Pollen fertility and seed viability of putative hybrid swarms of *Pinus sylvestris* and *Pinus mugo* in Slovakia // Silvae Genetica. 2019. Vol. 68, iss. 1. P. 14–21. DOI:10.2478/sg-2019-0003

Korznikov K.A. Naturalization of *Pinus mugo* Turra (Pinaceae) in southeast Sakhalin, Russia // Botanica Pacifica. A journal of plant science and conservation. 2016. Vol. 5, no. 1. P. 95–98. DOI: 10.17581/bp.2016.0510

Kulkova A.V., Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Kentbaev Y.Zh., Kentbaeva B.A. Growth of Schrenk's Spruce (*Picea schrenkiana*) Seedlings Related to the Pre-Sowing Stimulating Seed Treatment // IVUZ. Lesnoy Zhurnal. 2022. No. 4. P. 39–51. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-4-39-51

Mátyás C., Balázsová P., Nagy L. Climatic Stress Test of Scots Pine Provenances in Northeastern Europe Reveals High Phenotypic Plasticity and Quasi-Linear Response to Warming // Forests. 2023. Vol. 14, iss. 10. Art. no. 1950. DOI: 10.3390/f14101950

Nardi E., Minghetti P. Proposal to Conserve the Name *Pinus mugo* (Pinaceae) with a Conserved Type // Taxon. 1999. Vol. 48, no. 3. P. 571–572. DOI: 10.2307/1224568

Peguero-Pina J.J., Morales F., Gil-Pelegrín E. Frost damage in *Pinus sylvestris* L. stems assessed by chlorophyll fluorescence in cortical bark chlorenchyma // Annals of Forest Science. 2008. Vol. 65, no. 8. Art. no. 813. DOI: 10.1051/forest:2008068

Popovic M. Growth of the Mountain Pine (*Pinus mugo*, Turra.) in Yugoslavia // Journal of Biogeography. 1976. Vol. 3, no. 3. P. 261–267. DOI: 10.2307/3038016

Wachowiak W., Bączkiewicz A., Celiński K., Prus-Głowacki W. Species-specific chloroplast DNA polymorphism in the trnV-rbcL region in *Pinus sylvestris* and *P. mugo* // Dendrobiology. 2004. Vol. 51. P. 67–72.

Wachowiak W., Żukowska W.B., Wójkiewicz B., Cavers S., Litkowiec M. Hybridization in contact zone between temperate European pine species // Tree Genetics & Genomes. 2016. Vol. 12. Art. no. 48. DOI:10.1007/s11295-016-1007-x

Zeidler M., Duchoslav M., Banaš M., Lešková M. Impacts of introduced dwarf pine (*Pinus mugo*) on the diversity and composition of alpine vegetation // Community Ecology. 2012. Vol. 13, no. 2. P. 213–220. DOI:10.1556/ComEc.13.2012.2.11

References

Alade A.A., Hoette C., Miltz H. Coatings Adhesion on Chemically Modified Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Woods. *Forests*, 2024, vol. 15, iss. 3, art. no. 526. DOI: 10.3390/f15030526

Alekhin V.V. The vegetation of the USSR in the main zones. Second edit. Moscow: Soviet science Publ., 1951. 512 p. (In Russ.)

Averkiev D.S. The history of the development of the vegetation cover of the Gorky region and its botanical and geographical division. *Scientific notes of the Gorky University*, 1954, iss. XXXV, pp. 119–136. (In Russ.)

Babaev R.N., Besschetnova N.N., Besschetnov V.P. Lignification of xylem of different birch species during introduction in the Nizhny Novgorod region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2021, iss. 235, pp. 40–56. DOI: 10.21266/2079-4304.2021.235.40-56. (In Russ.)

Bazilevskaya N.A. Theories and methods of plant introduction. Moscow: Moscow State University Publ., 1964. 131 p. (In Russ.)

Besschetnov V.P., Besschetnova N.N., Yesichev A.O. Assessment of the physiological state of representatives of the genus larch (*Larix* Mill.) in the conditions of the Nizhny Novgorod region. *IVUZ. Lesnoy Zhurnal*, 2018, no. 1, pp. 9–17. DOI: 10.17238/issn 0536-1036.2018.1.9. (In Russ.)

Besschetnova M.V. Adaptation processes from the standpoint of plant introduction. *Byulleten' Glavnogo botanicheskogo sada*, 1983, iss. 128, pp. 1–6. (In Russ.)

Besschetnova N.N., Besschetnov V.P. Variability of morphometrical characteristics of needles at a clonal plantation of plus trees of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Vavilovskij zhurnal genetiki i selekcii*, 2017, vol. 21, iss. 2, pp. 198–206. DOI 10.18699/VJ17.237. (In Russ.)

Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Kulkova A.V., Mishukova I.V. Starch content in the tissues of shoots of different types of spruce (*Picea* A. Dietr.) under the introduction conditions. *IVUZ. Lesnoy Zhurnal*, 2017, no. 4, pp. 57–68. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.4.57. (In Russ.)

Besschetnova N.N., Besschetnov V.P. Babich N.A., Bryntsev V.A. Differentiation of the plus trees of Scots pine on the physiological status of xylem. *IVUZ. Lesnoy Zhurnal*, 2023, no. 4, pp. 9–25.

- Bobowicz M.A., Krzakowa M. Morphological differences between *Pinus mugo* Turra populations from the Tatra Mts. revealed by cone traits. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 1986, vol. 55, no. 2, pp. 263–273. DOI: 10.5586/asbp.1986.027
- Boratyńska K., Boratyński A. Taxonomic differences among closely related pines *Pinus sylvestris*, *P. mugo*, *P. uncinata*, *P. rotundata* and *P. uliginosa* as revealed in needle sclerenchyma cells. *Flora – Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 2007, vol. 202, iss. 7, pp. 555–569. DOI: 10.1016/j.flora.2006.11.004
- Boratyńska K., Jasińska A.K., Boratyński A. Taxonomic and geographic differentiation of *Pinus mugo* complex on the needle characteristics. *Systematics and Biodiversity*, 2015, vol. 13, iss. 6, pp. 1–15. DOI: 10.1080/14772000.2015.1058300
- Boratyńska K., Muchewicz E., Drojma M. *Pinus mugo* Turra geographic differentiation based on needle characters. *Dendrobiology*, 2004, vol. 51, pp. 9–17.
- Bravo-Fernández J.A., García-Viñas J.I., Serrada R. Soil Compaction and Productivity Evolution in a Harvested and Grazed Mediterranean Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Forest. *Forests*, 2024, vol. 15, iss. 3, art. no. 451. DOI: 10.3390/f15030526
- Celiński K., Chudzińska E., Gmur A., Piosik Ł., Wojnicka-Póltorak A. Cytological characterization of three closely related pines – *Pinus mugo*, *P. uliginosa* and *P. × rhaetica* from the *Pinus mugo* complex (Pinaceae). *Biologia*, 2019, vol. 74, iss. 7, pp. 751–756. DOI: 10.2478/s11756-019-00201-6
- Charra-Vaskou K., Mayr S. The hydraulic conductivity of the xylem in conifer needles (*Picea abies* and *Pinus mugo*). *Journal of Experimental Botany*, 2011, vol. 62, no. 12, pp. 4383–4390. DOI: 10.1093/jxb/err157
- Christensen K.I. Taxonomic revision of the *Pinus mugo* complex and *P. × rhaetica* (*P. mugo* × *sylvestris*) (Pinaceae). *Nordic Journal of Botany*, 1987, vol. 7, no. 4, pp. 383–408. DOI: 10.1111/j.1756-1051.1987.tb00958.x
- Dai L., Palombo C., Van Gils H., Rossiter D.G., Tognetti R., Luo G. *Pinus mugo* Krummholtz Dynamics During Concomitant Change in Pastoralism and Climate in the Central Apennines. *Mountain Research and Development*, 2017, vol. 37, no. 1, pp. 75–86. DOI: 10.1659/MRD-JOURNAL-D-14-00104.1
- Feklistov P.A., Sobolev A.N., Babich N.A., Sungurova N.R., Melekhov V.I., Bolotov I.N. Edge Effect in Pine Stands in the Northern Taiga. *IVUZ. Lesnoy Zhurnal*, 2023, no. 2, pp. 26–37. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-2-26-37
- Golovkin B.N. The history of plant introduction in botanical gardens. Moscow: Moscow State University Publ., 1981. 123 p. (In Russ.)
- Gorelov A.N., Besschetnova N.N., Besschetnov V.P. Comparative assessment of the taxation indicators of plus trees of Scots pine on a forest seed plantation. *Coniferous boreal zones*, 2023, vol. 40, no. 7 (special), pp. 577–584.
- Hamerník J., Musil I. The *Pinus mugo* complex – its structuring and general overview of the used nomenclature. *Journal of Forest Science*, 2007, vol. 53, iss. 6, pp. 253–266. DOI: 10.17221/2020-JFS

Klobučník M., Galgóci M., Bolecek P., Gömöry D., Kormuták A. Crossability of Putative Hybrids of *Pinus sylvestris* and *Pinus mugo* with Their Parents. *American Journal of Plant Sciences*, 2021, vol. 12, iss. 8, pp. 1246–1258. DOI: 10.4236/ajps.2021.128087

Klobučník M., Galgóci M., Gömöry D., Kormuták A. Molecular Insight into Genetic Structure and Diversity of Putative Hybrid Swarms of *Pinus sylvestris* × *P. mugo* in Slovakia. *Forests*, 2022, vol. 13, iss. 2, art. no. 205. DOI: 10.3390/f13020205

Kormuták A., Brana M., Galgóci M., Manka P., Sukenikova D., Libantova J., Gömöry D. Pollen fertility and seed viability of putative hybrid swarms of *Pinus sylvestris* and *Pinus mugo* in Slovakia. *Silvae Genetica*, 2019, vol. 68, iss. 1, pp. 14 – 21. DOI: 10.2478/sg-2019-0003

Korznikov K.A. Naturalization of *Pinus mugo* Turra (Pinaceae) in southeast Sakhalin, Russia. *Botanica Pacifica. A journal of plant science and conservation*, 2016, vol. 5, no. 1, pp. 95–98. DOI: 10.17581/bp.2016.0510

Kotov M.M. Selection of pine seedlings for forest seed plantations. *Lesnoe hozyajstvo*, 1995, no. 1, pp. 44–46. (In Russ.)

Kulkova A.V., Besschetnova N.N., Besschetnov V.P. Multiparametric analysis in the assessment of species specificity of representatives of the genus spruce (*Picea*) // IVUZ. *Lesnoy Zhurnal*, 2018, no. 6, pp. 23–38. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.6.23. (In Russ.)

Kulkova A.V., Besschetnova N.N., Besschetnov V.P. Application of stimulating treatment in rooting of conic spruce cuttings. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2020, iss. 232, pp. 79–91. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.232.79-91. (In Russ.)

Kulkova A.V., Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Kentbaev Y.Zh., Kentbaeva B.A. Growth of Schrenk's Spruce (*Picea schrenkiana*) Seedlings Related to the Pre-Sowing Stimulating Seed Treatment. IVUZ. *Lesnoy Zhurnal*, 2022, no. 4, pp. 39–51. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-4-39-51

Kultiasov M.V. Ecological and historical method in plant introduction. *Byulleten' Glavnogo botanicheskogo sada*, 1953, iss. 15, pp. 24–40. (In Russ.)

Lapin P.I., Kalutskiy K.K., Kalutskaya O.N. Introduction of forest species. Moscow: Forest Industry, 1979. 224 p. (In Russ.)

Mamaev S.A. Forms of intraspecific variability of woody plants (on the example of the Pinaceae family in the Urals). Moscow: Science, 1972. 283 p. (In Russ.)

Mátyás C., Balázs P., Nagy L. Climatic Stress Test of Scots Pine Provenances in Northeastern Europe Reveals High Phenotypic Plasticity and Quasi-Linear Response to Warming. *Forests*, 2023, vol. 14, iss. 10, art. no. 1950. DOI: 10.3390/f14101950

Mollaeva M.Z., Tembotova F.A. Morphological variability of the assimilation apparatus of *Pinus sylvestris* L. within the Teberdinsky National Park. IVUZ. *Lesnoy Zhurnal*, 2024, no. 1, pp. 91–100. DOI: 10.37482/0536-1036-2024-1-91-100. (In Russ.)

- Nardi E., Minghetti P. Proposal to Conserve the Name *Pinus mugo* (Pinaceae) with a Conserved Type. *Taxon*, 1999, vol. 48, no. 3, pp. 571–572. DOI: 10.2307/1224568
- Orlova L.V. On the diagnostic features of the vegetative organs in the genus *Pinus* (Pinaceae). *Botanicheskij zhurnal*, 2001, vol. 86, iss. 9, pp. 33–44. (In Russ.)
- Peguero-Pina J.J., Morales F., Gil-Pelegrín E. Frost damage in *Pinus sylvestris* L. stems assessed by chlorophyll fluorescence in cortical bark chlorenchyma. *Annals of Forest Science*, 2008, vol. 65, no. 8, art. no. 813. DOI: 10.1051/forest:2008068
- Popovic M. Growth of the Mountain Pine (*Pinus mugo*, Turra.) in Yugoslavia. *Journal of Biogeography*, 1976, vol. 3, no. 3, pp. 261–267. DOI: 10.2307/3038016
- Pravdin L.F. The Scots pine. Variability, intraspecific taxonomy and selection. Moscow: Science, 1964. 190 p. (In Russ.)
- Rayevsky B.V. Features of vegetative growth of clones of scots pine in Karelia. IVUZ. *Lesnoy Zhurnal*, 2013, no. 4, pp. 7–15. (In Russ.)
- Shavnin S.A., Yusupov I.A., Montile A.A., Golikov D.Yu., Marina N.V. Seasonal dynamics of the content of components of the antioxidant system of pine needles (*Pinus sylvestris* L.) in the zone of local thermal exposure. IVUZ. *Lesnoy Zhurnal*, 2023, no. 2, pp. 38–57. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-2-38-57. (In Russ.)
- Shlykov G.N. Introduction and acclimatization of plants. Moscow: Agricultural Publishing House, 1963. 488 p. (In Russ.)
- Starova N.V., Yanbaev Yu.A., Yumadilov N.H., Adler E.N., Dukharev V.A., Shigapov Z.H. Genetic variability of Scots pine in age groups. *Genetika*, 1990, vol. 26, no. 3, pp. 498–505. (In Russ.)
- Tarkhanov S.N., Pinayevskaya E.A., Aganina Yu.E., Plakhov A.S. Variability of biochemical signs of *Pinus sylvestris* (Pinaceae) during adaptation of forms under conditions of excessive moisture. IVUZ. *Lesnoy Zhurnal*, 2023, no. 4, pp. 58–75. DOI: 37482/0536-1036-2023-4-58-75. (In Russ.)
- Vasfilov S.P. Variability of dry mass and water content in conifers of *Pinus sylvestris* (Pinaceae). *Botanicheskij zhurnal*, 2005, vol. 90, no. 8, pp. 1235–1247. (In Russ.)
- Vorobyov P.A., Tebenkova D.N. The content of basic pigments in annual and biennial needles of introduced species of Spruce (*Picea* L.) in the conditions of the southern taiga subzone (on the example of the Nizhny Novgorod region). *Lesovedenie*, 2013a, no. 3, pp. 8–15. (In Russ.)
- Vorobyov P.A., Tebenkova D.N. Development of vegetative and generative organs of representatives of the genus Spruce (*Picea* L.) introduced in the Nizhny Novgorod region. *Lesnoj vestnik*, 2013b, no. 7, pp. 97–105. (in Russ.)
- Wachowiak W., Bączkiewicz A., Celiński K., Prus-Głowacki W. Species-specific chloroplast DNA polymorphism in the trnV-rbcL region in *Pinus sylvestris* and *P. mugo*. *Dendrobiology*, 2004, vol. 51, pp. 67–72.
- Wachowiak W., Żukowska W.B., Wójcikiewicz B., Cavers S., Litkowiec M. Hybridization in contact zone between temperate European pine species. *Tree Genetics & Genomes*, 2016, vol. 12, art. no. 48. DOI: 10.1007/s11295-016-1007-x

Yesichev A.O., Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Babich A.N., Kentbaev E.Zh., Kentbayeva B.A. The content and balance of spare substances in Siberian larch shoots under conditions of reintroduction to the Nizhny Novgorod region. *Lesnoj vestnik*, 2022, vol. 26, no. 1, pp. 17–27. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-1-17-27. (In Russ.)

Zeidler M., Duchoslav M., Banaš M., Lešková M. Impacts of introduced dwarf pine (*Pinus mugo*) on the diversity and composition of alpine vegetation. *Community Ecology*, 2012, vol. 13, no. 2, pp. 213–220. DOI:10.1556/ComEc.13.2012.2.11

Zelniker Yu.N. The rate of water loss by isolated leaves of tree species and their resistance to dehydration. *Trudy instituta lesa AN SSSR*, 1955, vol. 27, pp. 6–28. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 12.04.2024

Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П. Количественные параметры хвои сосны горной при интродукции в Нижегородскую область // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 252. С. 55–79. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.55-79

Были изучены морфометрические параметры 1-летней хвои сосны горной (*Pinus mugo* Turra) как интродуцента в Нижегородской области в сравнении с сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), входящей в состав аборигенной дендрофлоры. Актуальность работы обусловлена высокой востребованностью представителей рода Сосна (*Pinus* L.) при создании искусственных насаждений различного целевого назначения и конструкций, в том числе путем привлечения для этих целей растений из состава инорайонных популяций. Методологический подход предусматривал соблюдение принципа единственного логического различия и соблюдение базовых требований к постановке опыта – типичности, пригодности, целесообразности и надежности. Объектом исследований служили 5-летние саженцы сосны горной и сосны обыкновенной, размещенные на опытном участке Нижегородского государственного агротехнологического университета с географическими координатами 56°19'43" с.ш. 44°00'07" в.д. и абсолютной высотой 141 м. Исследования проведены полевым стационарным и лабораторным методами. Предметом исследования выступала способность особей сравниваемых видов, находящихся в ювенильной фазе онтогенеза, формировать в течение одного вегетационного периода листовой аппарат. Длину хвои фиксировали электронным штангенциркулем FinePower DC0220 с точностью до 0,01 мм, массу – на прецизионных аналитических весах Acculab Vicon VIC-300d3 с точностью до 0,001 г. Дисперсионный анализ выполнен по 1-факторной и 2-факторной схемам. Были установлены фенотипические различия по линейным параметрам и массе 1-летней хвои как между сравниваемыми видами, так и между особями, принадлежащими каждому из них. Длина хвои сосны горной составила от $5,81 \pm 0,129$ см до $8,33 \pm 0,101$ см, сосны

обыкновенной – от $3,50 \pm 0,040$ см до $5,60 \pm 0,157$ см. Это дало превышение большего над меньшим в первом случае на 2,52 см или в 1,43 раза, во втором – на 2,10 см или в 1,6 раза. Сходство морфометрических характеристик хвои аборигенной сосны обыкновенной и интродуцированной сосны горной указывает на принципиальную общность их биологии.

Ключевые слова: сосна горная, сосна обыкновенная, интродуценты, аборигенные виды, хвоя, морфометрические параметры, дисперсионный анализ.

Besschetnova N.N., Besschetnov V.P. Quantitative parameters of mountain pine needles during introduction to the Nizhny Novgorod region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 252, pp. 55–79 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.55-79

Morphometric parameters of 1-year-old pine needles of mountain pine (*Pinus mugo* Turra.) as an introduced species in the Nizhny Novgorod region were studied in comparison with the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), which belongs to the native dendroflora. The relevance of the work is due to the high demand for representatives of the genus Pine (*Pinus* L.) when creating artificial plantings for various purposes and structures, including attraction of plants from non-district populations for these purposes. The methodological approach provided for compliance with the principle of the only logical difference and meeting the basic requirements for the formulation of experience – typicality, suitability, expediency and reliability. The object of research was 5-year-old seedlings of Mountain pine and Scots pine, located at the experimental site of the Nizhny Novgorod State Agrotechnological University with geographical coordinates N56°19'43" E44°00'07" and an absolute height of 141 m. The research was carried out by field stationary and laboratory methods. The subject of the study was the ability of individuals of the compared species in the juvenile phase of ontogenesis to form a leaf apparatus during one growing season. The length of the needles was recorded with an electronic vernier caliper FinePower DC0220 with an accuracy of 0.01 mm, the weight was recorded on precision analytical scales Acculab Vicon VIC-300d3 with an accuracy of 0.001 g. The ANOVA was performed according to one-way and two-way schemes. Phenotypic differences in linear parameters and weight of 1-year-old needles were established both between the compared species and between individuals belonging to each of them. The length of the needles of Mountain pine ranged from 5.81 ± 0.129 cm to 8.33 ± 0.101 cm, of Scots pine – from 3.50 ± 0.040 cm to 5.60 ± 0.157 cm. This gave an excess of more over less in the first case by 2.52 cm or 1.43 times, in the second – by 2.10 cm or 1.6 times. The similarity of the morphometric characteristics of the needles of the native Scots pine and the introduced mountain pine indicates the fundamental similarity of their biology.

Keywords: Mountain pine, Scots pine, introduced species, native species, needles, morphometric parameters, dispersion analysis.

БЕССЧЕТНОВА Наталья Николаевна – декан факультета лесного хозяйства Нижегородского государственного агротехнологического университета, доктор сельскохозяйственных наук, доцент. ResearcherID (WoS): H-1343-2019. ORCID: 0000-0002-7140-8797. SPIN-код: 6214-7263.

603107, пр. Гагарина, д. 97, г. Нижний Новгород, Россия. E-mail: besschetnova1966@mail.ru

BESSCHETNOVA Natalya N. – DSc (Agricultural), Dean of the Faculty of Forestry of the Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, Associate Professor. ResearcherID (WoS): H-1343-2019. ORCID: 0000-0002-7140-8797. SPIN-code: 6214-7263.

603107. Gagarina av. 97. Nizhny Novgorod. Russia. E-mail: besschetnova1966@mail.ru

БЕССЧЕТНОВ Владимир Петрович – заведующий кафедрой лесных культур Нижегородского государственного агротехнологического университета, доктор биологических наук, профессор. ResearcherID (WoS): S-5889-2016. ORCID: 0000-0001-5024-7464. SPIN-код: 2031-5241.

603107, пр. Гагарина, д. 97, г. Нижний Новгород, Россия. E-mail: lesfak@mail.ru

BESSCHETNOV Vladimir P. – DSc (Biological), Head of the Department of Forest Plantations of the Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, Professor. ResearcherID (WoS): S-5889-2016. ORCID: 0000-0001-5024-7464. SPIN-code: 2031-5241.

603107. Gagarina av. 97. Nizhny Novgorod. Russia. E-mail: lesfak@mail.ru

В.Ю. Нешатаев, К.И. Скворцов, М.Е. Никчемный, В.Ю. Нешатаева

**ТИПОЛОГИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ
КАМЕННОБЕРЁЗОВЫХ ЛЕСОВ
НА ЮГЕ КОРЯКСКОГО НАГОРЬЯ (КАМЧАТСКИЙ КРАЙ)**

Введение. Каменноберёзовые леса (из *Betula ermanii*) широко распространены на полуострове Камчатка, где образуют высотный пояс в горах и выходят на приморские равнины на побережьях Тихого океана и Охотского моря. В Центральной долине Камчатки пояс каменноберезняков расположен выше горнотаёжного пояса еловых и лиственничных лесов [Нешатаева, 2009].

В материковой части Корякского округа каменноберёзовые рощи встречаются редко. Северная граница их ареала проходит по юго-восточным отрогам Корякского нагорья. По данным аэровизуального обследования 1950-х гг. [Стариков, Дьяконов, 1954] граница ареала каменной берёзы проходила по широте 61°10' с. ш. В монографии В.А. Шамшина [1999] указано, что предел распространения этой древесной породы достигает 61°40' с. ш. Наиболее северная каменноберёзовая роща была отмечена нами в долине р. Тыклаваям на широте 61°18'07" [Нешатаева и др., 2016]. В центральных районах Корякского нагорья и на его северном макросклоне, расположенным в Чукотском АО, каменная берёза отсутствует [Беликович, 2001]. Целью настоящей работы является разработка классификации и хозяйственной типологии каменноберезняков севера Корякского округа.

Природные условия района исследований. В материковой части Корякского округа – на южном макросклоне Корякского нагорья – каменная берёза находится на северной границе ареала; в приморских районах её сообщества образуют фрагментарный высотный пояс на склонах южных экспозиций. Каменноберёзовые леса преимущественно распространены в юго-восточных районах Северной Корякии, подверженных влиянию воздушных масс Берингова моря.

Каменноберёзовые леса изучены нами на полуострове Говена, побережье Олюторского залива [Нешатаева и др., 2016, 2021], Пылгинском и Ветвейском хребтах, в отрогах Уннейского хребта (ГОК «Аметистовое»)

(рис. 1). Нами были уточнены ареалы каменной и белой (*Betula platyphylla*) берёз [Neshataev et al., 2020]. Климат районов исследований морской, холодный влажный; годовая сумма эффективных температур ($t > 10^{\circ}\text{C}$) не превышает $600\text{--}650^{\circ}\text{C}$, средняя t° июля–августа $+11^{\circ}\text{C}$, февраля $-14\text{--}16^{\circ}\text{C}$; годовые суммы осадков составляют $650\text{--}700\text{ mm}$. Часты туманы и низкая облачность [Кондратюк, 1974].

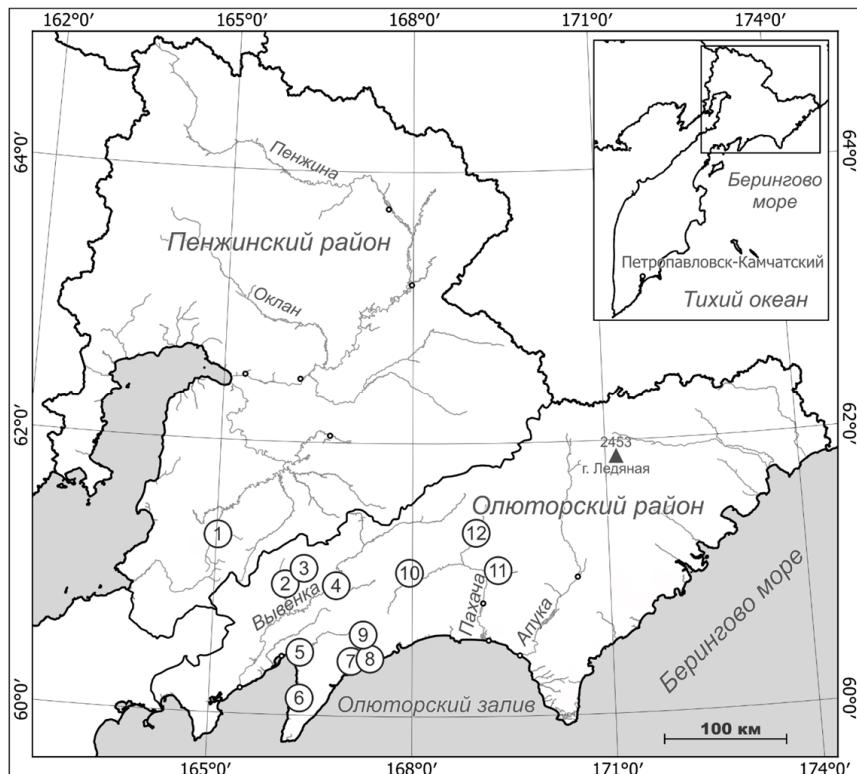


Рис. 1. Ключевые участки:

- 1 – р. Тыклаваям; 2 – ГДУ «Ледяной»; 3 – р. Тапельваям; 4 – с. Хайлино; 5 – дер. Култушное; 6 – хр. Малиновского; 7 – бух. Лаврова; 8 – лаг. Средняя; 9 – оз. Илиргытгын; 10 – хр. Ивтыгин; 11 – р. Майнлыгыргын; 12 – р. Пахача

Fig. 1. Research area:

- 1 – Tyklavayam River; 2 – mining site “Ledyanoi”; 3 – Tapelvayam River; 4 – Khailino village; 5 – Kultushnoye village; 6 – Malinovsky Range; 7 – Lavrova Bay; 8 – Srednyaya Lagoon; 9 – Ilirygtygyn Lake; 10 – Ivtygin Range; 11 – Mainylvygorgyn River; 12 – Pakhacha River

Районы распространения каменноберёзовых лесов расположены на широте 60–61° с. ш. В системе геоботанического районирования они относятся к Берингийской кустарниковой (лесотундровой) области, двум геоботаническим провинциям: Олюторской и Корякской – и трём округам: Олюторскому горно-приморскому, Пылгинскому горно-приморскому и Ветвейскому среднегорному [Нешатаева и др., 2020]. В межгорных долинах преобладают осоково-пушицевые кочкарные тундроболота; на высотах 400–500 м н. у. м. распространены сообщества кедрового и ольхового стланника в сочетании с участками кустарничковых тундр. На высотах 500–600 м – кустарничково-лишайниковые и лишайниковые горные тундры. На высотах более 700–800 м господствуют каменные осыпи и россыпи с накипными лишайниками. Вдоль рек узкой полосой тянутся пойменные леса из тополя душистого (*Populus suaveolens*), чозении (*Chosenia arbutifolia*), ольхи пушистой (*Alnus hirsuta*) и древовидных ив (*Salix udensis*, *S. schwerinii*).

Материалы и методика. Исследования проведены в 2011–2024 гг. в ходе изучения растительности севера Корякского округа в целях разработки классификации растительности и геоботанического районирования.

Исследования проводили детально-маршрутными методами. Геоботанические описания выполняли на пробных площадях (ПП) размерами 20×20 м. Таксацию древостоев проводили инструментально, с определением диаметров и высот всех деревьев на ПП. Высоту измеряли у 3–5 деревьев каждого элемента леса, отличающегося по возрасту и высоте. Возраст определяли выборочно у 15 деревьев путём подсчёта годичных колец на кернах, у остальных – косвенно, по диаметру. Объединение наших данных по 15 кернам и данных таблицы В.А. Шамшина [1999, табл. 23] позволило построить уравнение регрессии, описывающее связь возраста (A , лет) и диаметра на высоте груди (D , см):

$$A = 5,52D + 5,5; \quad R^2 = 0,88, \quad (1)$$

где R^2 – коэффициент детерминации.

Запас определяли по элементам леса как произведение суммы площадей сечений на высоту и на видовое число. Видовое число определено по таблицам №№ 20 и 21 В.А. Шамшина [1999] для 3-го разряда высот. Полученная зависимость видового числа (F) от диаметра (D) выражается уравнением регрессии:

$$F = 0,1423 \ln D + 0,08; \quad R^2 = 0,86, \quad (2)$$

где R^2 – коэффициент детерминации.

Класс бонитета устанавливали по математическому представлению шкалы М.М. Орлова для деревьев семенного происхождения [Ветров, 1997]. Сомкнутость подроста и подлеска определяли глазомерно, количе-

ство подроста – путём подсчёта особей высотой 0,1–4,0 м на ПП. Выявляли полный видовой состав сообществ, проективное покрытие каждого вида и каждого яруса. Проанализировано распространение каменноберёзовых лесов по высотному градиенту и экспозициям склонов.

Классификацию биогеоценозов проводили одновременно по признакам растительности и почв; учитывали характеристики органического и органоминерального горизонтов почвы, виды-доминанты и виды-индикаторы. Типы леса выделены по сходству лесорастительных условий (ЛРУ), индицируемых видовым составом, видами-доминантами и структурой сообществ. Разнообразие растительных сообществ в пределах одного типа леса отражено на уровне ассоциаций, выделенных с использованием принципов эколого-фитоценотической классификации растительности. К одной ассоциации мы относим сообщества, сходные по ЛРУ, ценотической структуре, видовому составу доминантов, содоминантов и видов-индикаторов. Номенклатура синтаксонов дана в соответствии с «Проектом Всероссийского Кодекса фитоценологической номенклатуры» [Нешатаев, 2001]. Названия видов сосудистых растений приведены по: [Якубов, Чернягина, 2004]; мохообразных – по: [Ignatov et al., 2006; Чернядьева, 2012] с учетом современных таксономических обработок.

Результаты и обсуждение. Табличный эколого-фитоценотический анализ геоботанических описаний позволил выделить 10 растительных ассоциаций, для которых приведены диагностические признаки и характерные типы почв. Ассоциации объединены в три типа леса.

Формация *Betuleta ermanii* – каменноберёзовые леса

Общие особенности каменноберезняков. Древостои, как правило, разновозрастные с двумя-тремя поколениями; возраст старшего поколения – 100–240 лет (табл. 1). Встречаются одновозрастные древостои (50–90 лет), возобновившиеся на гарях. Сомкнутость древесного яруса – 0,3–0,8; высота берез в возрасте более 100 лет – 7–12 м, диаметр ствола старшего поколения – до 60 см, класс бонитета V–V₆, запас – 10–108 м³/га (табл. 1). Отмечен немногочисленный семенной подрост березы – до 500 экз./га. В каменноберезняках, как правило, имеется развитый подлесок, его среднее покрытие – 40% (максимальное – до 80%). Подлесок образован крупными кустарниками и стланниками высотой до 2–2,5 м: *Alnus fruticosa*, *Betula middendorffii*, *Pinus pumila*, *Sorbus sambucifolia*. Из низких кустарников (высотой до 1–1,3 м) в качестве содоминантов отмечены *Juniperus sibirica*, *Rhododendron aureum*, *Spiraea beauverdiana*, часто встречаются *Ribes triste*, *Lonicera caerulea*, реже – *Rosa acicularis*, *Salix pulchra*, *Potentilla fruticosa*. Видовое разнообразие сосудистых растений на ПП составляет 25–27 видов.

Таблица 1

Таксационные показатели каменноберезняков юга Корякского нагорья

Forest inventory characteristics of stone-birch forests in the south
of the Koryak Upland

Асс., вариант	Номер ПП	Сомкнутость крон, %			Класс бонитета	Запас, м ³ /га	Элемент леса	Доля в составе	Высота, м	Диаметр, см	Возраст, лет	Запас, м ³ /га	Подрост, тыс. шт./га
		ДЯ	Береза	Рябина									
1	1	60	50	10	5,3	67	Б1	4	12	14	105	22	0,1
							Б2	6	8	8	50	41	—
							Р6	+	9	18	105	4	—
2	2	80	80	—	5,8	85	Б1	6	12	24	140	51	0,2
							Б2	2	11	15	90	20	—
							Б3	2	9	9	55	14	—
2	3	80	80	—	6	47	Б1	7	10	21	120	31	0,1
							Б2	3	8	10	50	16	—
2	4	70	70	—	5	42	Б	10	10	16	70	42	0,2
2	5	70	70	—	5,8	83	Б1	7	12	20	115	54	0,1
							Б2	3	10	12	70	26	—
							Б3	ед.	8	8	50	3	—
2	6	70	70	—	6	93	Б1	6	12	30	170	60	ед.
							Б2	2	10	12	70	17	—
							Б3	2	8	10	60	16	—
3а	7	50	40	—	6,1	54	Б1	9	12	35	200	49	0,1
							Б2	1	7	8	80	5	—
3б	8*	40	40	—	5,7	39	Б1	9	6	10	60	34	—
							Б2	1	5	6	40	5	—
3в	9	60	50	—	5,8	10	Б1	9	7	12	70	9	0,1
3в	10	60	60	—	5,4	53	Б	10	11	16	95	53	—
3в	11	60	40	20	6	62	Б1	4	12	30	170	24	0,1
							Б2	6	8	10	60	35	—
							Р6	+	12	7	45	3	—

Продолжение табл. 1

Асс., вариант	Номер III	Сомкнутость крон, %			Класс бонитета	Запас, м ³ /га	Элемент леса	Доля в составе	Высота, м	Диаметр, см	Возраст, лет	Запас, м ³ /га	Подрост, тыс. шт./га
		ДЯ	Береза	Рябина									
3в	12	80	50	30	5,6	69	Б	4	11	18	105	31	ед.
							Рб	6	10	12	70	38	—
3г	13	80	70	10	5,7	54	Б	10	10	17	100	53	—
							Рб	ед.	7	4	30	1	—
3г	14	70	60	—	4,6	39	Б	10	9	9	55	39	0,5
3г	15	50	50	—	6,5	18	Б1	9	9	24	140	14	—
							Б2	2	7	14	80	3	—
							Б3	1	4	4	30	1	—
3	16	90	70	20	5,7	61	Б	8	10	17	100	49	0,1
							Рб	2	8	8	50	12	—
4	17	60	60	—	6,1	53	Б	10	11	25	145	53	0,1
5	18	70	70	—	6	128	Б1	4	12	32	180	48	0,1
							Б2	4	11	24	140	58	—
							Б3	2	10	12	70	22	—
6а	19*	30	30	—	5,3	38	Б1	6	8	12	70	21	—
							Б2	4	8	11	65	17	—
6а	20	50	50	—	5,9	50	Б	10	11	14	80	50	—
6б	21*	40	30	—	5,3	64	Б1	9	12	14	80	56	—
							Б2	1	5	10	60	8	—
6б	22	40	40	—	6,6	32	Б1	7	9	28	160	21	—
							Б2	3	6	15	90	11	—
6в	23*	60	60	—	6,1	11	Б	10	7	13	80	11	—
7г	24	40	35	5	6,1	105	Б	10	8	21	115	105	ед.
							Рб	ед.	7	4	30	<1	—
7г	25	60	60	—	6,6	60	Б1	8	9	30	170	45	0,4
							Б2	3	8	16	95	15	—
7г	26	50	50	—	6,7	32	Б1	6	8	24	140	18	—
							Б2	4	8	13	80	14	—

Окончание табл. 1

Асс., вариант	Номер III	Сомкнутость крон, %			Класс бонитета	Запас, м ³ /га	Элемент леса	Доля в составе	Высота, м	Диаметр, см	Возраст, лет	Запас, м ³ /га	Подрост, тыс. шт./га
		ДЯ	Береза	Рябина									
8а	27	80	70	—	6,3	54	Б	10	10	18	105	54	—
8а	28	80	60	10	5,5	44	Б	9	9	10	60	40	ед.
							РБ	1	5	9	55	4	—
8а	29	70	60	—	6,1	39	Б1	8	9	12	70	31	—
							Б2	2	6	7	45	8	—
7а	30	80	80	—	5,7	72	Б1	10	11	20	115	72	0,1
							Б2	ед.	6	7	45	1	—
7б	31	70	60	—	6,3	37	Б	10	9	15	130	37	0,3
7г	33	60	60	—	5,7	55	Б1	8	11	18	115	43	0,4
							Б2	2	8	8	50	12	—
7г	34	80	60	—	5,6	72	Б	10	11	16	105	72	0,2
7в	32	70	70	—	6	45	Б	10	10	20	115	45	0,4
8	35*	40	30	—	4,4	8	Б	10	6	6	40	8	—
9а	36	60	60	—	5,6	64	Б	10	12	18	105	64	0,1
9а	37	50	50	—	5,1	53	Б	10	11	16	95	53	—
10	38	60	60	—	6	42	Б	10	10	21	120	42	0,1

Примечание: ДЯ – древесный ярус; + – доля элемента леса в составе от 2 до 5%; ед. – доля элемента леса в составе меньше 2%; «*» – в древостое встречаются гибриды *Betula ermanii*×*B. middendorffii*

На холмах приморской равнины близ бывшей дер. Култушное ($60^{\circ}30'$ с. ш. $166^{\circ}20'$ в. д.) распространены производные каменноберезняки, возникшие после пожара 1957–1958 гг., отличающиеся участием в древостое гибридов *Betula ermanii*×*B. middendorffii* [Сукачев, 1911] с тёмно-коричневой корой и более мелкими листьями, чем у типичной каменной берёзы [Нешатаева и др., 2021]. Их возраст – 55–65 лет, высота не превышает 6–7 м, диаметр – 8–12 см. Пирогенные сообщества отличаются сомкнутым подлеском (0,8–0,9), отсутствием подчинённых ярусов и флористической неполночленностью: видовое разнообразие сосуди-

стых растений в травяно-кустарничковом ярусе (ТКЯ) не превышает 4 видов.

Ниже приведены диагностические признаки групп ассоциаций и ассоциаций.

Группа ассоциаций *Betuleta ermanii pteridosa* – каменноберезняки папоротниковые. Сообщества группы характеризуются преобладанием в ТКЯ крупных папоротников (*Athyrium filix-femina*, *Dryopteris expansa*), иногда – участием мелких папоротников (*Phegopteris connectilis*, *Gymnocarpium dryopteris*, *Cystopteris montana*).

Ассоциация 1. *Betuletum ermanii cystopteridosum montanae* – каменноберезняк пузырниковый.

Диагностические признаки: в травяном ярусе преобладает папоротник пузырник горный (*Cystopteris montana*), занесенный в Красную книгу Камчатского края [2018].

Особенности строения и видового состава: ТКЯ с участием *Solidago spiraeifolia* и видов мезофильного таёжного мелкотравья (*Linnaea borealis*, *Lycopodium annotinum*, *Trientalis europaea*), вейника пурпурного (*Calamagrostis purpurea* s. l.) и мезотрофных травянистых мезофитов (*Aruncus dioicus*, *Equisetum pratense*, *Galium boreale*, *Moehringia lateriflora*, *Poa arctica*, *Rubus arcticus*, *Saussurea oxyodonta*, *Saxifraga nelsoniana*, *Thalictrum minus*, *Thalictrum sparsiflorum*, *Veratrum oxysepalum*, *Viola epipsiloidea*). Мохово-лишайниковый ярус (МЛЯ) крайне разрежен.

Почвы: подбуры грубогумусированные.

Распространение. Каменноберезняк пузырниковый – очень редкая ассоциация, встречена в Северной Корякии единично. На полуострове Камчатка не отмечена.

Ассоциация 2. *Betuletum ermanii dryopteridosum* – каменноберезняк щитовниковый.

Диагностические признаки: ТКЯ образован щитовником распространенным (*Dryopteris expansa*), в МЛЯ обильны бореальные зеленые мхи-мезофиты (*Pleurozium schreberi*, *Dicranum scoparium*, *Hylocomium splendens*, *Rhytidadelphus squarrosus*).

Особенности строения и видового состава: ТКЯ с участием *Solidago spiraeifolia* и видов мезофильного таёжного мелкотравья (*Linnaea borealis*, *Lycopodium annotinum*, *Trientalis europaea*); постоянно встречается *Calamagrostis purpurea*; отмечены *Aconogonon tripterocarpum*, *Chamaepericlymenum suecicum* и *Rubus chamaemorus*. В МЛЯ обильны бореальные мхи-мезофиты *Pleurozium schreberi*, *Dicranum scoparium*.

Почвы: подбуры грубогумусированные глееватые.

Распространение. Папоротниковые каменноберезняки описаны в бухте Лаврова, на склонах горы Островной, у бывш. пос. Дружный ($60^{\circ}24'04''$ с. ш. $167^{\circ}05'20''$ в. д.), на ЮЗ берегу лагуны Средняя ($60^{\circ}25'14''$ с. ш. $167^{\circ}22'20''$ в. д.) и на склонах хребта Ивтыгин (гора Долинная).

На полуострове Камчатка распространены на высотах 400–500 м, на склонах С и СВ экспозиций [Нешатаева, 2009]; отмечены на Восточной и Западной Камчатке [Комаров, 1940; Балмасова, 1994; Тюлина, 2001]. Викарирующая ассоциация с преобладанием в древостое берёзы шерстистой (*Betula lanata*; syn.: *B. ermanii* var. *lanata*) указана для севера Охотского побережья (Магаданская обл.) [Стариков, 1958].

Ассоциация 3. *Betuletum ermanii alnoso fruticosae-dryopteridosum* – каменноберезняк ольховниково-щитовниковый.

Диагностические признаки. Сомкнутость ольхи кустарниковой более 30%, в ТКЯ преобладает щитовник распространенный. Видовой состав сходен с каменноберезняками щитовниковых (ассоциация 2). Мхи, в отличие от сообществ ассоциации 2, малообильны.

Группа ассоциаций *Betuleta ermanii calamagrostidosa* – каменноберезняки вейниковые. Сообщества группы характеризуются развитым травяным ярусом с преобладанием вейника пурпурного (*Calamagrostis purpurea* s. l., incl. *C. langsdorffii*). В подлеске общее покрытие стланников и крупных кустарников (*Alnus fruticosa*, *Betula middendorffii*, *Pinus pumila*, *Sorbus sambucifolia*) – до 30%.

Ассоциация 4. *Betuletum ermanii calamagrostidosum* – каменноберезняк вейниковый.

Диагностические признаки: те же, что и для группы ассоциаций.

Структура и состав. Сообщества ассоциации в районе исследований отнесены к обеднённой видами субассоциации *subass. inops*, отличающейся от типичной субассоциации, описанной на полуострове Камчатка [Нешатаева, 2009], отсутствием *Cirsium kamtschaticum*, *Geranium erianthum*, *Maianthemum dilatatum*. В подлеске изредка встречаются *Juniperus sibirica*, *Potentilla fruticosa*, *Rhododendron aureum*, *Rosa acicularis*, *Salix pulchra*. Проективное покрытие ТКЯ варьирует от 10 до 60%. В первом подъярусе высотой 60–80 см преобладает вейник (*Calamagrostis purpurea*). Во втором подъярусе константны виды таёжного мелкотравья и *Rubus arcticus*. Покрытие мхов 1–2%; отмечены *Dicranum majus*, *Pohlia nutans*, *Sanionia uncinata*, *Sciuro-hypnum reflexum*. Видовое разнообразие в сообществах ассоциации составляет от 21 до 34 видов.

В составе ассоциации выделены следующие варианты:

4а – дёреновый, с преобладанием дёrena шведского (*Chamaepericlymenum suecicum*) и участием кустарничков (*Empetrum nigrum*, *Vaccinium uliginosum*, *Vaccinium vitis-idaea*);

4б – высокотравный, с высоким обилием волжанки (*Aruncus dioicus*), недоспелки (*Cacalia hastata*) и чемерицы (*Veratrum oxysepalum*);

4в – ольховниковый, с преобладанием в подлеске ольхового стланика (*Alnus fruticosa*) (покрытие до 30%);

4г – кедровниковый, с преобладанием в подлеске кедрового стланика (*Pinus pumila*) (покрытие до 30%);

4д – беднотравный.

Во всех вариантах в подлеске отмечена *Spiraea beauverdiana*; в вариантах 4б и 4в константны *Ribes triste*, *Lonicera caerulea*. В варианте 4б со-доминантами являются виды высокотравья (*Aruncus dioicus*, *Cacalia hastata*, *Veratrum oxysepalum*), индицирующие влажные, богатые гумусом почвы. Низкое общее проективное покрытие видов в сообществах варианта 4д обусловлено высокой сомкнутостью древесного яруса, создающего сильное затенение под пологом леса.

Почвы: подбуры иллювиально-гумусовые супесчаные скелетные и сильноскелетные.

Распространение. Сообщества ассоциации описаны на полуострове Говена, на западном склоне хр. Малиновского ($60^{\circ}10' с. ш.$ $166^{\circ}20' в. д.$) на высотах до 180 м над ур. моря. На побережье залива Корфа вейниковые каменноберезняки встречаются на высотах 10–25 м, занимая седловины и пологие склоны низкогорий; приурочены к местообитаниям, защищенным от холодных ветров, где накапливается снег.

На Камчатке вейниковые каменноберезняки распространены на высотах 400–700 м н. у. м., на верхней границе леса [Нешатаева, 2004]. Они встречаются также на Сихотэ-Алине [Колесников, 1938, 1969], Сахалине [Власов, 1959] и Южных Курилах (о. Итуруп) [Воробьев, 1963]. Викарирующая ассоциация с преобладанием берёзы шерстистой *Betuletum lanatae calamagrostidosum* [Кабанов, 1972] указана для Магаданской обл., Хабаровского края и Якутии.

Группа ассоциаций *Betuleta ermanii fruticosa* – каменноберезняки кустарниковые. Сообщества группы характеризуются развитым подлеском (сомкнутость более 30%) с преобладанием крупных кустарников и стлаников (*Alnus fruticosa*, *Betula middendorffii*, *Pinus pumila*, *Sorbus sambucifolia*).

Ассоциация 5. *Betuletum ermanii sorbosum sambucifoliae* – каменноберезняк рябиновый.

Диагностические признаки. Сообщества ассоциации характеризуются подлеском из кустарниковой рябины бузинолистной *Sorbus sambucifolia* (покрытие более 30%).

Структура и состав. Кроме рябины бузинолистной, в подлеске встречаются ольха кустарниковая, кедровый стланик, спирея Бовера, жимолость сизая и рододендрон золотистый. В ТКЯ преобладает *Calamagrostis purpurea*, остальные виды малообильны. Мхи отмечены единично, как правило, они приурочены к прикомлевым повышениям.

Почвы: подбуры иллювиально-гумусовые супесчаные сильнокелетные.

Распространение. Сообщества ассоциации описаны на восточном берегу оз. Илиргытгын ($60^{\circ}36' с. ш.$ $167^{\circ}15' в. д.$) на высоте 180 м, на крутых (30°) ЮЗ склонах хребта Малиновского. На полуострове Камчатка встречаются в Кроноцком заповеднике на высотах до 200 м [Балмасова, 1994] и в Южно-Камчатском заказнике (бассейн р. Озерная и Курильского оз.) [Нешатаева, 2002]. Эта же ассоциация под названием *Paraermanii-Betuletum sorbosum* указана для Южных Курил [Кабанов, 1972]. Согласно М. А. Шембергу [1986] выделение *Betula paraermanii* в качестве самостоятельного вида признано необоснованным.

Ассоциация 6. *Betuletum ermanii alnosum fruticosae* – каменноберезняк ольховниковый.

Диагностические признаки. Сообщества ассоциации характеризуются подлеском из *Alnus fruticosa* (высотой до 2,5 м) иногда с участием *Pinus pumila*; в ТКЯ доминантами и содоминантами являются вейник пурпурный, виды высокотравья, таёжного мелкотравья и хвош лесной (*Equisetum sylvaticum*), встречаются беднотравные сообщества.

Структура и видовой состав. Кроме ольхи кустарниковой в подлеске константны спирея Бовера и рододендрон золотистый; в ТКЯ – вейник, княженика (*Rubus arcticus*), золотарник, виды таёжного мелкотравья. Мховой ярус не выражен. На прикомлевых повышениях встречены *Sciuro-hypnum reflexum*, *Polytrichum juniperinum*, *Dicranum majus*, *Plagiothecium denticulatum*, *Sanionia uncinata*. В составе ассоциации выделено пять вариантов:

6а – вейниковый, с преобладанием в ТКЯ вейника пурпурного;

6б – высокотравный, с преобладанием чемерицы и волжанки;

6в – беднотравный, где покрытие ТКЯ менее 10%;

6г – ерниково-кедровостланиковый, с участием кедрового стланика и берёзки Миддендорфа;

6д – вейниково-кедровостланиковый.

Почвы: подбуры иллювиально-гумусовые супесчаные сильноскелетные.

Распространение. На Камчатке каменноберезняки ольховниковые распространены на верхней границе леса; в Кроноцком заповеднике они встречаются на высотах 500–700 м [Балмасова, 1994]. На Западной Камчатке (долина р. Сопочная) они приурочены к крутым склонам, имеющим вогнутый профиль [Тюлина, 2001]. В Южно-Камчатском заказнике сообщества ассоциации встречаются в окрестностях Курильского оз., на склонах вулкана Ильинский, в верхнем течении р. Озерная [Нешатаева, 2002, 2004]. В Северной Корякии каменноберезняки ольховниковые отмечены на высотах 40–50 м на полуострове Говена, на западном склоне хр. Малиновского, в 7,5 км к востоку от кордона «Мыс Песчаный». Викарирующая ассоциация под названием *Betuletum lanatae alnosum fruticosae* указана для Магаданской обл., Якутии, Хабаровского края [Кабанов, 1972].

Ассоциация 7. *Betuletum ermanii pinosum pumilae* – каменноберезняк кедровостланиковый.

Диагностические признаки. Сообщества ассоциации характеризуются сомкнутым подлеском из кедрового стланика и разреженным ТКЯ.

Структура и видовой состав. В развитом подлеске (сомкнутость 0,6–0,7) преобладает кедровый стланик (30–50%), единично участвуют можжевельник сибирский, ольховый стланик, берёзка Миддендорфа, жимолость сизая, лапчатка кустарниковая, рододендрон золотистый, смородина печальная, шиповник иглистый, ива красная, спирея Бовера.

В составе ассоциации выделены следующие варианты:

7а – разнотравно-вейниковый;

7б – зеленошно-рододендроновый (с *Rhododendron aureum*);

7в – можжевелово-рододендроновый;

7г – беднотравный.

В ТКЯ (1–50%) константы *Calamagrostis purpurea*, *Chamerion angustifolium*, *Linnaea borealis*, *Lycopodium annotinum*, *Rubus arcticus*, *Trientalis europaea*, *Solidago spiraeifolia*. МЛЯ фрагментарный (покрытие до 1%), отмечены *Dicranum majus*, *Polytrichum juniperinum*, *Sanionia uncinata*, *Sciuro-hypnum reflexum*.

Видовое разнообразие сосудистых растений – до 23–25 видов на ПП.

Почвы: подбуры сухоторфянистые, подбуры иллювиально-железистые супесчаные сильноскелетные, реже – литоземы грубогумусированные.

Распространение. Сообщества ассоциации описаны в окрестностях ГОК «Аметистовое» в долине р. Тыклаваям, на крутом (30°) южном склоне г. Скалистая на высотах 127–137 м н. у. м., а также в окрестностях ГДУ «Ледяной», на ЮЗ склоне борта долины руч. Южный на высоте 224 м.

На полуострове Камчатка каменноберезняки с подлеском из кедрового стланика отмечены в Центральной долине Камчатки [Липшиц, Ливеровский, 1937].

Ассоциация 8. *Betuletum ermanii betulosum middendorffii* – каменноберезняк ерниковый.

Диагностические признаки: сообщества ассоциации характеризуются сомкнутым подлеском из ерника – берёзки Миддендорфа (*Betula middendorffii*; syn.: *B. divaricata*).

Структура и видовой состав. Древостой (сомкнутость 0,3), образован гибридогенной березой *Betula ermanii* × *B. middendorffii*. Подлесок (покрытие 85%) из берёзки Миддендорфа (60%) с участием ольховника (20%) и кедрового стланика (5%). Видовой состав сообществ ассоциации значительно обеднен. ТКЯ и МЛЯ не развиты (беднотравный вариант). Единично отмечены *Calamagrostis purpurea*, *Vaccinium vitis-idaea*, *Ledum decumbens*, *Empetrum nigrum*, *Moehringia lateriflora*, boreальные мхи *Polytrichum juniperinum*, *P. commune*, *Sanionia uncinata*, лишайники *Cladonia arbuscula*, *C. gracilis* и *Cladonia* spp.

Почвы: подбуры иллювиально-гумусовые супесчаные сильноскелетные.

Распространение. Ерниковые каменноберезняки встречаются на приморской всхолмленной равнине в нижнем течении р. Култушная ($60^{\circ}30'$ с. ш. $166^{\circ}20'$ в. д.) на вершинах и склонах холмов, на высоте около 35 м. Они возобновились на гари после катастрофического пожара 1957–1958 гг. Ранее здесь произрастали каменноберезняки кустарниковые и вейниковые. Высота берёз составляла 10–15 м, диаметр ствола на высоте 1,3 м достигал 50 см, возраст древостоя составлял 50–140 лет. В подлеске встречались *Alnus fruticosa*, *Sorbus sambucifolia*, *Spiraea beauverdiana*. В травяно-кустарничковом ярусе был обилен *Calamagrostis purpurea* s. l. [Катенин, Шамурин, 1963]. Через 65 лет после пожара березняки восстановились не полностью и представлены производными ерниковыми сообществами.

Ассоциация 9. *Betuletum ermanii spiraeosum beauverdianae* – каменноберезняк спиреевый.

Диагностические признаки: в хорошо развитом подлеске преобладает спирея Бовера – *Spiraea beauverdiana*.

Структура и видовой состав: кроме спиреи, в подлеске встречаются крупные кустарники и стланики (*Alnus fruticosa*, *Pinus pumila*, *Sorbus sambucifolia*), но их суммарное покрытие менее 30%. Отмечена также *Ribes triste*. В ТКЯ встречаются вейник и линнея *Linnaea borealis*. Проективное покрытие МЛЯ варьирует (3–20%), встречаются *Dicranum scoparium*, *Pleurozium schreberi*, *Ptilidium pulcherrimum*, *Sciuro-hypnum reflexum* и др.

Ассоциация 10. *Betuletum ermanii rhododendrosum aurei* – каменноберезняк рододендроновый.

Диагностические признаки: в кустарниковом ярусе преобладает рододендрон золотистый *Rhododendron aureum*.

Структура и видовой состав: кроме доминирующего рододендрона (высотой 0,6 м) в подлеске также отмечены стланики *Alnus fruticosa*, *Pinus pumila* (высотой до 2 м) и кустарники *Spiraea beauverdiana*, *Ribes triste*, *Lonicera caerulea* (высотой до 1 м). ТКЯ отличается высоким видовым разнообразием: 28 видов, выраженных доминантов нет. МЛЯ разрежен.

Почвы и особенности экологии: сухоторфянистые подбуры грунто-во-глеевые. Сообщества ассоциации приурочены к участкам с обильным снежным покровом в ложбинах и на верхней границе леса.

Распространение. Сообщество ассоциации описано в Олюторском р-не, в верхнем течении р. Тапельваем на СЗ склоне отрога Ветвейского хребта крутизной 20° на высоте 215 м н. у. м.

Типы леса

Объединяя ассоциации на основе сходства их местообитаний, мы выделяем для Северной Корякии три типа леса, которые расположены в ряду увеличения почвенного богатства и увлажнения:

1) Тип леса **Каменноберезняк кедровостланиковый** занимает свежие, бедные минеральными веществами местообитания (эдафотоп В2). Включает 2 коренные ассоциации: Каменноберезняк кедровостланиковый и Кб. рододендроновый – и одну производную ассоциацию – Кб. ерниковый. Коренные ассоциации объединяет наличие в почвах сухоторфянистого горизонта. Производный характер Кб. ерниковых подтверждается их формированием на гарях. Сообщества берёзки Миддендорфа имеют сходный видовой состав с сообществами кедрового стланика и часто встречаются на гарях в поясе кедрового стланика, что позволяет относить их к производ-

ным сообществам, а также считать Кб. ерниковые производными сообществами на месте Кб. кедровостланиковых.

2) Тип леса **Каменноберезняк вейниково-кустарниковый** приурочен к влажным почвам средних условий почвенного богатства (эдафотоп В3). Включает ассоциации: Каменноберезняк пузырниковый, Кб. вейниковый, Кб. рябиновый, Кб. ольховниковый, Кб. спиреевый. ЛРУ характеризуются наличием в почвах дернового горизонта. Леса этого типа тяготеют к приморским районам с океаническим климатом, в то время как Кб. кедровостланиковые приурочены к субконтинентальным районам.

3) Тип леса **Каменноберезняк папоротниковый** занимает наиболее влажные местообитания с богатыми гумусом почвами (эдафотоп С3). Включает две ассоциации: Каменноберезняк щитовниковый и Кб. ольховниково-щитовниковый. Леса данного типа также тяготеют к приморским районам.

Диагностические и константные виды для всех типов леса приведены в табл. 2. Первые два типа имеют сходный видовой состав, но отличаются почвенными характеристиками, различными доминантами подлеска (зимнезелёный – в кедровостланиковом типе и листопадный в вейниково-ольховниковом), степенью океаничности климата, развитием травяного покрова. Папоротниковые каменноберезняки хорошо отличаются и по характеру экотопа, и по доминантам травяного покрова, а также по наличию развитого мохового яруса. Общими для всех типов являются *Pinus pumila*, *Alnus fruticosa*, *Spiraea beauverdiana*, *Calamagrostis purpurea* и группа таёжных мезофитов (табл. 2).

Проведен сравнительный анализ флористического состава и структуры каменноберёзовых лесов севера Корякского округа и полуострова Камчатки, показавший их существенные различия. Каменноберезняки материковой Корякии характеризуются значительной редукцией видового состава: в них отсутствуют виды крупнотравья (*Filipendula camtschatica*, *Senecio cannabifolius*, *Heracleum lanatum*), майник (*Maianthemum dilatatum*), черемша (*Allium ochotense*), триллиум (*Trillium camschatcense*), орхидные и многие другие виды, характерные для каменноберёзовых лесов полуострова Камчатки. Структура каменноберезняков Северной Корякии характеризуется высокой сомкнутостью подлеска, образованного мезофильными кустарниками и крупными стланиками (табл. 2). В Северной Корякии отсутствуют типы леса Каменноберезняк высокотравный, Кб. кустарниково-разнотравный и Кб. низкотравный, выделенные В.А. Шамшиным [1999] для полуострова Камчатки.

Таблица 2

Константность и проективное покрытие диагностических и константных видов каменноберезняков Северной Корякии

Constancy and projective coverage of diagnostic and constant species of stone birch forests in Northern Koryakia

Виды	Тип леса		
	Кб. кедрово-стланиковый	Кб. вейниково-ольхниковый	Кб. папоротниковый
Количество ПП	10	22	6
<i>Rhododendron aureum</i>	I.5(50)	II.1(+5)	II.3(5–10)
<i>Betula middendorffii</i>	III.7(+65)	II.1(+10)	I.+(+1)
<i>Pinus pumila</i>	V.37(3–70)	V.7(+25)	V.1(+2)
<i>Galium boreale</i>	III.+(+1)	I.+(+2)	–
<i>Artemisia arctica</i>	III.+(+1)	I.+(+1)	–
<i>Rubus arcticus</i>	IV.2(+10)	V.1(+5)	I.+(+1)
<i>Alnus fruticosa</i>	V.5(1–20)	V.23(+85)	V.11(2–30)
<i>Spiraea beauverdiana</i>	IV.4(1–15)	V.6(+40)	V.3(1–10)
<i>Sorbus sambucifolia</i>	II.2(2–20)	III.4(+40)	V.19(5–30)
<i>Calamagrostis purpurea</i>	V.9(+40)	V.17(+60)	V.2(1–5)
<i>Veratrum oxysepalum</i>	III.1(1–3)	III.3(+20)	II.+(+1)
<i>Aruncus dioicus</i>	III.+(-1)	III.2(+15)	II.+(+1)
<i>Dicranum spp.</i>	IV.1(+2)	V.1(+5)	V.13(2–26)
<i>Dryopteris expansa</i>	II.+(+1)	II.1(+5)	V.43(25–60)
<i>Pleurozium schreberi</i>	II.+(+1)	II.1(+10)	V.10(5–20)
<i>Lophozia longidens</i>	II.+(+1)	II.+0,1–1)	V.1(+3)
<i>Rubus chamaemorus</i>	–	I.+(+1)	V.1(1–1)
<i>Chamaepericlymenum suecicum</i>	–	I.+10–10)	III.4(1–20)
Виды, константные для всех типов леса			
<i>Trientalis europaea</i>	III.+(+1)	IV.+(+1)	V.1(+3)
<i>Lycopodium annotinum</i>	IV.1(0,1–2)	IV.2(+25)	V.3(1–10)
<i>Linnaea borealis</i>	IV.2(1–7)	IV.3(+40)	V.3(1–10)
<i>Solidago spiraeifolia</i>	III.+(+1)	II.+(+1)	IV.+(+1)
<i>Aconogonon tripterocarpum</i>	III.+(+1)	II.+(+1)	IV.+(+1)
<i>Polytrichum juniperinum</i>	IV.+(+1)	IV.+(+1)	V.4(+10)
<i>Polytrichum commune</i>	III.+(+1)	III.+0,1–5)	IV.+(+1)

Примечание: римскими цифрами даны классы константности с интервалами 20% (I – 1–20%); цифрами и знаком + – среднее проективное покрытие и в скобках его наименьшее и наибольшее значения; жирным шрифтом выделены диагностические виды-доминанты; обведены в рамки виды-индикаторы

Наибольшей пожароопасностью обладают каменноберезняки кедрово-стланиковые за счет высокой горимости кедрового стланика, наличия сухоторфянистого горизонта и сухого хвойного и листового опада. Наименьшей горимостью отличаются каменноберезняки папоротниковые со слабо подверженным огню влажным покровом из щитовника и наличием таких индикаторов повышенного увлажнения, как морошка.

По нашим наблюдениям, в северной части Камчатского края возобновление каменной берёзы после сплошных рубок во всех типах леса затруднено вследствие развития на вырубках мощного травяного покрова из вейника, встречающегося во всех типах леса.

В современной литературе обсуждаются основные направления лесотипологических исследований в России и СССР: учение о типах леса Г.Ф. Морозова, классификация типов лесных земель А.А. Крюденера, лесоэкологическое направление Е.В. Алексеева – П.С. Погребняка – Д.В. Воробьева, эколого-фитоценотическая типология В.Н. Сукачева, географогенетическая типология леса Б.А. Ивашкевича – Б.П. Колесникова и динамическая типология И.С. Мелехова [Рысин, 2009; Нешатаев, 2016; Микунова, 2017; Назимова, 2022; Фомин и др., 2023]. Теоретические разногласия, присущие этим направлениям, имеют преимущественно историческое значение, так как лесная типология развивалась по пути комплексного биогеоценотического и динамического понимания типа леса. В 1982 г. на Всесоюзном лесотипологическом совещании во Львове произошло объединение этих подходов: основной единицей классификации стал тип ЛРУ (он же серия типов леса), включающий коренные и производные сообщества на сходных экотопах; эдафотопы Алексеева-Погребняка рекомендованы для обозначения типов условий местопроизрастания, а тип леса и тип вырубки предложено выделять и именовать по преобладающим видам в пределах ЛРУ [Рысин, 2009; Нешатаев, 2016]. Это решение нашло свое отражение в ГОСТ 18486–87 «Лесоводство. Термины и определения» и лесоустроительных инструкциях. Как отмечает Д.И. Назимова [2022], развитие эколого-фитоценотического метода В.Н. Сукачёва в Сибири шло по пути сопряженного изучения растительности в ее связи с почвами, гидрологией, климатом и другими компонентами лесного покрова с учётом её динамики по Б.П. Колесникову.

Применяемый в настоящей статье подход, разработанный в Санкт-Петербургском НИИ лесного хозяйства [Федорчук и др., 2005], наследует лучшие черты перечисленных Н.С. Ивановой [2019] и В.В. Фоминым и др. [2023] подходов в лесной типологии: биогеоценотическое понимание типа

леса, построение экологических рядов, методы лесотипологических полевых исследований, обязательно включающих описание почв (по В.Н. Сукачёву), учёт показателей, характеризующих увлажнение и богатство почв (по А.А. Крюденеру, В.Н. Сукачёву, Л.Г. Раменскому), упорядочивание видов и описаний в таблицах геоботанических описаний (по Ж. Браун-Бланке), использование видов-индикаторов и их групп (по Алексееву-Погребняку-Воробьёву), динамическое понимание основной единицы типологии – типа ЛРУ (по Б.А. Ивашкевичу, Б.П. Колесникову).

Заключение. Впервые для севера Корякского округа разработана типология каменноберёзовых лесов. Выделено три типа леса: Каменноберезняк кедровостланиковый, Кб. вейниково-ольховниковый, Кб. папоротниковый. Каменноберёзовые рощи встречаются на высотах до 300–350 м н. у. м. и, как правило, приурочены к склонам южных румбов крутизной до 30–50°, закрытым от морских ветров.

Кроме основной лесообразующей породы (*Betula ermanii*) на побережье залива Корфа, близ бывш. дер. Култушное, отмечены гибриды (*Betula ermanii* × *B. middendorffii*) – прямостоячные деревья высотой до 6–7 м с красно-коричневой корой и промежуточными по форме листьями и сережками. В древостоях в примеси иногда присутствует рябина сибирская (*Sorbus sibirica*). Древостои большей частью разновозрастные с 2–3 поколениями; Va бонитета, реже IV, V и Vb бонитета. Бонитет Vb отмечен для старовозрастных древостоев (140–170 лет). Средний запас древостоев – 54 м³/га, он варьирует от 10 до 128 м³/га. Подрост, как правило, малочисленный. Для большинства каменноберезняков характерен развитый подлесок с участием кедрового и/или ольхового стланика, спиреи Бовера.

Под каменноберёзовыми лесами преобладают влажные почвы легкого гранулометрического состава: супеси или легкие суглинки с большим количеством камней и щебня (элюво-делювий на склонах гор), реже – валуны и гальки. Под папоротниковыми березняками встречены крупнообломочные сланцы. Мощность почвенного профиля – 25–50 см. Почвообразующие породы кислые. Преобладающий тип почв – подбуры; по характеру органического и гумусового горизонтов различаются типичные, грубогумусированные и сухогорфянистые подбуры. Каменноберезняки не встречаются на участках с близким залеганием многолетней мерзлоты, окрайках болот и в поймах рек, что связано с высокой требовательностью каменной бересклета к почвенному дренажу.

Сведения о финансировании. Работа выполнена в рамках плановой темы лаборатории общей геоботаники БИН РАН № 121032500047-1 «Расти-

тельность Европейской России и Северной Азии: разнообразие, динамика, принципы организации».

Благодарности. Авторы сердечно благодарны к.б.н. В.В. Якубову (ФИЦ Биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН) за помощь в определении некоторых видов сосудистых растений; к.б.н. Е.Ю. Кузьминой (БИН РАН) – за определение мохообразных; а также участникам полевых исследований к.б.н. А.П. Кораблёву (БИН РАН), доц. В.Н. Тюрину (СурГУ) и В.Е. Кириченко (КФ ТИГ ДВО РАН).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Балмасова М.А. Каменноберезовые леса // Растильность Кроноцкого государственного заповедника (Восточная Камчатка) (Тр. Ботанического ин-та им. В.Л. Комарова РАН. Вып. 16). СПб., 1994. С. 41–68.

Беликович А.В. Растильный покров северной части Корякского нагорья. Владивосток: Дальнаука, 2001. 420 с.

Ветров Л.С. Математическое представление бонитетной шкалы М.М. Орлова и пути её использования // Тр. СПбНИИЛХ. Гидротехническая мелиорация земель, ведение лесного хозяйства и вопросы экологии. 1997. С. 49–51.

Власов С.Т. Леса Сахалина. Южно-Сахалинск: Кн. изд-во, 1959. 108 с.

Воробьев Д.П. Растильность Курильских островов. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1963. 92 с.

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

Кабанов Н.Е. Каменноберезовые леса в ботанико-географическом и лесоводственном отношениях. М.: Наука, 1972. 136 с.

Катенин А.Е., Шамурина В.Ф. Возобновление некоторых древесных и кустарниковых пород на гарях в районе залива Корфа (Корякская земля) // Ботанический журнал. 1963. Т. 48, № 9. С. 1282–1297.

Колесников Б.П. Растильность восточных склонов среднего Сихотэ-Алиня // Тр. Сихотэ-Алинского государственного заповедника. М., 1938. Вып. 1. С. 26–206.

Колесников Б.П. Высокогорная растильность среднего Сихотэ-Алиня. Владивосток: Дальневост. кн. изд-во, 1969. 106 с.

Комаров В.Л. Ботанический очерк Камчатки // Камчатский сборник. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1940. Т. 1. С. 5–52.

Кондратюк В.И. Климат Камчатки. М.: Гидрометеоиздат, 1974. 204 с.

Красная книга Камчатского края. Т. 2. Растилья / Отв. ред. О.А. Чернягина. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2018. 388 с.

Липшиц С.Ю., Ливеровский Ю.А. Почвенно-ботанические исследования и проблема сельского хозяйства в центральной части долины реки Камчатки // Тр. СОПС АН СССР. Сер. Камчатская. Л., 1937. Вып. 4. 250 с.

Мигунова Е.С. Лесная типология Г.Ф. Морозова – А.А. Крюденера – П.С. Погребняка – теоретическая основа лесоводства // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21, № 5. С. 52–63. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-52-63

Назимова Д.И. О путях развития лесной типологии в Сибири в 1960-х–2000-х гг. // Ботанический журнал. 2022. Т. 107, № 5. С. 419–432.

Нешатаев В.Ю. Проект Всероссийского Кодекса фитоценологической номенклатуры // Растительность России. 2001. Т. 1. С. 62–70. DOI: 10.31111/vegrus/2001.01.62

Нешатаев В.Ю. Лесная типология в России: история и современные проблемы // Лесная типология: современные методы выделения типов леса, классификация и районирование лесной растительности: материалы Междунар. науч. Семинара; НАН Беларусь, Ин-т эксперим. ботаники им. В.Ф. Купревича НАН Беларусь. Минск: Колорград, 2016. С. 13–27.

Нешатаева В.Ю. Растительность Южно-Камчатского заказника // Флора и растительность Южной Камчатки (Труды Камчатского филиала ТИГ ДВО РАН. Вып. 3). Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор. Кн. изд-во, 2002. С. 137–232.

Нешатаева В.Ю. Эколо-фитоценотическая классификация сообществ каменноберезовых лесов полуострова Камчатки // Растительность России. 2004. Т. 6. С. 54–82. DOI: 10.31111/vegrus/2004.06.54

Нешатаева В.Ю. Растительность полуострова Камчатка. М.: КМК, 2009. 537 с.

Нешатаева В.Ю., Кораблев А.П., Нешатаев В.Ю. Каменноберезовые леса юга Корякского нагорья (Камчатский край) на северном пределе распространения // Ботанический журнал. 2016. Т. 101, № 12. С. 1410–1429. DOI: 10.1134/S000681361612005X

Нешатаева В.Ю., Кузьмина Е.Ю., Кириченко В.Е., Нешатаев В.Ю., Каютин П.Н. Каменноберезовые леса полуострова Говена и побережья Олюторского залива (Корякский округ Камчатского края) // Труды Карельского НЦ РАН. Биогеография. 2021. № 1. С. 5–27. DOI: 10.17076/bg1248

Нешатаева В.Ю., Нешатаев В.Ю., Кириченко В.Е. Растительность Северной Корякии (Камчатский край) и ее геоботаническое районирование // Вестник СПбГУ. Сер. «Науки о Земле». 2020. Т. 65, вып. 2. С. 395–416. DOI: 10.21638/spbu07.2020.210

Рысин Л.П. Есть ли будущее у лесной типологии в России? // Лесные ресурсы таежной зоны России: проблемы лесопользования и лесовосстановления: матер. Всероссийск. науч. конф. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2009. С. 8–10

Стариков Г.Ф. Леса Магаданской области. Магадан: Кн. изд-во, 1958. 223 с.

Стариков Г.Ф., Дьяконов П.Н. Леса полуострова Камчатки. Хабаровск: Кн. изд-во, 1954. 152 с.

Сукачев В.Н. К систематике сибирских берез // Тр. Ботан. Музея АН ССР. 1911. № 8. С. 203–277.

Тюлина Л.Н. Растительность западного побережья Камчатки // Труды Камчатского института экологии и природопользования ДВО РАН. Петропавловск-Камчатский, 2001. Вып. 2. 304 с.

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

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

Чернядьева И.В. Мхи полуострова Камчатка. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. 459 с.

Шамшин В.А. Каменноберезовые леса Камчатки: биология, экология, строение древостоеv. М.: ГЕОС, 1999. 170 с.

Шемберг М.А. Береза каменная: систематика, география, изменчивость. Новосибирск: Наука, 1986. 175 с.

Якубов В.В., Чернягина О.А. Каталог флоры Камчатки (сосудистые растения). Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2004. 165 с.

Ignatov M.S., Afonina O.M., Ignatova E.A., Abolina A., Akatova T.V., Baisheva E.Z., Bardunov L.V., Baryakina E.A., Belkina O.A., Bezgodov A.G., Boychuk M.A., Cherdantseva V.Ya., Czernyadjeva I.V., Doroshina G.Ya., Dyachenko A.P., Fedosov V.E., Goldberg I.L., Ivanova E.I., Jukoniene I., Kannukene L., Kazanovsky S.G., Kharzinov Z.Kh., Kurbatova L.E., Maksimov A.I., Mamakulov U.K., Manakyan V.A., Maslovsky O.M., Napreenko M.G., Otnyukova T.N., Partyka L.Ya., Pisarenko O.Yu., Popova N.N., Rykovsky G.F., Tubanova D.Ya., Zheleznova G.V., Zolotov V.I. Checklist of mosses of East Europe and North Asia // Arctoa. 2006. Vol. 15. P. 1–130. DOI: 10.15298/arctoa.15.01

Neshataev V.Yu., Neshataeva V.Yu., Kirichenko V.E. Phytogeographical boundaries between Stone-birch and White-birch forests in the North of the Koryak Region // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 574. P. 1–10. DOI: 10.1088/1755-1315/574/1/012057

References

Balmasova M.A. Stone-birch forests. *Vegetation of the Kronotsky State Reserve (Eastern Kamchatka) (Proceedings of the Komarov Botanical Institute RAS. Vol. 16)*. St. Petersburg, 1994, pp. 41–68. (In Russ.)

Belikovich A.V. Vegetational cover of Koryak Upland, Northern part. Vladivostok: Dalnauka, 2001. 420 p. (In Russ.)

Czernyadjeva I.V. Mosses of the Kamchatka Peninsula. St. Petersburg: Publishing House SPbGETU «LETI», 2012. 459 p. (In Russ.)

Fedorchuk V.N., Neshataev V.Yu., Kuznetsova M.L. Forest ecosystems of the North-Western regions of Russia: typology, dynamics, economic features. Saint Petersburg, SPbFRI Publ., 2005. 382 p. (In Russ.)

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

Ignatov M.S., Afonina O.M., Ignatova E.A., Abolina A., Akatova T.V., Baisheva E.Z., Bardunov L.V., Baryakina E.A., Belkina O.A., Bezugodov A.G., Boychuk M.A., Cherdantseva V.Ya., Czernyadjeva I.V., Doroshina G.Ya., Dyachenko A.P., Fedosov V.E., Goldberg I.L., Ivanova E.I., Jukoniene I., Kannukene L., Kazanovsky S.G., Kharzinov Z.Kh., Kurbatova L.E., Maksimov A.I., Mamakulov U.K., Manakyan V.A., Maslovsky O.M., Napreenko M.G., Otnyukova T.N., Partyka L.Ya., Pisarenko O.Yu., Popova N.N., Rykovsky G.F., Tubanova D.Ya., Zheleznova G.V., Zolotov V.I. Checklist of mosses of East Europe and North Asia. *Arctoa*, 2006, vol. 15, pp. 1–130. DOI: 10.15298/arctoa.15.01

Ivanova N.S. Forest typological features of biodiversity and restoration-age dynamics of vegetation of mountain forests of the Southern and Middle Urals: Diss... Doctor of Biological Sciences. Yekaterinburg: Ural State Forest Technical University, 2019. 304 p. (In Russ.)

Kabanov N.E. Stone-birch forests in botanical, geographical and forestry relations. Moscow: Nauka, 1972. 136 p. (In Russ.)

Katenin A.E., Shamurin V.F. The recovery of some tree and shrub species in the burnt areas of the Gulf of Korf coast (the Koryak Land). *Botanicheskii zhurnal*, 1963, vol. 48, no. 9, pp. 1282–1297. (In Russ.)

Kolesnikov B.P. High-altitude vegetation of the middle Sikhote-Alin. Vladivostok: Far Eastern Publishing House, 1969. 106 p. (In Russ.)

Kolesnikov B.P. The vegetation of the Eastern slopes of the Middle Sikhote-Alin. *Transactions of Sikhote-Alin State Reserve*, 1938, vol. 1, pp. 26–206. (In Russ.)

Komarov V.L. Botanicheskii ocherk Kamchatki. *Kamchatskii sbornik*. Moscow, Leningrad, 1940, vol. 1, pp. 5–52. (In Russ.)

Kondratyuk V.I. Climate of Kamchatka. Moscow: Hydrometeoizdat, 1974. 204 p. (In Russ.)

Lipshits S.Yu., Liverovskiy Yu.A. Soil and botanical research and the problem of agriculture in the central part of the Kamchatka River Valley. *Proceedings of the Council for the study of productive forces of the USSR Academy of Sciences. Kamchatka series*. Leningrad, 1937, vol. 4, 250 p. (In Russ.)

Migunova E.S. Forest typology by G.F. Morozov – A.A. Kryudener – P.S. Pogrebnyak is theoretical basis of forestry. *Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 5, pp. 52–63. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-52-63. (In Russ.)

Nazimova D.I. On the ways of forest typology researches in Siberia in 1960s–2000s. *Botanicheskiy zhurnal*, 2022, vol. 107, no. 5, pp. 419–432. (In Russ.)

Neshataev V.Yu. The Project of the All-Russian code of phytosociological nomenclature. *Rastitel'nost' Rossii*, 2001, vol. 1, pp. 62–70. DOI: 10.31111/vegrus/2001.01.62. (In Russ.)

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

Neshataeva V.Yu. Vegetation of the South Kamchatka Nature Reserve. *Flora and vegetation of Southern Kamchatka (Proceedings of Kamchatka branch of Pacific institute of geography FEB RAS. Issue 3)*. Petropavlovsk-Kamchatsky, 2002, pp. 137–232. (In Russ.)

Neshataeva V.Yu. Ecological-phytocoenological classification of the stone birch forests in the Kamchatka Peninsula. *Rastitel'nost' Rossii*, 2004, vol. 6, pp. 54–82. DOI: 10.31111/vegrus/2004.06.54. (In Russ.)

Neshataeva V.Yu. Vegetation of the Kamchatka Peninsula. Moscow: KMK, 2009. 537 p. (In Russ.)

Neshataeva V.Yu., Korablev A.P., Neshataev V.Yu. Stone-birch forests of the southern Koryak Upland (Kamchatka Territory) at the northern limit of their range. *Botanicheskiy zhurnal*, 2016, vol. 101, no. 12, pp. 1410–1429. DOI: 10.1134/S000681361612005X (In Russ.)

Neshataeva V.Yu., Kuzmina E.Yu., Kirichenko V.E., Neshataev V.Yu., Katutin P.N. Stone-birch forests on the Govena Peninsula and Olyutorsky Gulf coast (Koryaksky District, Kamchatka Krai). *Proceedings of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences. Biogeography*, 2021, vol. 1, pp. 5–27. DOI: 10.17076/bg1248. (In Russ.)

Neshataeva V.Yu., Neshataev V.Yu., Kirichenko V.E. Vegetation cover of the North of the Koryak Region (Kamchatsky Krai) and its geobotanical subdivision. *Vestnik of Saint-Petersburg University. Earth Sciences*, 2020, vol. 65, iss. 2, pp. 395–416. DOI: 10.21638/spbu07.2020.210. (In Russ.)

Neshatayev V.Yu., Neshataeva V.Yu., Kirichenko V.E. Phytogeographical boundaries between Stone-birch and White-birch forests in the North of the Koryak Region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, iss. 574, pp. 1–10. DOI: 10.1088/1755-1315/574/1/012057

Red Data Book of Kamchatskiy Krai. Vol. 2. Plants / Chernyagina O.A. (ed.). Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatpress, 2018. 388 p. (In Russ.)

Rysin L.P. Is there a future for forest typology in Russia? *Materials of the All-Russian scientific conference with international participation «Forest resources of the*

taiga zone of Russia: problems of forest management and reforestation». Petrozavodsk, Karelian Research Centre of RAS, 2009, pp. 8–10. (In Russ.)

Shamshin V.A. Stone-birch forests of Kamchatka: biology, ecology, structure of stands. Moscow: GEOS, 1999. 170 p. (In Russ.)

Shemberg M.A. Stone birch: taxonomy, geography, variability. Novosibirsk: Nauka, 1986. 175 p. (In Russ.)

Starikov G.F. Forests of the Magadan region. Magadan: Publishing House, 1958. 223 p. (In Russ.)

Starikov G.F., Dyakonov P.N. Forests of the Kamchatka Peninsula. Khabarovsk: Publishing House, 1954. 152 p. (In Russ.)

Sukachev V.N. On the systematics of Siberian birches. *Proceedings of the Botanical Museum of the USSR Academy of Sciences*, 1911, vol. 8, pp. 203–277. (In Russ.)

Tyulina L.N. Vegetation of Western Kamchatka coast. *Proceedings of the Kamchatskii Institute of ecology and environmental management FEB RAS*. Petropavlovsk-Kamchatsky, 2001, iss. 2. 304 p. (In Russ.)

Vetrov L.S. Mathematical representation of M.M. Orlov's bonitet scale and ways of its use. *Proceedings of the St. Petersburg Scientific Research Institute of Forestry. Hydrotechnical land reclamation, forestry and environmental issues*, 1997, pp. 49–51. (In Russ.)

Vlasov S.T. Forests of Sakhalin. Yuzhno-Sakhalinsk: Publishing House, 1959. 108 p. (In Russ.)

Vorob'ev D.P. Vegetation of the Kuril Islands. Moscow, Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1963. 92 p. (In Russ.)

Yakubov V.V., Chernyagina O.A. Catalogue of Kamchatka Flora (Vascular plants). Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatpress, 2004. 165 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 14.11.2024

Нешатаев В.Ю., Скворцов К.И., Никчемный М.Е., Нешатаева В.Ю.
Типологическое разнообразие каменноберёзовых лесов на юге Корякского нагорья (Камчатский край) // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 252. С. 80–105. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.80-105

Приведена типологическая характеристика каменноберёзовых лесов (из *Betula ermanii*) юга Корякского нагорья (Камчатский край), находящихся на северной границе ареала. Даны характеристика флористического состава и структуры сообществ, условий местообитания и особенностей географического распространения. Классификация биогеоценозов проведена одновременно по признакам растительности и почв; учтены характеристики органического и органоминерального горизонтов почвы, виды-доминанты и виды-индикаторы. На территории исследований типологическое разнообразие каменноберёзовых

лесов представлено 10 ассоциациями и 3 типами леса: *Betuletum ermanii pinosum pumilae* (каменноберезняки кедровостланиковые) *Betuletum ermanii calamagrostidoso-alnosum fruticosae* (каменноберезняки вейниково-ольховниковые) и *Betuletum ermanii dryopteridosum* (каменноберезняки папоротниковые). Сообщества каменноберезняков Корякского нагорья отличаются от камчатских аналогов обеднённым флористическим составом, значительным развитием кустарникового яруса с преобладанием крупных стлаников.

Ключевые слова: *Betula ermanii*, типы леса, растительные ассоциации, виды-доминанты, виды-индикаторы.

Neshataev V.Yu., Skvortsov K.I., Nikchemny M.E., Neshataeva V.Yu. Typological diversity of stone-birch forests in the south of the Koryak Upland (Kamchatka Territory). *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 252, pp. 80–105 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.80-105

The typological characteristics of the stone birch forests (from *Betula ermanii*) of the south of the Koryak Highlands (Kamchatka Territory) located on the northern border of the range are given. The characteristic of the floral composition and structure of communities, habitat conditions and features of geographical distribution is given. The classification of biogeocenoses was carried out simultaneously on the basis of vegetation and soils; the characteristics of the organic and organo-mineral horizons of the soil, dominant species and indicator species were taken into account. In the study area, the typological diversity of stone birch forests is represented by 10 associations and 3 types of forests: *Betuletum ermanii pinosum pumilae* (stone birch forest with creeping cedar) *Betuletum ermanii calamagrostidoso-alnosum fruticosae* (stone birch forest with creeping alder), and *Betuletum ermanii dryopteridosum* (stone birch forest with fern). The stone birch forests of the Koryak Highlands differ from their Kamchatka counterparts in their depleted floral composition and significant development of the shrub layer with a predominance of large creeping shrubs.

Keywords: *Betula ermanii*, forest types, plant associations, dominant species, indicator species.

НЕШАТАЕВ Василий Юрьевич – профессор кафедры ботаники и дендрологии Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор биологических наук. SPIN-код: 9824-4614. ORCID: 0009-0005-3434-7787.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: vn1872@yandex.ru

NESHATAEV Vasily Yu. – DSc. (Biological), Professor of the Department of Botany and Dendrology, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 9824-4614. ORCID: 0009-0005-3434-7787.

194021. Institutsky per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: vn1872@yandex.ru

СКВОРЦОВ Константин Игоревич – младший научный сотрудник лаборатории общей геоботаники Ботанического института имени В.Л. Комарова РАН. SPIN-код: 2428-0554. ORCID: 0000-0001-9558-2573.

197022, ул. Профессора Попова, д. 2, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: k.i.skvortsov@yandex.ru

SKVORTSOV Konstantin I. – Junior Researcher of the Laboratory of Vegetation Science, V.L. Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences. SPIN-code: 2428-0554. ORCID: 0000-0001-9558-2573.

197022. Professor Popov str. 2. St. Petersburg. Russia. E-mail: k.i.skvortsov@yandex.ru

НИКЧЕМНЫЙ Максим Евгеньевич – старший лаборант лаборатории общей геоботаники Ботанического института имени В.Л. Комарова РАН.

197022, ул. Профессора Попова, д. 2, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: maxnikchemn@mail.ru

NIKCHEMNY Maxim E. – Senior Laboratory Assistant, of the Laboratory of Vegetation Science, V.L. Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences.

197022. Professor Popov str. 2. St. Petersburg. Russia. E-mail: maxnikchemn@mail.ru

НЕШАТАЕВА Валентина Юрьевна – главный научный сотрудник лаборатории общей геоботаники Ботанического института имени В.Л. Комарова РАН, доктор биологических наук. SPIN-код: 7179-3261. ORCID: 0000-0003-2718-3831.

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

NESHATAEVA Valentina Yu. – DSc. (Biological), Chief Researcher of the Laboratory of Vegetation Science, V.L. Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences. SPIN-code: 7179-3261. ORCID: 0000-0003-2718-3831.

197022. Professor Popov str. 2. St. Petersburg. Russia. E-mail: vneshataeva@yandex.ru

А.С. Бондаренко, А.В. Жигунов

**ВЛИЯНИЕ ГУСТОТЫ ПОСАДКИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ
СЕМЕЙ ПЛЮСОВЫХ ДЕРЕВЬЕВ
В ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ КУЛЬТУРАХ ЕЛИ ЕВРОПЕЙСКОЙ**

Введение. Основой селекционного семеноводства в Российской Федерации является массовый отбор перспективных генотипов в естественных насаждениях с последующей оценкой генетически обусловленных ценных в хозяйственном отношении качеств отобранных по фенотипу плюсовых деревьев в испытательных культурах [Тараканов и др., 2021; Раевский и др., 2022]. При этом в таких испытательных культурах оценивается как семенное потомство самих плюсовых деревьев (что достаточно трудоёмко с точки зрения практической реализации и редко применяется на практике), так и семенное потомство клонов плюсовых деревьев, представленных на лесосеменных и маточных плантациях, а также в архивах клонов плюсовых деревьев [Правила..., 2015; Бондаренко, Жигунов, 2023; Jansson et al., 2017]. Основной целью оценки семей в испытательных культурах является обнаружение среди плюсовых деревьев наиболее ценных генотипов, то есть элитных деревьев, устойчиво передающих семенному потомству наиболее важные хозяйствственные признаки. В качестве контроля (стандарта) используют семена каждой популяции, в которых отобраны испытываемые плюсовые деревья. При этом контрольной партией может являться средний образец семян производственного сбора в данной популяции или образец семян, заготовленных с 25–30 случайно отобранных в популяции деревьев. При значительном количестве плюсовых деревьев в популяции (не менее 3–5) контрольный образец семян должен представлять эту популяцию [Основные положения..., 1982]. Подготовка площади и обработка почвы производится по технологии создания лесных культур. Семенное потомство каждого плюсового дерева и контроль высаживаются (высеваются) на делянках квадратной или прямоугольной формы рядами с размещением в соответствии с технологией создания лесных культур [Правила..., 2015; Правила лесовосстановления..., 2021]. Плюсовые деревья, семенные потомства которых по результатам окончательной оценки имеют достоверно лучшие показатели по селектируемым признакам и свойствам

в сравнении с контролем, выделяются в качестве элитных. Элитные деревья используются для создания лесосеменных плантаций второго порядка [Правила..., 2015].

Несмотря на то, что параметрам густоты при создании объектов испытания обычно не придают большого значения, имеются данные, что густота посадок в испытательных культурах существенно влияет на результативность опыта по сравнительному анализу скорости роста семей, в том числе посредством влияния на высоту и диаметр ствола и их корреляции-взаимоотношения [Демиденко, Тараканов, 2008]. Так, например, в испытательных культурах ели сибирской наблюдается выраженное влияние густоты, при которой сформировались материнские деревья, на скорость роста семенных потомств. При этом авторами таких исследований формулируется вывод, что наследуется не столько быстрота роста плюсовых деревьев и популяций, сколько их реакция на условия конкурентной среды, в которой сформировалась популяция, данный конкретный древостой и плюсовые деревья в нем. На основании проведённых исследований авторы рекомендуют изначально отбирать древостои для выделения плюсовых деревьев с минимальной густотой [Рогозин, 2013]. При этом необходимо отметить, что при выявлении воздействия густоты посадки на результаты селекционных испытаний может существенно изменяться набор клонов, отбираемый для создания лесосеменных плантаций второго порядка по результатам оценки генотипов в испытательных культурах. В связи с этим с практической точки зрения важно оценить степень влияния густоты посадки деревьев в испытательных культурах на результаты оценки семей, что и является целью нашего исследования.

Материалы и методика исследования. Для достижения поставленной цели изучались следующие участки испытательных культур плюсовых деревьев ели европейской:

- Ленинградская область, Ломоносовское лесничество, Гостилицкое участковое лесничество, кв. 161, площадь 4,2 га, обследования выполнены в возрасте растений 24, 36 и 46 лет. На участке представлены 90 семей плюсовых деревьев;
- Ленинградская область, Гатчинское лесничество, Таицкое участковое лесничество, кв. 13, поле 38 (территория Гатчинской лесосеменной плантации), площадь 2,5 га, возраст растений 30, 41 год, испытывается 24 семьи плюсовых деревьев;
- Псковская область, Порховское лесничество, Порховское участковое лесничество, кв. 119, площадь 3,7 га, возраст растений 29 лет, испытывается 80 семей плюсовых деревьев.

В рамках полевых работ в посадках испытательных культур выполнена поддеревная идентификация семейственной принадлежности растений и проведено измерение диаметра ствола с точностью до 1 мм. На участках в Ломоносовском и Порховском лесничествах при закладке использована наиболее распространенная на Северо-Западе России схема смешения испытательных культур отрезками рядов, при которой каждая семья представлена в нескольких повторностях, представленных на площади участка отрезками рядов различной длины. Количество повторностей в рамках этих участков составляет от 1 до 6 шт. для различных семей плюсовых деревьев. На участке в Гатчинском лесничестве применена редко используемая в России схема смешения семей, в которой каждая семья представлена на площади отрезками по три дерева, равномерно распределенными по площади участка (так называемые малодеревные делянки). При использовании такой схемы опыта увеличивается количество повторностей опыта, приходящихся на одну семью, и повышается точность сравнения значений биометрических показателей испытываемых семей.

Поддеревная оценка скорости роста семей плюсовых деревьев выполнялась по такому признаку, как диаметр ствола дерева, поскольку высотой ствола в качестве основного измеряемого показателя имеет смысл оперировать только в сравнительно молодом возрасте древостоев (до 10–15-летнего возраста культур). При возрасте культур выше 15 лет по ряду причин, в частности, из-за объективных трудностей для адекватного измерения высот растений, в том числе по причине высокой сомкнутости крон и, как следствие, невозможности поддеревного измерения высот растений, роль основного оцениваемого признака при исследованиях переходит к диаметру ствола дерева на высоте груди [Раевский, Щурова, 2016]. Необходимо учитывать, что при использовании для определения высоты растений в насаждениях кривой высот при выполнении статистических анализов сравнения выборок и других целей исследователь, по сути, делает такие сравнения всё по той же выборке диаметров ствола, только по определённой функциональной зависимости (неважно, линейной или в виде другой математической функции), пересчитанной в значения высот. В связи с этим для лесных культур в возрасте старше 10–15 лет при выполнении статистических анализов имеет смысл использовать непосредственно измеряемый биометрический показатель, то есть диаметр ствола дерева.

С целью подбора необходимого статистического инструментария (параметрические либо непараметрические методы сравнения переменных)

для сопоставления различных групп деревьев по средним значениям изучаемых биометрических показателей (например, по среднему диаметру ствола) был выполнен анализ соответствия распределения диаметра ствола критериям нормального распределения признаков. Соответствие фактического распределения признака нормальному распределению выполнено на основе стандартного D-критерия Колмогорова-Смирнова [Боев и др., 2014; ГОСТ Р 50.1.037-2002].

При выполнении анализа по определению соответствия фактического распределения признака теоретическомуциальному распределению использовали данные по всей совокупности деревьев участка испытательных культур за исключением 5 шт. деревьев насаждения в начале и конце ряда и пяти рядов в начале и конце участка культур (с целью устранения так называемого «краевого эффекта»). При выявлении соответствия фактического распределения признака нормальному распределению количественного признака применялись классические параметрические критерии сравнения выборок на основе дисперсионного анализа [Кобзарь, 2006]. Статистические расчёты и построение графиков зависимостей выполнены с использованием программы Statistica 10 [Боровиков, 2003]. Стандартные характеристики эмпирического распределения изучаемых признаков, такие как среднее значение, стандартное отклонение, коэффициенты асимметрии и эксцесса с соответствующими ошибками этих значений были рассчитаны по общепринятым методикам.

В отношении участка испытательных культур в Ломоносовском лесничестве выполнялось поштучное разделение всех деревьев насаждения по значениям их диаметров на группы густоты. При этом учётной единицей являлись 20-метровые отрезки ряда испытательных культур. Исходная густота посадки растений на данном участке составляла 4,0 тыс.шт./га, поэтому при расстоянии между рядами, равном 2,5 м, в 20-метровом отрезке ряда в среднем содержится 20 шт. растений на момент посадки испытательных культур. Имеющееся в наличии на момент обследования количество растений в отрезке ряда при пересчёте на 1 га даёт возможность вычислить фактическую густоту для каждого учётного 20-метрового отрезка. Необходимо отметить, что в рамках одной повторности может быть представлено несколько 20-метровых отрезков (в зависимости от длины отрезка ряда для одной семьи). В дальнейшем при выполнении статистического анализа всю совокупность 20-метровых отрезков рядов данных испытательных культур группировали по шести группам фактической густоты от 1,0 до 6,0 тыс.шт./га с градацией в

1 тыс.шт./га. Превышение фактической густоты над исходной в некоторых отрезках может объясняться их малым размером (длина всего 20 м) и, как следствие, определённой степенью неравномерности посадки в каждом конкретном отрезке на территории участка (эффект исполнителя при посадке лесных культур).

С целью нивелирования влияния показателя густоты насаждения на зависимость диаметра ствола от семейственной принадлежности растений выполнен расчёт значений диаметра ствола с последующим исключением из этого значения части, которая обусловлена воздействием густоты насаждения (так называемый «анализ остатков» от линии регрессии). В качестве регрессионной функции зависимости диаметра ствола от густоты насаждения для участка испытательных культур в кв. 161 Ломоносовского лесничества используется полином третьей степени вида:

$$Y = aX^3 + bX^2 + cX + d, \quad (1)$$

где Y – диаметр ствола дерева (см); X – густота насаждения (тыс.шт./га); a , b , c и d – коэффициенты уравнения.

Далее по значениям отклонений фактических значений диаметра ствола от этой линии регрессии рассчитываются так называемые «остатки», которые и являются первичными данными для выполнения статистических тестов. В частности, по таким остаточным отклонениям значений диаметра ствола выполнен дисперсионный анализ влияния семейственной принадлежности дерева на его диаметр [Гржебовский, 2008]. Сопоставление результатов такого анализа, полученного по исходным данным, с соответствующими результатами по анализу «остатков» позволяет оценить влияние густоты на результаты селекционной оценки генотипов в опыте.

Результаты исследования. В рамках исследования производилась оценка влияния густоты закладки лесных культур на значение диаметра ствола. При этом в первую очередь для определения возможности применения параметрических методов сравнения средних значений признака (например, при сравнении значений биометрических показателей, относящихся к различным группам густоты насаждения) выполнен анализ соответствия распределения изучаемого признака классическому нормальному распределению. Такой анализ соответствия фактического распределения теоретическому выполнен на основе применения D-критерия Колмогорова-Смирнова.

При этом для повышения качества выполнения оценки соответствия фактического распределения теоретическому (нормальному) в анализ не включали крайние деревья по периметру насаждения для устранения влияния на распределение так называемого краевого эффекта. По результатам выполненного анализа построена гистограмма распределения деревьев на участке по диаметру ствола (рис. 1).

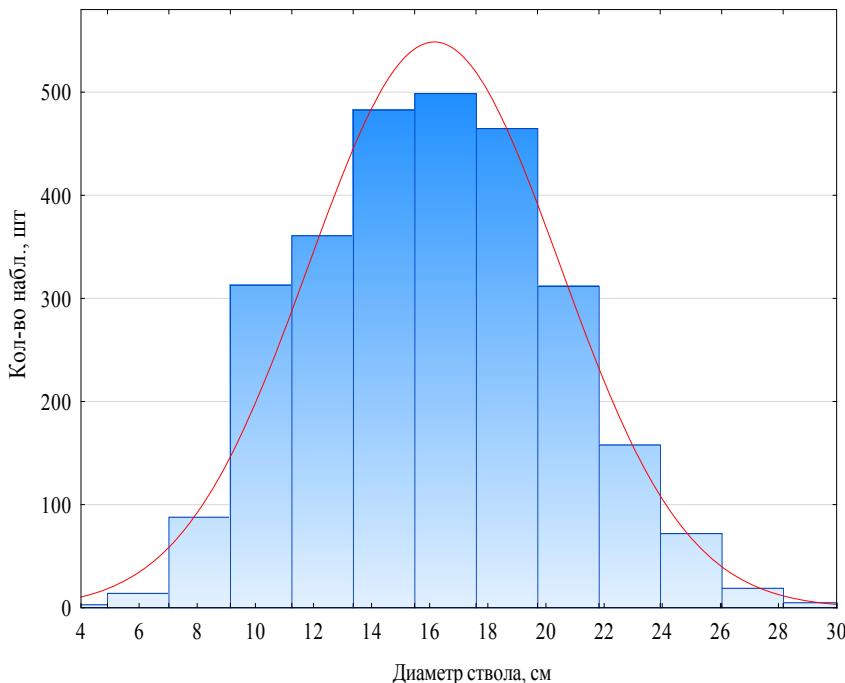


Рис. 1. Гистограмма распределения деревьев по диаметру ствола на участке испытательных культур ели европейской в возрасте 36 лет

(Ленинградская область, Ломоносовское лесничество,

Гостилицкое участковое лесничество, кв. 161)

(—) – нормальное распределение

Fig. 1. Histogram of trunk diameter distribution in European spruce progeny test

(Leningrad Region, Lomonosovskoye forestry,

Gostilitskoe district forestry, q. 161, age 36 years)

(—) – normal distribution

Как показали расчёты критерия Колмогорова-Смирнова, данное распределение признака соответствует нормальному распределению на уровне значимости 0,05, что позволяет в дальнейших статистических анализах использовать классические статистические методы сравнения выборок, в частности, дисперсионный анализ.

При оценке роста, развития и сохранности семей плюсовых деревьев в испытательных культурах всю совокупность семей плюсовых деревьев разделили на три практически равные по числу семей группы по значению диаметра ствола и оценили полученные различия приведённых групп по параметрам густоты и сохранности растений. Результаты таких расчётов приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Основные показатели роста и сохранности растений
в группах семей по скорости роста
(Гостилицкое участковое лесничество, кв. 161, возраст 36 лет)**

**Main indicators of growth and preservation of plants in groups of families
by growth rate (Gostilitskoye district forestry, q. 161, age 36 years)**

Группа семей	Диаметр, см	Высота, м	Сохранность, %	Густота, шт./га
Отстающие в росте (28 шт. семей)	$15,3 \pm 0,09$	$18,3 \pm 0,03$	$50,2 \pm 0,29$	$2010 \pm 11,6$
Средние (29 шт. семей)	$16,2 \pm 0,09$	$18,7 \pm 0,03$	$49,1 \pm 0,25$	$1965 \pm 10,1$
Быстрорастущие (28 шт. семей)	$17,3 \pm 0,11$	$19,1 \pm 0,04$	$41,3 \pm 0,28$	$1653 \pm 11,3$
Всего по участку (85 шт. семей)	$16,2 \pm 0,06$	$18,7 \pm 0,02$	$46,9 \pm 0,16$	$1874 \pm 6,4$

В соответствии с полученными данными скорость роста и густота (сохранность) посадок имеют разнонаправленную динамику: при переходе от медленнорастущей группы к быстрорастущей с повышением значений основных биометрических показателей сохранность и густота посадок закономерно снижаются. При этом если рассматривать подобные зависимости по семьям плюсовых деревьев, то такие закономерности не просматриваются: в разных группах по скорости роста наблюдаются совершенно разные по уровню сохранности и густоты семьи плюсовых деревьев (табл. 2; в целях экономии места приведены только пять семей в рамках каждой из групп семей по скорости роста).

Таблица 2

Показатели роста и сохранности растений в рамках отдельных семей плюсовых деревьев (Гостилицкое участковое лесничество, кв. 161, возраст 36 лет)

Indicators of growth and preservation of plants within individual families of plus trees (Gostilitskoye district forestry, q. 161, age 36 years)

Семья плюсового дерева	Диаметр, см	Высота, м	Сохранность, %	Густота, шт./га
Отстающие по скорости роста				
205	14,3 ± 0,35	18,0 ± 0,13	63,1 ± 0,58	2524 ± 23
	14,9 ± 0,32	18,2 ± 0,12	44,9 ± 0,55	1795 ± 22
185	15,2 ± 0,44	18,3 ± 0,16	65,1 ± 0,52	2604 ± 21
	15,4 ± 0,37	18,4 ± 0,14	54,0 ± 0,61	2161 ± 24
121	15,6 ± 0,43	18,5 ± 0,16	72,0 ± 0,63	2878 ± 25
Средние				
06 02	15,7 ± 0,35	18,5 ± 0,13	59,8 ± 0,43	2392 ± 17
274	15,9 ± 0,37	18,6 ± 0,14	41,5 ± 0,62	1661 ± 25
83	16,2 ± 0,78	18,7 ± 0,29	40,2 ± 0,56	1609 ± 22
69	16,4 ± 0,43	18,8 ± 0,16	40,7 ± 0,35	1629 ± 14
51	16,6 ± 0,38	18,8 ± 0,14	53,5 ± 0,65	2141 ± 26
Быстрорастущие				
175	16,7 ± 0,8	18,9 ± 0,3	18,5 ± 0,69	740 ± 28
	17 ± 0,46	19,0 ± 0,17	56,0 ± 1,02	2238 ± 41
220	17,1 ± 1,29	19,0 ± 0,48	27,9 ± 0,74	1114 ± 29
310	17,4 ± 0,55	19,1 ± 0,21	49,5 ± 0,54	1980 ± 22
	18,7 ± 0,97	19,6 ± 0,36	32,5 ± 1,17	1300 ± 47
Всего	16,2 ± 0,06	18,7 ± 0,02	46,9 ± 0,16	1874 ± 6

В первую очередь при выполнении исследований оценили, насколько сильно в опыте по испытанию генотипов различаются семьи плюсовых деревьев по скорости роста в общей совокупности (без учёта влияния уровня густоты посадки в рамках насаждения). Для этого был определен уровень различий между семьями по значению среднего диаметра ствола растений на основе дисперсионного анализа. Исследование показало, что в рамках всех совокупностей семей участков испытательных культур наблюдаются

достоверные различия между семьями плюсовых деревьев по значению изучаемого признака (диаметр ствола). Для различных участков испытательных культур значение F-критерия Фишера дисперсионного анализа составляет для диаметра ствола от 2,11 (участок испытательных культур в Тацком участковом лесничестве) до 4,19 (участок испытательных культур в Порховском участковом лесничестве). Все расчётные значения данного критерия достоверны на уровне значимости 5% ($p < 0,05$). Таким образом, на всех участках испытательных культур наблюдаются достоверные различия между семьями по среднему значению диаметра ствола. При этом наблюдается определённая динамика уровня различий между семьями в процессе роста и развития насаждений. Так, например, на участке испытательных культур в Гостилицком участковом лесничестве в возрасте 24 лет достоверность различий между семьями по диаметру ствола высока ($F = 6,73$, $p < 0,001$), к возрасту смыкания и интенсивной конкуренции (36 лет) при общем достоверном различии между семьями уровень значимости различий между семьями несколько снижается, хотя и остаётся в высокой степени достоверным ($F = 2,97$, $p < 0,001$), а при дальнейшем росте и развитии насаждения после окончания интенсивных процессов самоизреживания насаждения (возраст 46 лет) – снова закономерно увеличивается ($F = 4,90$, $p < 0,001$). Такое наблюдение подтверждает наши предположения о некотором снижении уровня различий между семьями в возрасте высокой интенсивности конкуренции. На другом участке испытательных культур ели европейской (Тацкое участковое лесничество) также наблюдается увеличение значения F-критерия Фишера. При этом следует отметить, что в возрасте 30 лет для результатов дисперсионного анализа значение F-критерия различий между семьями по диаметру ствола на данном участке недостоверно на уровне значимости 5% ($F = 1,50$, $p = 0,06$), в то время как к возрасту 41 год значение F-критерия различий между семьями по диаметру ствола возрастает и становится достоверным ($F = 2,11$, $p = 0,002$). Таким образом, генетические факторы (семейственная принадлежность дерева) оказывают статистически достоверное влияние на скорость роста деревьев ели европейской для всех изученных участков испытательных культур по крайней мере с середины второго класса возраста (30 лет для хвойных).

При определении влияния густоты насаждения на проявление признаков продуктивности в первую очередь оценили, насколько сильно фактическая густота в испытательных культурах (в качестве учётной единицы при расчёте текущей густоты испытательных культур использованы 20-метровые отрезки ряда) влияет на значение биометрического показателя (диаметр ствола дерева). Результаты таких расчётов взаимосвязи между густотой посадки испытательных культур и диаметром ствола деревьев показали, что для всех изученных участков достоверное влияние густоты насаждения на диаметр ствола деревьев обнаружено не было.

тельных культур и диаметром ствола деревьев в испытательных культурах ели европейской приведены на рис. 2. В соответствии с результатами непараметрического дисперсионного анализа различия между приведенными на рисунке шестью группами густоты (от 1,0 до 6,0 тыс. шт./га) достоверны (дисперсионный анализ, $F = 17,85$, $p < 0,001$).

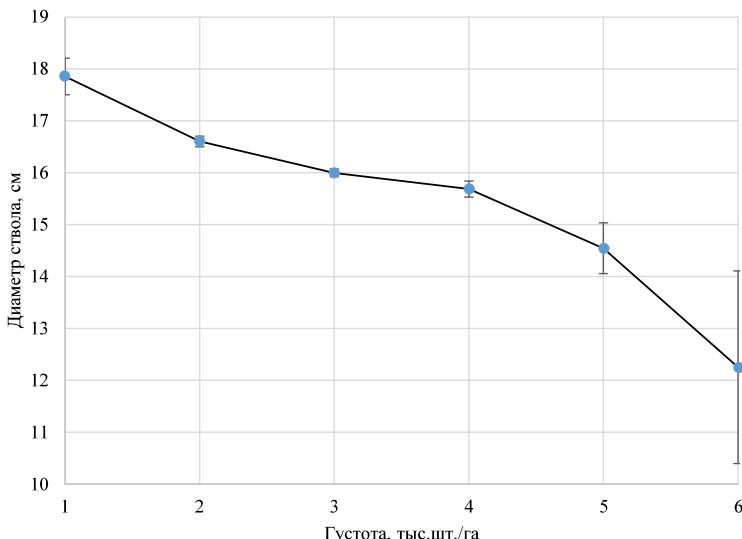


Рис. 2. Зависимость диаметра ствола дерева (среднее значение \pm ошибка среднего значения) от текущей густоты в испытательных культурах ели европейской (Ленинградская область, Ломоносовское лесничество, Гостилицкое участковое лесничество, кв. 161, возраст 36 лет)

Fig. 2. Dependence of tree trunk diameter (mean \pm error) on the current density in test cultures of European spruce (Leningrad Region, Lomonosovskoye forestry, Gostilitskoye district forestry, q. 161, age 36 years)

Приведённая на графике обратная зависимость среднего значения диаметра ствола дерева от густоты насаждения в испытательных культурах ели европейской описывается полиномиальной функцией вида

$$y = -0,1147x^3 + 1,0728x^2 - 3,7029x + 20,607. \quad (2)$$

С целью нивелирования влияния показателя густоты насаждения на зависимость диаметра ствола от семейственной принадлежности растений выполнен расчёт значений диаметра ствола с последующим исключением из этого значения части, которая обусловлена воздействием густоты насаждения (так называемый «анализ остатков» от линии регрессии). В качестве регрес-

сионной функции зависимости диаметра ствола от густоты насаждения для участка испытательных культур в кв. 161 Ломоносовского лесничества используется полином третьей степени, приведённый выше. По остаточным значениям диаметра ствола выполнен непараметрический тест Крускала-Уоллеса для оценки уровня влияния семейственной принадлежности дерева на диаметр его ствола. Полученные результаты сходны с результатами анализа, проведенного по значениям диаметра. В частности, F-критерий дисперсионного анализа различий между семьями составил $F = 3,09$ при уровне значимости $p < 0,001$ при анализе «остатков» (то есть при исключении фактора «густота») и $2,97$ также при $p < 0,001$ по результатам дисперсионного анализа, выполненного по исходным значениям диаметра ствола по тем же семьям плюсовых деревьев. Таким образом, в соответствии с результатами исследования различия в густоте насаждения не оказывают значимого влияния на уровень зависимости диаметра от семейственной принадлежности дерева и при исследовании влияния генетических факторов на проявление такого признака, как диаметр ствола, различие между насаждениями по уровню густоты в опытах по испытанию семей может не учитываться.

Принимая во внимание выявленные достоверные различия между семьями по скорости роста, оценили, насколько сильно влияют различия по густоте насаждений в выделенных отрезках рядов испытательных культур на показатели достоверности различий между семьями по скорости роста. Для этого разделили всю совокупность деревьев участка на две группы, отличающиеся по уровню фактической густоты на момент исследования. Первая группа – отрезки ряда испытательных культур такой же фиксированной длины 20 м с густотой менее 2 тыс. шт./га, во вторую группу вошли отрезки рядов посадок исследуемого участка испытательных культур с фактической густотой свыше 2 тыс. шт./га. Далее определяли уровень различий между семьями по значению диаметра ствола раздельно по каждой из этих групп густоты насаждения. В соответствии с результатами дисперсионного анализа различия между семьями в пределах обеих групп густоты достоверны. В частности, в группе с густотой посадки менее 2 тыс. шт./га значение F-критерия составило $H = 2,22$ при уровне значимости $p < 0,001$, а в группе густоты свыше 2 тыс.шт./га значение данного показателя равно $2,42$ ($p < 0,001$). Таким образом, в обеих рассмотренных группах фактической густоты влияние генетического фактора (семейственная принадлежность) на значение диаметра ствола дерева сопоставимо и достоверно на высоком уровне значимости.

Для выявления возможных взаимодействий между генетическими факторами и параметрами густоты насаждения анализировали обратную

вышеописанной картину, а именно уровень различий между семьями по среднему значению густоты насаждения. В соответствии с результатами дисперсионного анализа семьи на изученном участке испытательных культур ели европейской (Гостилицкое участковое лесничество) достоверно различаются по средней густоте насаждения ($F = 2,97$, $p < 0,001$). В качестве иллюстрации приведённого уровня различий между семьями плюсовых деревьев участка испытательных культур (Гостилицкое участковое лесничество) в возрасте 36 лет на рис. 3 приведены средние значения фактической густоты с соответствующими показателями варьирования для отрезков ряда, представляющих отдельные семьи. В качестве учётной единицы использованы те же описанные ранее отрезки ряда длиной 20 м, семьи плюсовых деревьев для графика отобраны произвольно по принципу представленности наиболее широкого спектра средних значений диаметра ствола и упорядочены по возрастанию средней густоты.

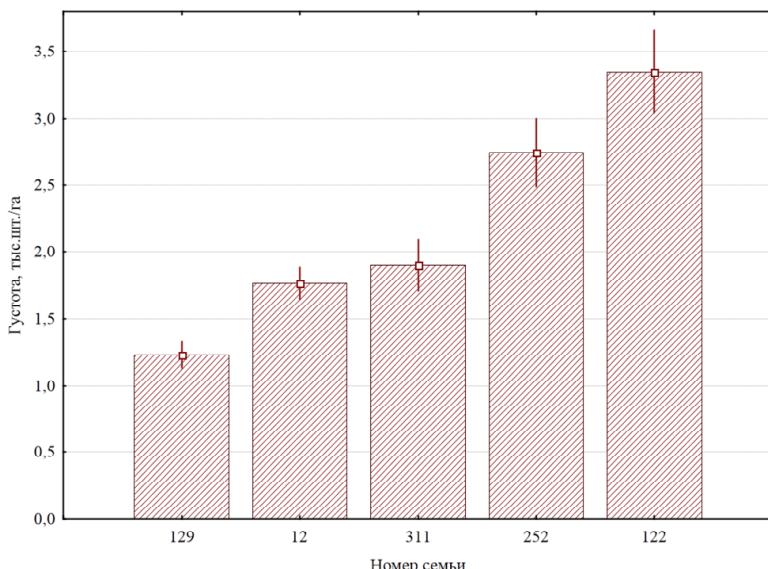


Рис. 3. Различия между отдельными семьями плюсовых деревьев ели европейской по густоте (среднее значение ± ошибка среднего значения) в пределах одного участка испытательных культур (Ленинградская область, Ломоносовское лесничество, Гостилицкое участковое лесничество, кв. 161, возраст 36 лет)

Fig. 3. Differences between individual families of European spruce plus trees in density (mean value ± error of the mean value) within one plot of test cultures (Leningrad Region, Lomonosovskoye forestry, Gostilitskoye district forestry, q. 161, age 36 years)

В связи с тем, что наблюдается достоверное влияние как генетических факторов (семейственная принадлежность растений), так и показателей густоты насаждения на скорость роста деревьев ели европейской по диаметру, была выполнена оценка возможного совместного влияния этих факторов на проявление изучаемого признака (взаимодействие по типу «генотип-среда»). С этой целью было отобрано 12 семей плюсовых деревьев, характеризующихся достаточно большим количеством растений в пределах каждой из групп. При этом в рамках каждой группы густоты насчитывалось от 32 до 109 шт. растений для каждой из семей плюсовых деревьев. Повторностей (отрезков рядов испытательных культур) насчитывалось от 1 до 5 шт. в пределах одной группы густоты. По результатам двухфакторного дисперсионного анализа получено достоверное влияние на значение диаметра ствола как семейственной принадлежности дерева ($F = 4,79, p < 0,01$), так и густоты насаждения ($F = 9,55, p < 0,01$). Совместное влияние этих факторов также достоверно на уровне значимости 5% ($F = 1,92, p = 0,03$), что подтверждает разную реакцию генотипов на изменчивость параметра густоты насаждения. Так, например, семья 08/02 в группе густоты до 2,0 тыс.шт./га имеет средний диаметр $19,2 \pm 1,04$ см, а при густоте выше 2,0 тыс.шт./га её диаметр достоверно ниже и составляет $15,9 \pm 0,65$ см. Семья 274 демонстрирует несколько иную картину, а именно: в группе густоты до 2,0 тыс.шт./га имеет средний диаметр $15,7 \pm 0,43$ см, а при густоте выше 2,0 тыс.шт./га диаметр этой семьи плюсового дерева несколько выше – $16,7 \pm 0,69$ см. Тем не менее, следует отметить, что значимость взаимодействия «густота-семейственная принадлежность» зависит от используемого для подобного анализа набора семей плюсовых деревьев. Использование разных наборов семей даёт как достоверные, так и недостоверные результаты оценки взаимодействия «генотип-среда» по результатам дисперсионного анализа. Очевидно, что в исследованиях по оценке результатов испытания семенного потомства плюсовых деревьев необходимо по возможности учитывать фактор совместного влияния генетических факторов и густоты насаждения на проявление признаков продуктивности.

Заключение. Выполненные исследования по оценке влияния густоты посадки семей плюсовых деревьев в испытательных культурах позволяют сделать следующие выводы:

1. Фактическое распределение диаметра ствола достоверно отличается от классического нормального распределения признаков, в особенности на

крайних (минимум и максимум) ступенях толщины. Отклонение от нормального распределения характеризуется выраженной правосторонней асимметричностью. Расчётное значение коэффициента эксцесса для наблюдаемой совокупности достоверно не отличается от нормального распределения признака;

2. Наблюдаются достоверные различия между семьями плюсовых деревьев по значениям диаметра ствола дерева;

3. Значение показателя достоверности различий между семьями снижается в возрасте смыкания и интенсивной конкуренции насаждений, оставаясь, тем не менее, в границах сохранения достоверных значений. Дальнейший рост и развитие насаждений после окончания интенсивных процессов самоизреживания насаждения (начала второго класса возраста) приводит к повторному увеличению различий между семьями плюсовых деревьев;

4. Генетические факторы (семейственная принадлежность дерева) оказывают статистически достоверное влияние на скорость роста деревьев ели европейской по крайней мере от начала второго класса возраста (20 лет для хвойных) вплоть до возраста окончательной оценки семей плюсовых деревьев в испытательных культурах (40 лет);

5. Выявлена обратная взаимосвязь скорости роста растений в испытательных культурах с параметрами густоты и сохранности насаждения. При этом имеет место сильная межсемейная изменчивость густоты в рамках групп скорости роста;

6. Влияние текущей густоты насаждения на средний диаметр ствола в испытательных культурах ели европейской имеет вид обратной зависимости (при повышении текущей густоты древостоя средний диаметр ствола закономерно снижается);

7. Получены данные о статистической достоверности совместного влияния густоты насаждения и семейственной принадлежности дерева на диаметр ствола. Уровень такого совместного влияния типа «генотип-среда» на диаметр ствола дерева зависит от используемого для анализа набора семей плюсовых деревьев;

8. Скорость роста и густота (сохранность) посадок имеют разноправленную динамику: при переходе от медленнорастущей группы к быстрорастущей с повышением значений основных биометрических показателей сохранность и густота посадок закономерно снижаются.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Бондаренко А.С., Жигунов А.В. Сравнительная оценка плюсовых деревьев ели европейской на основе анализа динамики рангового положения их семененного потомства в испытательных культурах // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. Вып. 243. С. 68–85.

Боев В.М., Борщук Е.Л., Екимов А.К., Бегун Д.Н. Руководство по обеспечению решения медико-биологических задач с применением программы Statistica 10.0. Оренбург: ОАО «ИПК «Южный Урал», 2014. 208 с.

Боровиков В.П. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: Для профессионалов. 2-е изд. СПб.: Питер, 2003. 688 с.

Гржисовский А.М. Анализ трех и более независимых групп количественных данных // Экология человека. 2008. № 3. С. 50–58.

ГОСТ Р 50.1.037-2002 Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Часть II. Непараметрические критерии. М.: Госстандарт России, 2002. 66 с.

Демиденко В.П., Тараканов В.В. Сравнительная оценка интенсивности роста 20-летних потомств плюсовых деревьев сосны в Новосибирской области // Лесное хозяйство. 2008. № 5. С. 36–37.

Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. М.: Физматлит, 2006. 468 с.

Основные положения методики закладки испытательных культур плюсовых деревьев основных лесообразующих пород / Государственный комитет СССР по лесному хозяйству, Центральный научно-исследовательский институт лесной генетики и селекции. Воронеж: Изд-во газеты «Коммуна», 1982. 9 с.

Правила лесовосстановления. Утверждены приказом Минприроды России от 29 декабря 2021 г. № 1024.

Правила создания и выделения объектов лесного семеноводства (лесосеменных плантаций, постоянных лесосеменных участков и подобных объектов). Утверждены приказом Минприроды России от 20 октября 2015 г. № 438. М., 2016. 18 с.

Раевский Б.В., Щурова М.Л. Методика селекционно-генетической оценки клонов сосны обыкновенной на лесосеменных плантациях // Сибирский лесной журнал. 2016. № 5. С. 91–98.

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.

Рогозин М.В. Рост потомства ели сибирской в густых и редких испытательных культурах // Хвойные бореальной зоны. 2013. Т. 30, № 1–2. С. 112–115.

Тараканов В.В., Паленова М.М., Паркина О.В., Роговцев Р.В., Третьякова Р.А. Лесная селекция в России: достижения, проблемы, приоритеты (обзор) // Лесохозяйственная информация. 2021. № 1. С. 100–143.

Jansson G., Hansen J.K., Haapanen M., Kvaalen H., Steffenrem A. The genetic and economic gains from forest tree breeding programmes in Scandinavia and Finland // Scandinavian journal of forest research. 2017. Vol. 32, no. 4. P. 273–286.

References

- Boev V.M., Borshchuk E.L., Ekimov A.K., Begun D.N. Rukovodstvo po obespecheniyu resheniya mediko-biologicheskikh zadach s primeneniem programmy Statistica 10.0. [Guidelines for ensuring the solution of biomedical problems using the Statistica 10.0 program]. Orenburg: OAO «IPK «Yuhnyj Ural», 2014. 208 p. (In Russ.)
- Bondarenko A.S., Zhigunov A.V. Comparative assessment of Norway spruce plus trees based on the analysis of the rank dynamics of their seed progeny in progeny tests. Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii, 2023, iss. 243, pp. 68–85. (In Russ.)
- Borovikov V.P. STATISTICA. Iskusstvo analiza dannyh na komp'yutere: Dlya professionalov. 2-e izd. [STATISTICA. The art of data analysis on a computer: For professionals. 2nd ed.] St. Petersburg: Piter, 2003. 688 p. (In Russ.)
- Demidenko V.P., Tarakanov V.V. Comparative assessment of the growth intensity of 20-year old offspring of pinus plus trees in the Novosibirsk region. Forestry, 2008, no. 5, pp. 36–37. (In Russ.)
- GOST R 50.1.037-2002. Prikladnaya statistika. Pravila proverki soglasiya opytnogo raspredeleniya s teoreticheskim. CHast' II. Neparametricheskie kriterii (GOST R 50.1.037-2002 Applied statistics. Rules for verifying the agreement of the experimental distribution with the theoretical one. Part II. Nonparametric criteria.). M.: Gosstandart of Russia, 2002. 66 p. (In Russ.)
- Grzhibovskiy A.M. Analiz trekh i bol'se nezavisimykh grupp kolichestvennykh dannykh [Analysis of three or more independent groups of quantitative data]. Human ecology, 2008, no. 3, pp. 50–58. (In Russ.)
- Jansson G., Hansen J.K., Haapanen M., Kvaalen H., Steffenrem A. The genetic and economic gains from forest tree breeding programmes in Scandinavia and Finland. Scandinavian journal of forest research, 2017, vol. 32, no. 4, pp. 273–286.
- Kobzar' A.I. Prikladnaya matematicheskaya statistika [Applied mathematical statistics]. Moscow: Fizmatlit, 2006. 468 p. (In Russ.)
- Osnovnye polozheniya metodiki zakladki ispytatel'nykh kul'tur plusovykh derev'ev osnovnykh lesobrazuyushchikh porod [The main provisions of the methodology for foundation of progeny tests for the main forest tree species]. Voronezh: Izd-vo gazety «Kommuna», 1982. 18 p. (In Russ.)
- Pravila lesovosstanovleniya (The reforestation rules): utv. prikazom Minprirody Rossii ot 29 dekabrya 2021g. No. 1024. (In Russ.)
- Pravila sozdaniya i vydeleniya ob'yektov lesnogo semenovodstva (lesosemennykh plantaciy, postoyannykh lesosemennykh uchastkov i podobnykh ob'yektov) [Rules for

the creation of forest seed production objects (seed orchards, permanent forest seed stands and others)]. Approved by Order of Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation, 20.10.2015, No. 438, Moscow, 2016. 18 p. (In Russ.)

Raevskiy B.V., Shchurova M.L. Metodika selektsionno-geneticheskoy otsenki klonov sosny obyknovennoy na lesosemennykh plantatsiyakh [The Method For Breeding and genetic assessment of scotch pine clones at forest seed orchards]. *Siberian forest journal*, 2016, no. 5, pp. 91–98. (In Russ.)

Raevskiy B.V., Ignatenko R.V., Novichonok E.V., Prokopiuk V.M., Kuklina K.K. The Current State of Conifer Species Breeding and Seed Production. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 6, pp. 9–37. (In Russ.)

Rogozin M.V. Potomstvo eli sibirskoy v ispytatel'nykh kul'turakh raznoy gustoty [The offspring of *Picea sibirica* in progeny test of different densities] *Coniferous boreal zone*, 2013, vol. 30, no. 1–2, pp. 112–115. (In Russ.)

Tarakanov V.V., Palenova M.M., Parkina O.V., Rogovtsev R.V., Tretyakova R.A. Forest Selective Breeding in Russia: Achievements, Challenges, Priorities (Overview). *Forestry information*, 2021, no. 1, pp. 100–143. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 11.11.2024

Бондаренко А.С., Жигунов А.В. Влияние густоты посадки деревьев на результаты оценки семей в испытательных культурах ели европейской // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 252. С. 106–124. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.106-124

По результатам исследований в испытательных культурах плюсовых деревьев ели европейской 30–40-летнего возраста получены данные о влиянии густоты насаждения на эффективность сравнительной оценки семей плюсовых деревьев. Отмечена обратная зависимость густоты древостоя от среднего диаметра ствола насаждения. При этом густота насаждения не оказывает достоверного влияния на уровень зависимости диаметра от семейственной принадлежности дерева и значимо не влияет на результаты сравнительной оценки скорости роста семей плюсовых деревьев в испытательных культурах. Совместное влияние густоты насаждения и семейственной принадлежности растений на скорость роста статистически недостоверно, что подтверждает возможность выполнения анализа влияния семейственной принадлежности и густоты насаждения на биометрические показатели раздельно, без учёта их совместного влияния. Вариация густоты в рамках участка испытательных культур не влияет на результаты оценки уровня достоверности различий между семьями. Фактическое распределение диаметра ствола достоверно отличается от классического нормального распределения признака. Значение показателя достоверности различий между семьями снижается в возрасте смыкания и

интенсивной конкуренции насаждений, оставаясь, тем не менее, в границах сохранения достоверных значений. Дальнейший рост и развитие насаждений после окончания интенсивных процессов самоизреживания насаждения (начало второго класса возраста) приводит к повторному увеличению различий между семьями плюсовых деревьев. Генетические факторы (семейственная принадлежность дерева) оказывают статистически достоверное влияние на скорость роста деревьев ели европейской по крайней мере от начала второго класса возраста (20 лет для хвойных) вплоть до возраста окончательной оценки семей плюсовых деревьев в испытательных культурах (40 лет).

Ключевые слова: испытательные культуры, семенное потомство, семья плюсового дерева, густота, скорость роста, оценка.

Bondarenko A.S., Zhigunov A.V. Influence of tree density on the results of evaluating families of plus trees in the progeny tests of Norway spruce. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 252, pp. 106–124 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.106-124

Based on the results of studies in test cultures of 30–40-year-old Norway spruce plus trees, data on the influence of plantation density on the efficiency of comparative evaluation of families of plus trees were obtained. The inverse dependence of stand density on the average trunk diameter of the plantation was observed. At the same time, the density of the plantation does not have a significant effect on the level of diameter dependence on the family affiliation of the tree and does not significantly affect the results of comparative assessment of the growth rate of families of plus-trees in the progeny tests. The joint effect of planting density and plant family affiliation on growth rate is statistically insignificant, which confirms the possibility of analyzing the effect of plant family affiliation and planting density on biometric indices separately, without taking into account their joint influence. The actual distribution of trunk diameter is significantly different from the classical normal distribution of the trait. The value of the index of reliability of differences between families decreases at the age of bowing and intensive competition of plantations, remaining, nevertheless, within the limits of preservation of reliable values. Further growth and development of plantations after the end of intensive processes of self-expiration of the plantation (beginning of the second age class) leads to a repeated increase in differences between families of plus-trees. The influence of genetic factors (tree family identity) has a statistically significant effect on the growth rate of Norway spruce trees from at least the beginning of the second age class (20 years for conifers) up to the age of final evaluation of plus-tree families in progeny tests (40 years).

Keywords: progeny test, seed progeny, progeny tests, planting density, comparative assessment, growth rate.

БОНДАРЕНКО Александр Сергеевич – ведущий научный сотрудник лаборатории научно-исследовательского отдела селекции, воспроизводства и химического ухода за лесом Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 3074-7219. ORCID: 0000-0002-2773-8254.

194021, Институтский пр., д. 21, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: asbond@mail.ru

BONDARENKO Aleksandr S. – PhD (Agriculture), Leading Researcher at the Laboratory of the Scientific Research Department of breeding, reproduction and chemical care of the forest, Saint Petersburg State Forestry Research Institute. SPIN-code: 3074-7219. ORCID: 0000-0002-2773-8254.

194021. Institutsky av. 21. St. Petersburg. Russia. E-mail: asbond@mail.ru

ЖИГУНОВ Анатолий Васильевич – профессор кафедры лесных культур Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 6704-5792. ORCID: 0000-0001-8707-7526.

194024, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: a.zhigunov@bk.ru

ZHIGUNOV Anatoliy V. – DSc (Agriculture), Professor of the Department of Forest Crops, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 6704-5792. ORCID: 0000-0001-8707-7526.

194024. Institutsky per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: a.zhigunov@bk.ru

**Минь Ань Хоанг, А.В. Грязькин, Н.В. Беляева, Л.К. Волдаев,
Джонас Комауз**

**СЫРЬЕВЫЕ РАСТЕНИЯ ПОД ПОЛОГОМ ЕЛЬНИКОВ
ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ**

Введение. Интерес к недревесным ресурсам леса возрастает во всём мире, что можно объяснить особой ценностью экологически чистой продукции, получаемой в лесных экосистемах. Многие научные журналы публикуют материалы по массовому использованию разнообразной продукции леса [Павлов, 2010; Беляева и др., 2012; Самсонова и др., 2019; Грязькин и др., 2020; Доан Тхи Нга, Нешатаев, 2022; Lung, 2001; Boxall et al., 2003; Mahapatra, Tewari, 2005; Nygren et al., 2006; Scott et al., 2006; Ponocná et al., 2016; Enescu, 2017; Cioacă, Enescu, 2018; Gryazkin et al., 2019; Doan Thi Nga et al., 2021].

Основная часть публикаций по указанной теме посвящена лекарственным растениям и медоносам [Самсонова и др., 2019; Грязькин и др., 2020; Чан Чунг Тхань и др., 2020; Доан Тхи Нга, Нешатаев, 2022; Хоанг Минь Ань и др., 2024; Global..., 2001; World..., 2003; Nygren et al., 2006; Tjoelker et al., 2007; Enescu, 2017; Enescu et al., 2018; Gryazkin et al., 2019; Doan Thi Nga et al., 2021].

Ельники в лесном фонде РФ являются одной из основных формаций таёжной зоны [Грязькин и др., 2022; Государственная..., 2024; Tjoelker et al., 2007; Ponocná et al., 2016]. Ресурсный потенциал ельников пока не оценён [Грязькин и др., 2020; Чан Чунг Тхань и др., 2020; Хоанг Минь Ань, 2024].

Цель работы – определение видового состава и обилия сырьевых растений под пологом ельников на примере Ленинградской области.

Материалы и методика исследования. В качестве объектов исследования были выбраны ельник кисличного, черничного и долгомошного типов леса в нескольких лесничествах Ленинградской области.

Оценка обилия ресурсных видов проводилась на круговых учетных площадках радиусом 1,785 м по оригинальной методике [Грязькин, 1997; Грязькин и др., 2020, 2022]. На каждом опытном участке было заложено не менее 30 учетных площадок. На каждой учетной площадке учитывали все

виды в составе живого напочвенного покрова, подроста и подлеска с определением встречаемости и проективного покрытия.

Для сравнения видового состава растительности на объектах исследования использовали коэффициент общности видов (коэффициент Жаккара).

В табл. 1 представлены основные таксационные характеристики ельников на объектах исследования.

Таблица 1

Таксационная характеристика древостоев на объектах исследования

Characteristics of the forest stands on the objects of study

Номер объекта	Состав древостоя, %	Аср, лет	Тип леса	Сомкнутость крон, %	Всего дер-ев, экз./га	Кол-во ели, экз./га
1	67E31Б1Oc1C	133	Екис	72	488	405
4	78E11C10Б1Oc	85	Екис	77	788	690
5	89E8C3Б	95	Екис	86	855	804
6	51E27Б17C5Oc	130	Екис	68	570	422
7	85E11Б3C1Олс	115	Ечер	85	926	852
8	58E31Б8Oc3C	120	Ечер	63	593	445
9	86E7Б4Oc2C1Олс	108	Ечер	87	783	736
10	59E30C6Олс4Б	130	Едол	82	586	481
11	64E21Б8Олс7C	130	Едол	66	518	386
12	73E17Б8Oc2C	90	Едол	70	610	525
13	72E20C8Б	80	Екис	73	745	583
14	76E16C7Б1Олс	75	Екис	98	1120	896
15	79E12Б9C	90	Екис	89	1085	855
16	66E27Б7C	80	Ечер	79	880	757
17	67E19Б9Олс5C	80	Ечер	77	824	667
18	78E12Б10C	85	Ечер	94	1005	883

Примечание: Объекты № 2 и 3 были разрушены сильными ветровалами

Из данных, представленных в табл. 1, видно, что состав древостоя слабо зависит от типа леса. Основные различия связаны с участием ольхи серой в составе древостоев на влажных и переувлажненных почвах – в ельниках черничных и ельниках долгомошных.

Результаты исследования. Ельники, в отличие от фитоценозов с преобладанием в составе древостоев других лесообразующих пород, характеризуются особым видовым составом растительности нижних ярусов фитоценоза. Основное отличие состоит в доминировании теневыносливых видов не только в составе живого напочвенного покрова, но также в составе подроста и подлеска.

В зависимости от типа леса видовой состав, встречаемость, проективное покрытие и фитомасса растений в живом напочвенном покрове ельников изменяются в широких пределах. Видовое разнообразие и обилие подполовой растительности зависит также от таксационных характеристик древостоев и от лесорастительных условий в целом.

Под пологом ельников подрост представлен небольшим количеством видов. Варьирование состава и численности подроста в пределах отдельно взятого типа леса незначительное. Во всех случаях преобладает подрост ели. Примесь березы, осины, ольхи и сосны появляется в конкретном типе леса и всегда в небольшом количестве. Максимальная численность подроста в ельнике кисличном – 1933 экз./га, в ельнике черничном – 4241 экз./га, в ельнике долгомошном – 3817 экз./га.

Подлесок, как и подрост, является постоянным структурным элементом ельников. Видовой состав этого компонента леса разнообразен и зависит как от условий места произрастания, так и от характеристик древостоя. Чаще всего, независимо от типа леса, в подлеске доминируют рябина обыкновенная и крушина ломкая. Участие других видов менее выражено, некоторые виды не всегда представлены в составе подлеска. В зависимости от типа леса состав и численность подлесочных пород изменяются существенным образом – от 320 до 2977 экз./га в ельнике кисличном, от 910 до 2700 экз./га в ельнике черничном и от 430 до 612 экз./га в ельнике долгомошном.

Состав травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов под пологом ельников имеет свои особенности. Они состоят в ограниченном количестве видов в составе живого напочвенного покрова и в преобладании теневыносливых видов.

В составе живого напочвенного покрова встречается большое количество видов, имеющих сырьевое значение. Количество и обилие таких видов зависит, главным образом, от типа леса. Под пологом ельников кисличного типа леса выявлено от 24 до 29 видов сосудистых растений. В ельниках кисличного типа леса преобладающими видами являются вейник наземный, земляника лесная, кислица обыкновенная, майник двулистный, щитовник

игольчатый. В ельниках долгомошных к таким видам относятся вербейник обыкновенный, кукушкин лён, купырь лесной, хвощ лесной. Коэффициент Жаккара в целом для ельников кисличных – ельников долгомошных составляет 0,37. Для ельников черничных – ельников долгомошных коэффициент общности видов равен 0,48. Для ельников кисличных – ельников черничных величина коэффициента Жаккара составляет 0,68.

Величина проективного покрытия практически не зависит от величины встречаемости конкретного вида растения. В первую очередь это относится к таежному мелкотравью. Установлено, что при встречаемости 90–100% проективное покрытие таких видов как майник двулистный, ожика волосистая составляет всего около 1%.

В табл. 3 представлены данные по величине проективного покрытия для каждого вида, выявленного в составе живого напочвенного покрова под пологом ельников в зависимости от типа леса.

Таблица 3

Видовой состав и проективное покрытие растений под пологом ельников по типам леса

Species composition and projective cover of plants under the canopy of spruce forests by forest types

Название вида	Екис	Ечер	Едол
Брусника (<i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.)	2,8–7,2	3,3–9,0	0,8–1,3
Бодяк разнолистный (<i>Cirsium heterophyllum</i> (L.) Hill)	1,0–2,0	4,1–5,1	0,1
Вейник наземный (<i>Calamagrostis epigeios</i> (L.) Roth)	4,2–11,7	4,0–7,2	0
Вейник тростниковидный (<i>Calamagrostis arundinacea</i> (L.) Roth)	0	0–1,2	7,7–14,1
Вербейник обыкновенный (<i>Lysimachia vulgaris</i> L.)	0	0–1,7	4,7–8,8
Вереск обыкновенный (<i>Calluna vulgaris</i> (L.) Hull)	0–0,1	0–0,1	0,1–0,3
Ветреница дубравная (<i>Anemone nemorosa</i> L.)	0,3–0,9	0	0
Голокучник обыкновенный (<i>Gymnocarpium dryopteris</i> (L.) Newman)	1,0–4,5	0	0
Грушанка малая (<i>Pyrola minor</i> L.)	0–1,9	0	0
Дудник лесной (<i>Angelica sylvestris</i> L.)	0–0,1	0,3–1,1	0–0,7
Звездчатка ланцетовидная (<i>Stellaria holostea</i> L.)	1,8–3,1	0,7–3,3	0–1,1
Звездчатка дубравная (<i>Stellaria nemorum</i> L.)	1,7–1,9	0	0
Зелёные мхи (Bryidae spp.)	7,0–11,3	14,0–19,8	4,1–5,6

Окончание табл. 3

Название вида	Екис	Ечер	Едол
Земляника лесная (<i>Fragaria vesca</i> L.)	1,2–1,4	1,0–1,1	0
Золотарник обыкновенный (<i>Solidago virgaurea</i> L.)	0,2–0,7	0,3–1,8	0
Иван-чай (<i>Chamaenerion angustifolium</i> (L.) Scop.)	0,1–1,1	0–0,2	0–0,1
Кислица обыкновенная (<i>Oxalis acetosella</i> L.)	23,6–34,1	3,7–9,6	0,1
Костяника каменистая (<i>Rubus saxatilis</i> L.)	0,6–1,5	2,3–3,7	0
Кукушкин лен (<i>Polytrichum commune</i> Hedw.)	0–0,2	0–2,8	12,5–21,3
Купырь лесной (<i>Anthriscus sylvestris</i> (L.) Hoffm.)	0–1,1	0,9–3,1	0,8–4,4
Ландыш майский (<i>Convallaria majalis</i> L.)	0,1–1,1	0–0,3	0
Луговик извилистый (<i>Avenella flexuosa</i> (L.) Drejer)	3,3–7,2	2,0–4,9	0
Луговик дернистый (<i>Deschampsia cespitosa</i> (L.) P. Beauv.)	0,9–2,2	5,1–7,3	0–6,9
Майник двулистный (<i>Maianthemum bifolium</i> (L.) F.W. Schmidt)	1,3–2,0	1,1–1,9	0,1
Малина (<i>Rubus idaeus</i> L.)	1,0–4,7	0–2,1	0
Марьянник лесной (<i>Melampyrum sylvaticum</i> L.)	0–0,7	0	0
Ожика волосистая (<i>Luzula pilosa</i> (L.) Willd.)	1,0–1,3	1,4–2,0	0,2
Орляк обыкновенный (<i>Pteridium aquilinum</i> (L.) Kuhn)	0–3,3	0–1,0	0
Седмичник европейский (<i>Trientalis europaea</i> L.)	0,9–1,2	1,7–2,8	3,7–4,1
Скерда болотная (<i>Crepis paludosa</i> (L.) Moench)	0	0,1–0,8	0,5–1,2
Сныть обыкновенная (<i>Aegopodium podagraria</i> L.)	0–2,7	0	0
Сфагnumы (<i>Sphagnum</i> spp.)	0	0,8–1,0	18,4–29,8
Хвощ лесной (<i>Equisetum sylvaticum</i> L.)	0–0,3	3,1–8,2	7,1–15,4
Черника (<i>Vaccinium myrtillus</i> L.)	8,8–11,0	12,8–17,0	1,1–5,8
Чина весенняя (<i>Lathyrus vernus</i> (L.) Bernh.)	0,1–0,2	0–0,7	0
Щитовник игольчатый (<i>Dryopteris carthusiana</i> (Vill.) H.P. Fuchs)	4,6–12,0	6,7–8,0	1,0–3,4

Участие каждого вида в составе живого напочвенного покрова зависит главным образом от типа леса и характеристик верхнего яруса фитоценоза. Густота и состав древостоя, сомкнутость крон и другие характеристики во многом определяют условия для роста и развития растительности нижних ярусов, включая и живой напочвенный покров (табл. 4).

Таблица 4

**Зависимость количества видов в составе живого напочвенного покрова
от основных таксационных характеристик ельников**

**Dependence of the number of species in the living ground cover
on the main taxation characteristics of spruce forests**

Номер объекта	Тип леса	Общее кол. деревьев, экз./га	Сомкнутость крон, %	Численность подроста, экз./га	Численность подлеска, экз./га	Количество видов в живом напочвенном покрове
Ельники кисличные						
1	Екис	488	72	1348	2977	32
4	Екис	788	77	1727	2177	29
5	Екис	655	86	241	3670	31
6	Екис	570	68	1432	1422	32
13	Екис	745	73	1933	1397	28
14	Екис	1120	98	425	692	24
15	Екис	1085	89	980	320	26
Ельники черничные						
7	Ечеп	926	85	992	1070	20
8	Ечеп	593	63	4241	1662	25
9	Ечеп	783	87	937	910	23
16	Ечеп	880	79	1248	1008	21
17	Ечеп	824	77	2108	2700	20
18	Ечеп	1005	94	680	1100	18
Ельники долгомошные						
10	Едол	586	82	1130	612	17
11	Едол	518	66	3817	430	18
12	Едол	610	70	2216	580	18

На основе данных, представленных в табл. 4, можно сделать вывод, что в зависимости от типа леса видовой состав живого напочвенного покрова различается существенным образом. Под пологом ельников кисличного типа леса в составе живого напочвенного покрова было выявлено от 24 до 32 видов. Под пологом ельников черничного типа леса – от 18 до 25 видов. Минимум видов выявлено под пологом ельников долгомошного типа леса – всего 17–18 видов. При этом коэффициент Жаккара показывает, что общее количество видов в

представленных типах ельников составляет от 37% (ельник кисличный – ельник долгомошный) до 68% (ельник кисличный – ельник черничный).

В зависимости от типа леса к растениям, имеющим ресурсное значение, относится от 6 до 20 видов, т. е. 30–70% от общего количества видов на лесном участке.

В табл. 5 ресурсные виды растений распределены по хозяйственному назначению. Преобладают медоносы и лекарственные растения. Доля кормовых и технических растений минимальна независимо от типа леса.

Таблица 5

**Распределение растений, произрастающих под пологом ельников
на объектах исследования по сырьевым группам**

**Distribution of plants growing under the canopy of spruce forests
at the research sites by raw material groups**

Номер объекта	Сыревые группы растений				
	пищевые	лекарственные	медоносы	технические	кормовые
Ельники кисличные					
1	8	11	18	5	8
4	7	10	16	5	5
5	8	10	18	6	7
6	9	11	19	7	8
13	7	9	17	5	7
14	5	5	11	4	5
15	3	4	8	2	5
Ельники черничные					
7	6	8	10	4	3
8	7	9	11	5	5
9	7	8	11	4	5
16	7	9	11	5	5
17	6	8	10	5	4
18	6	8	9	4	4
Ельники долгомошные					
10	3	4	10	3	4
11	4	4	10	4	4
12	3	4	11	4	4

Большинство видов являются полиресурсными, поэтому общее количество видов в составе живого напочвенного покрова не совпадает с общим количеством ресурсных видов по сырьевым группам. Один и тот же вид может относиться и к медоносным растениям, и к пищевым, и к лекарственным и т. д. Видов с узкой «специализацией» в лесных экосистемах минимальное количество, главным образом это кормовые и технические растения.

Обсуждение. По мнению абсолютного большинства исследователей, значение лесных ресурсов трудно переоценить [Павлов, 2010; Грязькин и др., 2020; Lung, 2001; Boxall et al., 2003; Mahapatra, Tewari, 2005; Nygren et al., 2006; Scott et al., 2006; Enescu, 2017; Cioacă, Enescu, 2018; Gryazkin et al., 2019].

Натуральная продукция лесного фонда любой страны – кладовая с огромным запасом самых разнообразных продуктов [Павлов, 2010; Грязькин и др., 2020; Чан Чунг Тхань и др., 2020; Хоанг Минь Ань и др., 2024; Global..., 2001; Lung, 2001; World..., 2003; Mahapatra, Tewari, 2005; Nygren et al., 2006; Scott et al., 2006; Enescu, 2017; Enescu et al., 2018; Cioacă, Enescu, 2018; Gryazkin et al., 2019].

Особенность такой продукции состоит в том, что она экологически чистая и самое главное – самовозобновляемая [Павлов, 2010; Грязькин и др., 2020, 2024; Nygren et al., 2006; Enescu, 2017; Cioacă, Enescu, 2018; Gryazkin et al., 2019]. Самовозобновление ресурсов леса происходит, как правило, без участия человека.

Заключение. В зависимости от типа леса количество видов в составе живого напочвенного покрова изменяется в широких пределах – от 24–32 в ельниках кисличного типа до 17–18 видов в ельниках долгомошных. Обилие вида и видовое разнообразие во многом зависят и от таксационных характеристик древостоя: чем выше густота древостоя и сомкнутость крон, тем меньше видов под пологом ельников.

Доля сырьевых видов растений от общего количества видов сосудистых растений составляет от 30 до 70% в зависимости от типа леса. Распределение растений по сырьевым группам в определённой степени зависит от типа леса. Под пологом ельников преобладают лекарственные растения и медоносы. Кормовые и технические растения представлены минимально.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Беляева Н.В., Грязькин А.В., Кази И.А. Влияние выборочных рубок на развитие нижних ярусов растительности // Лесной вестник. 2012. № 3. С. 32–41.
- Государственная инвентаризация лесов. Центральный ФО // Рослесинфорт. URL: <https://roslesinforg.ru/services/gil/tsentralnyy-fo/> (дата обращения: 15.05.2024).
- Грязькин А.В. Патент RU 2084129 «Способ учета подроста». Опубл. 20.07.97. Бюлл. № 20.
- Грязькин А.В., Сырников И.А., Прокофьев А.Н. Урожайность промысловых видов растений под пологом древостоев // Лесотехнический журнал. 2020. № 2. С. 8–14.
- Грязькин А.В., Беляева Н.В., Хоанг Минь Ань, Волдаев Л.К., Лапшина К.И. Ресурсы ельников. Свидетельство о регистрации базы данных № 2022623133 28.11.2022. Заявка № 2022623040 от 16.11.2022.
- 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
- Морозова О.В., Семенищенков Ю.А., Тихонова Е.В., Беляева Н.Г., Кожевникова М.В., Черненъкова Т.В. Неморальнотравные ельники Европейской России // Растительность России. 2017. № 31. С. 33–58. DOI: 10.31111/vegrus/2017.31.33.
- Павлов Ю.В. Закономерности изменения урожайности растительного сырья в связи с трансформацией лесных земель (на примере Ленинградской области): автореф. дис. канд. с.-х. наук. СПб.: СПбГЛТУ, 2010. 19 с.
- Самсонова И.Д., Нешатаев В.Ю., До Van Тхао, Нгуен Тхи Зыонг Экологобиологический анализ медоносов березняков // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2019. Вып. 229. С. 104–117.
- Хоанг Минь Ань, Грязькин А.В., Калайджян Р.Л., Балковский Р.А., Волдаев Л.К. Количественные характеристики полезных растений в ельниках Охтинского лесничества // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 249. С. 152–165. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.152-165
- Чан Чунг Тхань, Грязькин А.В., Беляева Н.В., Кази И.А., Беспалова В.В., Сырников И.А. Сравнительная оценка структуры и запасов древесных и недревесных ресурсов березняков и ельников // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020. № 233. С. 19–38.
- Boxall P.C., Murray G., Unterschultz J.R., Boxall P.C. 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.
- Cioacă L., Enescu C.M. What is the potential of Tulcea County as regards the non-wood forest products? // Current Trends in Natural Sciences. 2018. Vol.7, iss.13. P. 30–37.
- Enescu C.M. Which are the most important non-wood forest products in case of Ialomița County? // AgroLife Scientific Journal. 2017. Vol. 6, iss. 1. P. 98–103.

Enescu C.M., Dincă L., Crișan V. The most important non-wood forest products from Prahova County // *Revista Pădurilor*. 2018. Vol. 1. P. 45–51.

Global Forest Resources Assessment 2000: main report. Rome: FAO, 2001. 479 p.

Gryazkin A., Bespalova V., Samsonova I., Belyaeva N. Potential reserves and development of non-wood forest resources // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. № 316. DOI: 10.1088/1755-1315/316/1/012007

Doan Thi Nga, Neshataev V.Yu. Assessment of reserves of medicinal plants in the forests of the Leningrad region // News of the St. Petersburg Forestry Academy. 2022. Iss. 240. P. 99–111. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.240.99-111

Lung N.N. The status of forest resources in Vietnam: matter of environment, economy, society and resolutions // Journal of Agriculture and Rural Development. 2001. № 12. P. 891–893.

Mahapatra A.K., Tewari D.D. Importance of non-timber forest products in the economic valuation of dry deciduous forests of India // Forest Policy and Economics. 2005. Vol. 7, iss. 3. P. 455–467.

Nygren A., Lacuna-Richman C., Keinänen K., Alsa L. Ecological, Socio-Cultural, Economic and Political Factors Influencing the Contribution of NonTimber Forest Products: Case Studies from Honduras and the Philippines // Small-scale Forest Economics, Management and Policy. 2006. Vol. 5, iss. 2. P. 249–269.

Ponocná T., Spytk B., Kaczka R., Büntgen U., Treml V. Growth trends and climate responses of Norway spruce along elevational gradients in East-Central Europe // Trees. 2016. № 30. P. 1633–1646.

Scott D.A., Burger J.A., Crane B. Expanding site productivity research to sustain non-timber forest functions // Forest Ecology and Management. 2006. Vol. 227, iss 1–2. P. 185–192.

Strengthening global part to advance sustainable development of non-wood forest products: World Forestry Congress side event // Frontline Express. 2003. Bulletin № 28.

Thi Nga Doan, Neshataev V.Yu., Neshataeva V.Yu. Dynamics of medical plants in the course of regeneration successions after clear cutting // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 876. P. 012023. DOI: 10.1088/1755-1315/876/1/012023

Tjoelker M.G., Boratyński A., Bugala W. Biology and Ecology of Norway Spruce // Forestry Sciences. Springer Netherlands, 2007. Vol. 78. 474 p.

References

Belyaeva N.V., Gryazkin A.V., Kazi I.A. Effect of selective logging on the development of lower vegetation layers. *Forestry Bulletin*, 2012, no. 3, pp. 32–41. (In Russ.)

Boxall P.C., Murray G., Unterschultz J.R., Boxall P.C. 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.

Chan Chung Thanh, Gryazkin A.V., Belyaeva N.V., Kazi I.A., Bespalova V.V., Syrnikov I.A. Comparative assessment of the structure and reserves of wood and non-wood resources of birch and spruce forests. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2020, iss. 233, pp. 19–38. (In Russ.)

Cioacă L., Enescu C.M. What is the potential of Tulcea County as regards the non-wood forest products? *Current Trends in Natural Sciences*, 2018, vol. 7, iss. 13, pp. 30–37.

Enescu C.M. Which are the most important non-wood forest products in case of Ialomița County? *AgroLife Scientific Journal*, 2017, vol. 6, iss. 1, pp. 98–103.

Enescu C.M., Dincă L., Crișan V. The most important non-wood forest products from Prahova County. *Revista Pădurilor*, 2018, vol. 1, pp. 45–51.

Global Forest Resources Assessment 2000: main report. Rome: FAO, 2001. 479 p.

Gryazkin A.V. Patent No. 2084129 «Method for accounting of undergrowth». Published 20.07.97. Bulletin No. 20. (In Russ.)

Gryazkin A., Bespalova V., Samsonova I., Belyaeva N. Potential reserves and development of non-wood forest resources. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, no. 316. DOI: 10.1088/1755-1315/316/1/012007

Gryazkin A.V., Syrnikov I.A., Prokofyev A.N. Productivity of commercial plant species under the canopy of tree stands. *Forestry journal*, 2020, no. 2, pp. 8–14. (In Russ.)

Gryazkin A.V., Belyaeva N.V., Hoang M.A., Voldaev L.K., Lapshina K.I. Spruce forest resources. Database registration certificate No. 2022623133 dated 28.11.2022. Application No. 2022623040 dated 16.11.2022. (In Russ.)

Hoang Minh Anh, Gryazkin A.V., Kalaydzhyan R.L., Balkovskiy R.A., Voldaev L.K. Quantitative characteristics of useful plants in spruce forests of the Okhtinsky forestry. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 247, pp. 28–45. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.152-165. (In Russ.)

Lung N.N. The status of forest resources in Vietnam: matter of environment, economy, society and resolutions. *Journal of Agriculture and Rural Development*, 2001, no. 12, pp. 891–893.

Mahapatra A.K., Tewari D.D. Importance of non-timber forest products in the economic valuation of dry deciduous forests of India. *Forest Policy and Economics*, 2005, vol. 7, iss. 3, pp. 455–467.

Morozova O.V., Semenishchenkov Yu.A., Tikhonova E.V., Belyaeva N.G., Kozhevnikova M.V., Chernenkova T.V. Nemoral grass spruce forests of European Russia. *Vegetation of Russia*, 2017, no. 31, pp. 33–58. DOI: 10.31111/vegrus/2017.31.33. (In Russ.)

Nygren A., Lacuna-Richman C., Keinänen K., Alsa L. Ecological, Socio-Cultural, Economic and Political Factors Influencing the Contribution of NonTimber Forest Products: Case Studies from Honduras and the Philippines. *Small-scale Forest Economics, Management and Policy*, 2006, vol. 5, iss. 2, pp. 249–269.

Pavlov Yu.V. Patterns of change in the yield of plant materials in connection with the transformation of forest lands (on the example of the Leningrad region): author's

abstract. Dis. Candidate of Agricultural Sciences. St. Petersburg: St. Petersburg State Forest Technical University, 2010. 19 p. (In Russ.)

Ponocná T., Spytk R., Kaczka R., Büntgen U., Tremel V. Growth trends and climate responses of Norway spruce along elevational gradients in East-Central Europe. *Trees*, 2016, no. 30, pp. 1633–1646.

Samsonova I.D., Neshataev V.Yu., Do Van Thao, Nguyen Thi Zyong. Ecological and biological analysis of honey plants in birch forests. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2019, iss. 229, pp. 104–117. (In Russ.)

Scott D.A., Burger J.A., Crane B. Expanding site productivity research to sustain non-timber forest functions. *Forest Ecology and Management*, 2006, vol. 227, iss. 1–2, pp. 185–192.

State forest inventory. Central Federal District. Roslesinorg. URL: <https://roslesinorg.ru/services/gil/tsentralnyy-fo/> (accessed May 15, 2024). (In Russ.)

Strengthening global part to advance sustainable development of non-wood forest products: World Forestry Congress (WFC) side event. *Frontline Express*, 2003, bulletin no. 28.

Thi Nga Doan, Neshataev V.Yu., Neshataeva V.Yu. Dynamics of medical plants in the course of regeneration successions after clear cutting. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 876, p. 012023. DOI: 10.1088/1755-1315/876/1/012023. (In Russ.)

Tjoelker M.G., Boratyński A., Bugała W. Biology and Ecology of Norway Spruce. *Forestry Sciences*, Springer Netherlands, 2007, vol. 78, 474 p.

Материал поступил в редакцию 15.06.2024

Хоанг Минь Ань, Грязькин А.В., Беляева Н.В., Волдаев Л.К., Комауэ Джонас. Сырьевые растения под пологом ельников Ленинградской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 252. С. 125–139. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.125-139

Представлены данные по видовому составу и обилию сырьевых растений, произрастающих под пологом ельников. Объект исследования – ельники разных типов леса на территории Ленинградской области. Таксация древостоев осуществлена по общепринятой методике. Доля ели в составе древостоев варьирует от 51 до 89%. Максимальная численность подроста в ельнике кисличном составляет 1933 экз./га, в ельнике черничном – 4241 экз./га, в ельнике долгомошном – 3817 экз./га. Численность подлесочных пород – от 320 до 2977 экз./га в ельнике кисличном, от 910 до 2700 экз./га в ельнике черничном и от 430 до 612 экз./га в ельнике долгомошном. Видовой состав, встречаемость и проективное покрытие растений в составе живого напочвенного покрова определены на круговых учетных площадках по оригинальной методике. На

каждом объекте исследования было заложено не менее 30 учетных площадок по 10 м². Кроме травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов учитывалось количество подроста и подлеска по породам, а также структура по высоте. Сравнение видового состава живого напочвенного покрова осуществлялось с использованием коэффициента Жаккара. Больше всего сырьевых видов в составе травостоя выявлено под пологом ельника кисличного – от 24 до 29. Коэффициент Жаккара в целом для ельников кисличных – ельников долгомошных составляет 0,37, т.е. количество общих видов в указанных типах ельников составляет 37%. Для ельников черничных – ельников долгомошных коэффициент общности видов равен 0,48. Для ельников кисличных – ельников черничных величина коэффициента Жаккара составляет 0,68. В составе живого напочвенного покрова под пологом ельников встречаются растения из всех сырьевых групп. Преобладают, независимо от типа леса, медоносы и лекарственные растения. Полученные результаты можно использовать для корректировки нормативной документации по лесопользованию и внедрять в учебные программы лесного профиля.

Ключевые слова: Ленинградская область, ельники, сырьевые растения, видовой состав.

Minh Anh Hoang, Gryazkin A.V., Belyaeva N.V., Voldaev L.K., Komaue D.
Raw plants under the canopy of spruce forests in the Leningrad region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 252, pp. 125–139 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.125-139

The article presents data on the species composition and abundance of raw materials growing under the canopy of spruce forests. The object of the study is spruce forests of different forest types in the Leningrad Region. The taxation of tree stands was carried out using the generally accepted method. The share of spruce in the composition of tree stands varies from 51 to 89%. The maximum number of undergrowth in the wood sorrel spruce forest is 1933 specimens/ha, in the bilberry spruce forest – 4241 specimens/ha and in the long-moss spruce forest – 3817 specimens/ha. The number of undergrowth species ranges from 320 to 2977 specimens/ha in the wood sorrel spruce forest, from 910 to 2700 specimens/ha in the bilberry spruce forest and from 430 to 612 specimens/ha in the long-moss spruce forest. The species composition, occurrence and projective cover of plants in the living ground cover were determined on circular survey plots using an original technique. At least 30 survey plots of 10 m² were laid out at each study site. In addition to the grass-dwarf shrub and moss-lichen layers, the amount of undergrowth and undergrowth by species, as well as the height structure, were taken into account. The species composition of the living ground cover was compared using the Jaccard coefficient. The largest number of raw material species in the herbage was found under the canopy of wood sorrel spruce – from 24 to 29. The Jaccard coefficient as a whole for wood sorrel spruce forests – long-moss spruce forests is 0.37, i.e. the number of common

species in the specified types of spruce forests is 37%. For bilberry spruce forests – long-moss spruce forests, the coefficient of community of species is 0.48. For wood sorrel spruce forests – bilberry spruce forests, the value of the Jaccard coefficient is 0.68. In the composition of the living ground cover under the canopy of spruce forests, plants from all raw material groups are found. Honey plants and medicinal plants predominate, regardless of the forest type. The results obtained can be used to adjust regulatory documentation on forest use and introduced into forestry training programs.

Keywords: Leningrad region, spruce forests, raw material plants, species composition.

ХОАНГ Минь Ань – аспирант кафедры лесоводства Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. Researcher ID: ABB-5138-2021. ORCID: 0000-0003-3025-803X.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: minhahanh_hoang@outlook.com

HOANG Minh Anh – PhD Student of the Forestry Department, St.Petersburg State Forest Technical University. Researcher ID: ABB-5138-2021. ORCID: 0000-0003-3025-803X.

194021. Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: minhahanh_hoang@outlook.com

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

194024, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: lesovod@bk.ru

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

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

БЕЛИЕВА Наталия Валерьевна – профессор кафедры лесоводства Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 4243-6810. Researcher ID: W-2629-2017. ORCID: 0000-0001-8673-2824. SCOPUS Author ID: 57204295205.

194024, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: galbel06@mail.ru

BELYAEVA Natalia V. – DSc (Agriculture), Professor of the Department of Forestry of the St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 4243-6810. Researcher ID: W-2629-2017. ORCID: 0000-0001-8673-2824. SCOPUS Author ID: 57204295205.

194021. Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: galbel06@mail.ru

ВОЛДАЕВ Леонид Константинович – магистрант кафедры лесоводства Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 6864-0225. Researcher ID: LXW-8471-2024. ORCID: 0009-0005-9196-4191. SCOPUS Author ID: 1222541.

194024, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: voldaev01@list.ru

VOLDAEV Leonid K. – master's student of the Forestry Department, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 6864-0225. Researcher ID: LXW-8471-2024. ORCID: 0009-0005-9196-4191. SCOPUS Author ID: 1222541.

194021. Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: voldaev01@list.ru

KOMAUЭ Джонас – магистрант кафедры лесоводства Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 6864-0225. ORCID: 0000-0003-3047-4250.

194024, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: thanh.tt@rcfee.org.vn

KOMAUE D. – master's student of the Forestry Department, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 6864-0225. ORCID: 0000-0003-3047-4250.

194021. Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: thanh.tt@rcfee.org.vn

Е.В. Лисотова, Л.Н. Сунцова, Е.М. Иншаков

**ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ
НА МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ
ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ В УСЛОВИЯХ Г. КРАСНОЯРСКА**

Введение. Красноярск – крупнейший индустриальный центр, для которого актуальнейшей проблемой является высокий уровень загрязнения воздушной среды стационарными и подвижными источниками. Эмиссии от стационарных источников составляют в среднем 58% суммарных выбросов загрязняющих веществ в год; около 42% вносит автотранспорт, численность которого в городе постоянно растет. Красноярск регулярно входит в список городов РФ с «очень высоким» (ИЗА5>14) или «высоким» (ИЗА5 = 7–13) уровнем загрязнения атмосферы [Государственный..., 2021]. Аккумуляции загрязняющих веществ в атмосфере Красноярска способствует ряд специфических природно-климатических факторов. Территория Красноярска имеет сложный рельеф, город разместился в глубокой котловине, укрытой от ветров хребтами Саянских гор, что способствует слабой вентиляции городского пространства и, как следствие, низкой рассеивающей способности атмосферы, что приводит к накоплению в ней поллютантов. В период неблагоприятных метеорологических условий Красноярск накрывает «шапкой» едкого смога, и проблема экологической безопасности населения становится видна невооруженным глазом. Среди мер, направленных на стабилизацию экологической обстановки Красноярска, важное значение отводится мероприятиям по созданию рациональной системы озеленения, в частности, подбору устойчивого ассортимента древесных растений для создания искусственных насаждений [Протопопов, 1982; Протопопова, 1987; Авдеева, 2000; Коропачинский, Лоскутов, 2014]. С этой точки зрения изучение особенностей жизнедеятельности растений в условиях урбанизированных территорий городов Средней Сибири является весьма актуальным.

Одним из интегральных показателей, отражающих жизненное состояние растительности, является интенсивность вегетативного роста. К числу доступных, легко воспроизводимых и информативных показателей роста и развития растений относят морфометрические показатели побегов и ассимиляционного аппарата растений [Николаевский, 2002; Неверова, Колмогорова, 2002]. Показано, что у растений, произрастающих в условиях атмосфер-

ного загрязнения, одним из проявлений общей ответной реакции фотосинтетического аппарата является ксерофитизация ассимиляционных органов [Николаевский, 2002; Колмогорова, 2016]. На органогенном уровне явление ксероморфоза проявляется в уменьшении размеров листьев, их утолщении, уменьшении размеров всех тканей листа, увеличении количества устьиц на 1 мм² и пр., на организменном – в изменении структуры, форм и размеров кроны, показателей прироста в высоту и по диаметру, интенсивности побегообразования и пр. [Неверова, Колмогорова, 2003; Сунцова, Иншаков, 2007; Бухарина и др., 2012; Колмогорова, 2013; Виноградова, 2016]. Меньшая функциональная активность ассимиляционного аппарата приводит к снижению продуктивности городских зеленых насаждений и в определенной мере служит причиной их угнетенного роста и преждевременного старения. Важно отметить, что упомянутые исследования не дают универсальную картину влияния городской среды, с ее комплексным воздействием как климатических условий, так и совокупности техногенных загрязнителей на жизнедеятельность древесных растений. Требуется научно обоснованный подход к ассортименту растений, пригодных для озеленения г. Красноярска и городов Средней Сибири. Для этого необходимо обладать достаточной информацией об эколого-физиологическом состоянии древесных растений, позволяющей оценить функциональный вклад каждого вида в изменение качества среды в направлении ее улучшения. Отдельные аспекты влияния техногенной среды на процессы роста и развития древесных растений в условиях г. Красноярска изучались в ряде работ [Авдеева, 2000; Павлов, 2006; Ставникова, Степень, 2008; Пирогова и др., 2009; Степень и др., 2013], но особенности состояния ассимиляционного аппарата растений остаются недостаточно изученными и требуют детальной проработки.

Цель исследования – изучение морфометрических параметров годичных побегов некоторых видов лиственных пород в урбанизированной среде г. Красноярска.

В последние десятилетия в озеленении Красноярска наиболее интенсивно используются такие древесные растения, как береза повислая *Betula pendula* Roth, липа мелколистная *Tilia cordata* Mill., черемуха Маака *Padus maackii* (Rupr.) Kom. и яблоня ягодная *Malus baccata* (L.) Borkh. [Сунцова и др., 2010], поэтому задачей исследования являлась сравнительная оценка их устойчивости к негативному влиянию урбосреды г. Красноярска.

Материалы и методика исследования. Объектами исследования служили виды как местной – береза повислая *Betula pendula* и яблоня ягодная *Malus baccata*, – так и интродуцированной флоры – липа мелколистная *Tilia cordata* и черемуха Маака *Padus maackii* – в составе городских насаждений, расположенных

женных в разных районах города: Октябрьском, Советском, Ленинском, Центральном – и относящихся к двум категориям функционального назначения – общего пользования (ЦПКиО им. М. Горького, парк «Троя», парк «Гвардейский», сквер «Космонавтов», сквер «Семейный») и специального назначения (на проспектах Мира, Свободном и им. газеты «Красноярский рабочий»). Зоной условного контроля служили насаждения, произрастающие в благоприятных условиях с незначительным техногенным воздействием (Дендрарий Института леса СО РАН). Исследования проводились в период 2017–2020 гг. Для характеристики эколого-физиологических показателей древесных растений на пробных площадях было выбрано по 10 модельных деревьев исследуемых видов. Учетные деревья представлены одновозрастными для каждого вида растениями в средневозрастном генеративном состоянии (g2). В целом наблюдали более 360 модельных деревьев. Сбор материала для лабораторных исследований осуществлялся следующим образом: у каждого модельного дерева с южной стороны средней части кроны срезалось по 5 годичных побегов. С каждого годичного побега для исследования отбиралось необходимое количество листьев. Биометрический способ оценки состояния деревьев предусматривал измерение: 1 – размеров годичных отрезков боковых побегов; 2 – количества листьев на годичных отрезках боковых побегов; 3 – сырого и абсолютно сухого веса листьев годичных отрезков боковых побегов; 4 – площади листьев на годичных отрезках боковых побегов. Весь полученный фактический материал был обработан методами математической статистики с использованием программы Microsoft Office Excel 2007 [Шмидт, 1984; Доспехов, 1985].

Результаты исследования. Все исследованные территории по степени антропогенного влияния были поделены нами на две категории – с высокой степенью воздействия (насаждения магистралей) и средней (насаждения парков и скверов). Основанием этому послужило то, что в Октябрьском (пр. Свободный) и Центральном (ул. Ленина, пр. Мира, пр. Карла Маркса) районах, в которых отсутствуют промышленные производства, степень загрязнения определяется близостью к автомагистралям с высокой степенью загруженности автотранспортом. Поэтому парк «Троя», расположенный в непосредственной близости к пр. Свободный и ЦПКиО им. М. Горького, примыкающий к пр. Карла Маркса, находится в условиях автотранспортного загрязнения. В свою очередь, пробные площади, удаленные от основных транспортных артерий района, расположены в зоне влияния предприятий цветной металлургии (парк «Гвардейский» и сквер «Космонавтов»), химической промышленности и теплоэнергетического комплекса (сквер «Семейный»). Кроме того, учитывались и специфические условия

расположения г. Красноярска в котловине вдоль р. Енисей, где выбрасываемые в атмосферу поллютанты перемешиваются и скапливаются, создавая общий фон загрязнения.

Анализ результатов исследования показал, что под воздействием техногенного загрязнения происходит сокращение прироста годичных побегов исследуемых видов. Так, в магистральных насаждениях относительно зоны контроля отмечается снижение длины побега *Malus baccata* на 45,1%, *Tilia cordata* – на 41,1%, *Padus maackii* – на 38,5%, *Betula pendula* – на 33,8%, в парках и скверах – на 37,7; 36,4; 37,3 и 22,9% соответственно (рис. 1).

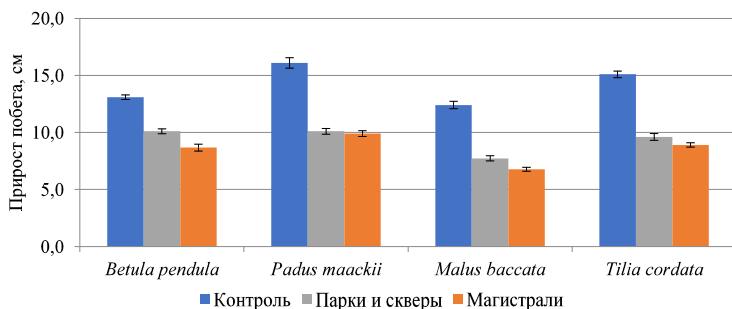


Рис. 1. Длина годичного побега древесных растений, произрастающих в различных функциональных зонах г. Красноярска, см

Fig. 1. Length of annual shoot of woody plants growing in various functional zones of Krasnoyarsk, cm

Сокращение прироста годичного побега у исследуемых видов сопровождается уменьшением его структурных элементов – числа листьев на побеге. В большей мере это выражено у особей *Malus baccata* и *Padus maackii*. Количество листьев на побеге у данных видов снижается в магистральных посадках на 34,1 и 34,2% соответственно, в парках и скверах – на 28,2 и 25,0% соответственно относительно контроля. Анализ площади листьев годичного побега древесных пород показал «классическую» реакцию ксероморфности листовой пластинки под воздействием техногенеза (рис. 2). В условиях городской среды отмечается снижение площади листьев годичного побега относительно данных контроля: в насаждениях парков и скверов – на 18,9…32,5%, в магистральных посадках – на 31,8…38,8%. Из изученных видов максимальное снижение площади листьев отмечается у *Malus baccata* и *Tilia cordata* в парковых насаждениях – на 32,3 и 26,5% и в магистральных – на 38,6 и 35,2% соответственно в сравнении с данными контроля. Урбанизированная среда оказывает влияние на параметры сырой и сухой массы листьев годичного побега (рис. 3). В магистральных насаждениях сырая

масса листвьев относительно данных контроля снижается в пределах от 26,7% (*Malus baccata*) до 35,3% (*Tilia cordata*), в парковых насаждениях – от 21,8% (*Malus baccata*) до 29,6% (*Tilia cordata*). Поскольку сырья масса листвьев напрямую зависит от содержащейся в них воды, был изучен показатель содержания воды в листьях исследуемых видов в различных условиях произрастания. Обнаружено, что в контрольных условиях наибольшее количество воды содержится в листьях *Padus maackii* (60,9%), в то время как у остальных видов этот показатель варьировал от 31,6% у *Tilia cordata* до 46,9% у *Malus baccata*. Повышенное содержание воды у *Padus maackii*, по-видимому, связано с ее биологическими особенностями.

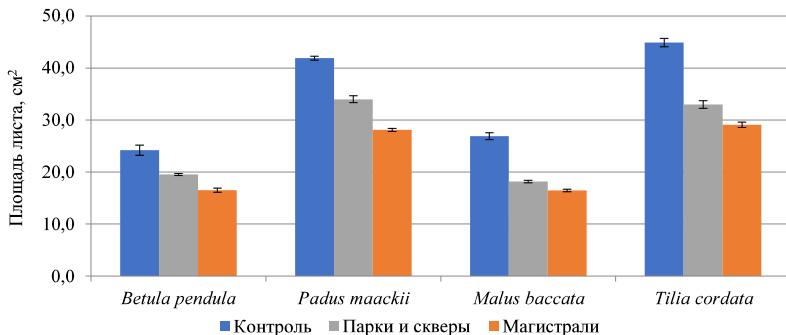


Рис. 2. Площадь листьев на годичном побеге древесных растений, произрастающих в различных функциональных зонах г. Красноярска, см²

Fig. 2. Leaf area on the annual shoot of woody plants growing in various functional zones of Krasnoyarsk, cm²

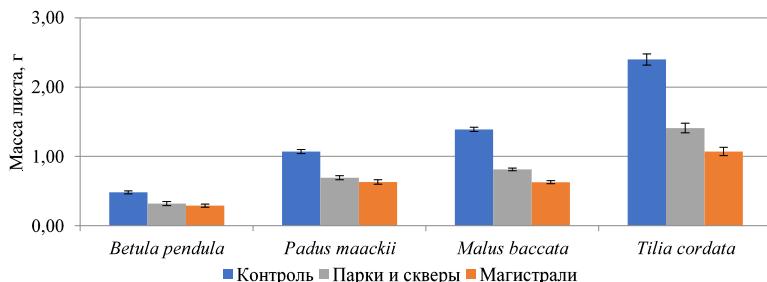


Рис. 3. Сухая масса листьев на годичном побеге древесных растений, произрастающих в различных функциональных зонах г. Красноярска, г

Fig. 3. Dry mass of leaves on an annual shoot of woody plants growing in various functional zones of Krasnoyarsk, g

Накопление органического вещества листьями исследуемых видов, характеризующее интенсивность процесса фотосинтеза, снизилось у осо-бей, произрастающих в условиях городских насаждений. Так, относительно контроля в насаждениях парков и скверов и магистральных посадках сухая масса листьев годичного побега у *Malus baccata* снижается на 41,7 и 54,6%, у *Tilia cordata* – на 41,2 и 55,4%, у *Padus maackii* – на 35,5 и 41,1%, у *Betula pendula* – на 33,3 и 39,5% соответственно (рис. 3).

Для оценки влияния условий произрастания на изученные показатели роста и развития годичных побегов использовали однофакторный дисперсионный анализ (табл. 1). Для оценки существенности разностей между средними использовался метод наименьшей существенной разницы (НСР) [Шмидт, 1984; Доспехов, 1985]. Установлено, что изменение морфометрических показателей побегов исследуемых видов на 91 – 99% обусловлено условиями произрастания и высоко достоверно ($p < 0,05$) (табл. 1).

Таблица 1

Достоверность и доля влияния условий произрастания на морфометрические показатели годичных побегов древесных растений (по результатам однофакторного дисперсионного анализа)

Reliability and share of the influence of growing conditions on the morphometric parameters of annual shoots of woody plants (based on the results of one-way analysis of variance)

Морфометрические параметры	Вид древесного растения							
	<i>Betula pendula</i>		<i>Padus maackii</i>		<i>Malus baccata</i>		<i>Tilia cordata</i>	
	P-Значение	Доля влияния	P-Значение	Доля влияния	P-Значение	Доля влияния	P-Значение	Доля влияния
Длина годичного побега	$3,06 \times 10^{-25}$	0,98	$9,36 \times 10^{-27}$	0,99	$3,93 \times 10^{-28}$	0,99	$8,06 \times 10^{-29}$	0,99
Количество листьев	$1,87 \times 10^{-15}$	0,92	$4,99 \times 10^{-16}$	0,93	$1,71 \times 10^{-21}$	0,97	$1,15 \times 10^{-16}$	0,93
Сырая масса листа	$4,36 \times 10^{-15}$	0,91	$8,59 \times 10^{-22}$	0,97	$2,80 \times 10^{-21}$	0,97	$5,53 \times 10^{-19}$	0,96
Сухая масса листа	$1,34 \times 10^{-15}$	0,92	$1,06 \times 10^{-22}$	0,98	$1,07 \times 10^{-25}$	0,99	$4,16 \times 10^{-26}$	0,99
Площадь листа	$1,60 \times 10^{-20}$	0,97	$2,76 \times 10^{-30}$	0,99	$8,82 \times 10^{-32}$	0,99	$8,39 \times 10^{-28}$	0,99

Обсуждение. Как известно, степень антропогенного воздействия на растения во многом определяется всем комплексом условий произрастания. В результате проведенных исследований выявлено, что у исследуемых древесных растений в условиях урбосреды изменяются все анализируемые показатели годичного побега, причем у особей, произрастающих в магистральных посадках, эти изменения выражены в большей мере. Полученные данные согласуются с исследованиями, проведенными в условиях г. Кемерово для рябины сибирской *Sorbus sibirica* Hedl., сирени обыкновенной *Syringa vulgaris* L. и березы повислой *Betula pendula* [Неверова, Колмогорова, 2003]. Анализом изменений морфометрических показателей побегов исследуемых в настоящей работе видов, установлено, что снижение прироста годичного побега влечет за собой изменение его структурных компонентов – количества и размеров листьев, и, как следствие, площади ассимиляционной поверхности. Как показали наши исследования, для сохранения фотосинтезирующей поверхности исследуемые виды применяют различные стратегии адаптации, причем с увеличением уровня техногенной нагрузки увеличивается и количество задействованных адаптационных механизмов.

Так, у *Tilia cordata*, произрастающей в насаждениях парков и скверов, количество листьев на побегах снижается на 13,9%, в то время как площадь листа – на 26,5% относительно контроля, следовательно, сохранение фотосинтезирующей поверхности у данного вида идет за счет количества листьев на побеге. Для *Padus maackii* в парковых насаждениях отмечалась иная динамика: снижение количества листьев (на 25% относительно контроля) в некоторой степени нивелируется их площадью (снижение площади листа относительно контроля составило 18,9%). *Betula pendula* отличается минимальными изменениями морфометрических показателей годичных побегов в этих условиях среди изученных видов. Сохранение ассимиляционной поверхности обеспечивается практически в равной степени количеством (ниже на 17,8% от контроля), и площадью листьев (ниже на 19,3%).

В магистральных посадках, отличающихся наиболее суровыми условиями произрастания, реакция видов различается лишь по степени снижения ассимиляционной поверхности. Сильнее всего утрата ассимиляционной поверхности проявилась у *Malus baccata*: по количеству листьев – на 34,5% и по площади листьев – на 38,8%. У *Tilia cordata* и *Padus maackii* – на 29,5 и 35,2%; 34,4 и 32,9% соответственно. Более устойчивым видом проявила себя *Betula pendula*. Снижение количества и площади листа составило 21,2 и 31,8% соответственно, что свидетельствует о высоких адаптационных возможностях данного вида.

Снижение ассимиляционной поверхности направленно действует на накопление сухой биомассы, которая, в свою очередь, считается одним из главных показателей фотосинтетической деятельности и продуктивности растений. Несмотря на то, что производительность и продуктивность зеленых насаждений городов не является их основной функцией, достижение оптимального сочетания их полезных функций (санитарно-гигиенических, эстетических, рекреационных и пр.) возможно только при сохранении фотосинтетической деятельности растений. Как показали настоящие исследования, из изученных показателей морфоструктуры побега именно сухая масса листа подвержена наибольшему изменению под воздействием урбосреды. В условиях парков сухая масса листа снижалась от 33,8 до 41,6%, а в насаждениях магистралей – от 39,6 до 55,4%.

Подавление фотосинтетической активности ассимиляционного аппарата листьев может проявляться как через различные нарушения биохимических процессов внутри фотосинтезирующих клеток, так и вследствие уменьшения массы фотосинтезирующей ткани. Расчет показателей удельной массы листовой поверхности выявил тенденцию к ее снижению относительно контроля у исследованных видов в 1,1 – 1,3 раза в условиях парков и в 1,2–1,4 раза в магистральных посадках. Сильнее всего уменьшился удельный вес фотосинтезирующей ткани у насаждений *Tilia cordata* (в 1,4 раза) и *Malus baccata* (в 1,3 раза) в магистральных посадках.

Таким образом, у изученных видов в условиях техногенной среды г. Красноярска наблюдается ксерофитизация морфологических структур, повышение водного дефицита, снижение удельной массы листа, нарушение ассимиляционных процессов, увеличивающихся с возрастанием уровня техногенной нагрузки. Низкие показатели сырой массы листьев исследуемых видов наблюдаются в магистральных посадках, чему дополнительно способствует тот факт, что большая часть тротуаров в г. Красноярске покрыта либо асфальтом, либо брускаткой – водонепроницаемыми материалами, способствующими стеканию воды в ливневую сеть и тем самым препятствующими ее проникновению в почву. Для дерева выделяется небольшое посадочное место, размером не более $0,5 \times 0,5$ м, куда влага может проникать свободно, однако такой «скромный» участок открытой почвы, отведенный растению, не способен покрыть его потребности в воде, в результате чего растительность магистралей находится в условиях хронического водного дефицита.

На основании проведенных исследований по степени нарушения морфометрических показателей годичного побега исследуемые древесные по-

роды можно расположить в такой последовательности: *Malus baccata* > *Tilia cordata* > *Padus maackii* > *Betula pendula*. Таким образом, *Malus baccata* и *Tilia cordata* можно отнести к неустойчивым видам в условиях техногенной среды г. Красноярска.

Заключение. Проведенная оценка состояния ассимиляционного аппарата четырех доминирующих в составе насаждений видов показала, что имеется видовая специфика в действовании различных механизмов оптимизации фотосинтетического аппарата, реализация которых повышает адаптационные возможности вида к стрессовым условиям среды. Установлено, что относительно высоким адаптационным потенциалом обладает *Betula pendula* как в насаждениях парков, так и в магистральных посадках. *Padus maackii* характеризуется высокой степенью адаптации в парковых посадках, где создает высокодекоративные и продуктивные насаждения, но менее устойчива в условиях магистралей, поэтому не рекомендуется для широкого использования в этом типе насаждений. Низкими показателями состояния кроны отличается *Malus baccata* во всех категориях изученных насаждений, но благодаря высокой декоративности вида, особенно в период цветения, использовать ее в парковых посадках можно, хотя продолжительность жизни таких насаждений будет сильно сокращена. У *Tilia cordata* наиболее низкие показатели состояния отмечаются в условиях магистралей, но она довольно стабильна в условиях парков. В целом у всех изученных видов в урбанизированной среде наблюдается снижение показателей развития ассимиляционного аппарата, что несомненно сказывается на продолжительности жизни, санитарных и декоративно-эстетических свойствах насаждений. Данные исследования могут стать основой для разработки рекомендаций по реконструкции зеленых зон г. Красноярска, а изученные морфометрические показатели годичного побега могут быть использованы в качестве объективного и доступного метода оценки состояния растительности на урбанизированных территориях г. Красноярска.

Вклад авторов. Лисотова Е.В. – 0,33; Сунцова Л.Н. – 0,33; Иншаков Е.М. – 0,33.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Авдеева Е.В. Зеленые насаждения городов Сибири. Красноярск: СибГТУ, 2000. 148 с.

Бухарина И.Л., Журавлева А.Н., Большова О.Г. Городские насаждения: экологический аспект. Ижевск: Удмуртский университет, 2012. 206 с.

Виноградова Е.Н. Морфометрический анализ годичного побега растений *Acer negundo* L., произрастающих в условиях техногенного загрязнения среды в Донбассе // Самарский научный вестник. 2016. № 3(16). С. 13–17.

Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2020 году». Красноярск: Министерство экологии и рационального природопользования Красноярского края, КГБУ «ЦРМПиООС», 2021. 337 с.

Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Агропромиздат, 1985. 350 с.

Колмогорова Е.Ю. Морфометрическая характеристика древесных растений, произрастающих в условиях воздействия выбросов автотранспорта // Живые и биокосные системы. 2013. № 4. С. 6–10.

Колмогорова Е.Ю. Морфометрическая характеристика древесных растений, произрастающих в условиях угольного отвала разреза «Кедровский» // Бюллетьеня науки и практики. 2016. № 6 (7). С. 25–30.

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

Неверова О.А., Колмогорова Е.Ю. Ксерофитизация листьев древесных растений как показатель загрязнения атмосферного воздуха (на примере г. Кемерово) // ИВУЗ. Лесной журнал. 2002. № 3. С. 29–33.

Неверова О.А., Колмогорова Е.Ю. Древесные растения и урбанизированная среда: экологические и биотехнологические аспекты. Новосибирск: Наука, 2003. 222 с.

Николаевский В.С. Экологическая оценка загрязнения среды и состояния наземных экосистем методами фитоиндикации. Пушкино: Всерос. науч.-исслед. ин-т лесоводства и механизации лес. хоз-ва, 2002. 220 с.

Павлов И.Н. Древесные растения в условиях техногенного загрязнения. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2006. 370 с.

Пирогова Д.В., Сунцова Л.Н., Инишаков Е.М. Адаптация древесных растений к воздействию городской среды // Хвойные бореальной зоны. 2009. Т. 26, № 2. С. 221–223.

Протопопов В.В. Роль зеленых насаждений в урбанизированных ландшафтах Сибири // Пути улучшения охраны окружающей среды г. Красноярска: тез. докл. науч.-практ. конф. Красноярск, 1982. С. 65–68.

Протопопова Е.Н. Озеленение промышленных городов Красноярского края. Практические рекомендации. Красноярск: Сибирь, 1987. 65 с.

Ставникова Л.В., Степень Р.А. Исследование загрязнения воздушной среды г. Красноярска биоиндикационными методами. Красноярск: СибГТУ, 2008. 48 с.

Степень Р.А., Есякова О.А., Соболева С.В. Оценка загрязнения атмосферы биоиндикационными методами. Красноярск: СибГТУ, 2013. 142 с.

Сунцова Л.Н., Инишаков Е.М. Древесные растения в условиях техногенной среды г. Красноярска // Хвойные бореальной зоны. 2007. Т. 24, № 1. С. 95–99.

Сунцова Л.Н., Инишаков Е.М., Козик Е.В. Анализ структуры древесных насаждений г. Красноярска // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2010. Вып. 191. С. 58–66.

Шмидт В.М. Математические методы в ботанике. Л.: Изд-во ЛГУ, 1984. 288 с.

References

- Avdeeva E.V. Green spaces in Siberian cities. Krasnoyarsk: SibSTU, 2000. 148 p. (In Russ.)
- Bukharina I.L., Zhuravleva A.N., Bolshova O.G. Urban plantings: environmental aspect. Izhevsk: Udmurt University Publishing House, 2012. 206 p. (In Russ.)
- Dospekhov B.A. Methodology of field experience (with the basics of statistical processing of research results). M.: Agropromizdat, 1985. 350 p. (In Russ.)
- Kolmogorova E.Yu. Morphometric characteristics of woody plants growing under the influence of vehicle emissions. *Living and bioinert systems*, 2013, no. 4, pp. 6–10. (In Russ.)
- Kolmogorova E.Yu. Morphometric characteristics of woody plants growing in the conditions of the coal dump of the Kedrovsky open-pit mine. *Bulletin of Science and Practice*, 2016, no. 6(7), pp. 25–30. (In Russ.)
- Koropachinsky I.Yu., Loskutov R.I. Woody plants for landscaping in Krasnoyarsk. Novosibirsk: Geo, 2014. 320 p. (In Russ.)
- Neverova O.A., Kolmogorova E.Yu. Xerophytization of leaves of woody plants as an indicator of atmospheric air pollution (using the example of Kemerovo). *IVUZ. Forestry Journal*, 2002, no. 3, pp. 29–33. (In Russ.)
- Neverova O.A., Kolmogorova E.Yu. Woody plants and the urban environment: ecological and biotechnological aspects. Novosibirsk: Nauka, 2003. 222 p. (In Russ.)
- Nikolaevskiy V.S. Ecological assessment of environmental pollution and the state of terrestrial ecosystems using phytointication methods. Pushkino: All-Russian scientific research Institute of Forestry and Forestry Mechanization, 2002. 220 p. (In Russ.)
- Pavlov I.N. Woody plants under conditions of technogenic pollution. Ulan-Ude: BSC SB RAS, 2006. 370 p. (In Russ.)
- Pirogova D.V., Suntsova L.N., Inshakov E.M. Adaptation of woody plants to the influence of the urban environment. *Conifers of the boreal zone*, 2009, vol. 26, no. 2, pp. 221–223. (In Russ.)
- Protopopov V.V. The role of green spaces in the urban landscapes of Siberia. *Ways to improve environmental protection in Krasnoyarsk*: abstracts of sci.-pract. conf. reports. Krasnoyarsk, 1982, pp. 65–68. (In Russ.)
- Protopopova E.N. Greening of industrial cities of the Krasnoyarsk region. Practical recommendations. Krasnoyarsk: Siberia, 1987. 65 p. (In Russ.)
- Shmidt V.M. Mathematical methods in botany. Leningrad: Leningrad State University Publishing House, 1984. 288 p. (In Russ.)

State report «On the state and protection of the environment in the Krasnoyarsk Territory in 2020». Krasnoyarsk: Ministry of Ecology and Rational Natural Resources Management of the Krasnoyarsk Territory, KGBU «TsRMPiOOS», 2021. 337 p. (In Russ.)

Stavnikova L.V., Stepen R.A. Study of air pollution in Krasnoyarsk using bioindication methods. Krasnoyarsk: SibSTU, 2008. 48 p. (In Russ.)

Stepen R.A., Esyakova O.A., Soboleva S.V. Assessment of air pollution using bioindication methods. Krasnoyarsk: SibSTU, 2013. 142 p. (In Russ.)

Suntsova L.N., Inshakov E.M. Woody plants in the technogenic environment of Krasnoyarsk. *Conifers of the boreal zone*, 2007, vol. 24, no. 1, pp. 95–99. (In Russ.)

Suntsova L.N., Inshakov E.M., Kozik E.V. Analysis of the structure of tree plantations in Krasnoyarsk. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2010, iss. 191, pp. 58–66. (In Russ.)

Vinogradova E.N. Morphometric analysis of the annual shoot of *Acer negundo* L. plants growing under conditions of technogenic environmental pollution in the Donbass. *Samara Scientific Bulletin*, 2016, no. 3(16), pp. 13–17. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 17.01.2024

Лисотова Е.В., Сунцова Л.Н., Иншаков Е.М. Влияние атмосферного загрязнения на морфометрические показатели древесных растений в условиях г. Красноярска // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 252. С. 140–154. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.140-154

Красноярск является крупным промышленным центром Сибири, характеризующимся высоким уровнем загрязнения атмосферы. Система зеленых насаждений современного города призвана существенно улучшить экологическую ситуацию, но важным условием в этом случае является научно обоснованный подбор ассортимента древесной растительности, пригодной для озеленения г. Красноярска и городов Средней Сибири. Для этого необходимо обладать достаточной информацией об эколого-биологическом состоянии древесных растений, позволяющей оценить функциональный вклад каждого вида в изменение качества среды в направлении ее улучшения. Целью исследования являлось изучение морфометрических параметров годичных побегов некоторых видов лиственных пород в урбанизированной среде г. Красноярска. Объектами исследования были выбраны виды как местной, так и интродуцированной флоры *Betula pendula*, *Malus baccata*, *Tilia cordata* и *Padus maackii* в составе насаждений различного функционального назначения. Биометрический способ оценки состояния деревьев предусматривал измерение размеров годичных отрезков боковых побегов; количества листьев на годичных отрезках боковых побегов; сырого и абсолютно сухого веса листьев; площади

листьев. Исследованиями показано, что у изученных видов в условиях техногенной среды г. Красноярска наблюдается снижение всех морфометрических показателей, ксерофитизация морфологических структур, повышение водного дефицита, снижение удельной массы листа, нарушение ассимиляционных процессов, увеличивающихся с возрастанием уровня техногенной нагрузки. На основании проведенных исследований по степени нарушения морфометрических показателей годичного побега исследуемые древесные породы можно расположить в такой последовательности: *Malus baccata* > *Tilia cordata* > *Padus maackii* > *Betula pendula*. Таким образом, *Malus baccata* и *Tilia cordata* можно отнести к неустойчивым видам в условиях техногенной среды г. Красноярска. Обнаружена видовая специфика в оптимизации фотосинтетического аппарата изученных видов к условиям урбанизированной среды г. Красноярска. Проведенная оценка состояния ассимиляционного аппарата четырех доминирующих в составе насаждений видов показала, что относительно высоким адаптационным потенциалом обладает *Betula pendula*, а наиболее низким – *Malus baccata*.

Ключевые слова: урбанизированная среда, древесные растения, морфометрические показатели.

Lisotova E.V., Suntsova L.N., Inshakov E.M. The influence of atmospheric pollution on the morphometric parameters of woody plants in the conditions of Krasnoyarsk. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 252, pp. 140–154 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.140-154

The city of Krasnoyarsk is a large industrial center of Siberia, characterized by a high level of air pollution. The green planting system of a modern city is designed to significantly improve the environmental situation, but an important condition in this case is the scientifically based selection of an assortment of woody vegetation suitable for landscaping the city of Krasnoyarsk and the cities of Central Siberia. To do this, it is necessary to have sufficient information about the ecological and biological state of woody plants, allowing one to assess the functional contribution of each species to changing the quality of the environment in the direction of its improvement. The purpose of the study was to study the morphometric parameters of annual shoots of some types of deciduous trees in the urbanized environment of Krasnoyarsk. The objects of the study were species of both local and introduced floras *Betula pendula*, *Malus baccata*, *Tilia cordata* and *Padus maackii* in plantings of various functional purposes. The biometric method for assessing the condition of trees involved measuring the size of annual segments of lateral shoots; number of leaves on annual segments of side shoots; wet and absolutely dry weight of leaves; leaf area. Research has shown that in the studied species in the technogenic environment of Krasnoyarsk, there is a decrease in all morphometric indicators, xerophytization of morphological

structures, an increase in water deficiency, a decrease in the specific gravity of the leaf, a violation of assimilation processes, which increase with an increase in the level of technogenic loads. Based on the studies conducted on the degree of violation of the morphometric indicators of the annual shoot, the studied tree species can be arranged in the following sequence: *Malus baccata* > *Tilia cordata* > *Padus maackii* > *Betula pendula*. Thus, *Malus baccata* and *Tilia cordata* can be classified as unstable species in the technogenic environment of Krasnoyarsk. Species specificity was discovered in the optimization of the photosynthetic apparatus of the studied species to the conditions of the urbanized environment of Krasnoyarsk. An assessment of the state of the assimilation apparatus of the four dominant species in the plantings showed that *Betula pendula* has a relatively high adaptive potential, and *Malus baccata* has the lowest.

Keywords: urban environment, woody plants, morphometric indicators.

ЛИСТОВА Евгения Викторовна – доцент кафедры селекции и озеленения Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, кандидат сельскохозяйственных наук. ORCID: 0000-0001-7210-195X. Scopus AuthorID: 57368370600.

660037, пр. им. газ. «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия.
E-mail: lisotovaev@yandex.ru

LISOTOVA Evgeniya V. – PhD (Agricultural), Associate Professor of the Department of Selection and Landscaping, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. ORCID: 0000-0001-7210-195X. Scopus AuthorID: 57368370600.

660037. Im. gazety «Krasnoyarskiy Rabochiy» av. 31. Krasnoyarsk. Russia.
E-mail: lisotovaev@yandex.ru

СУНЦОВА Людмила Николаевна – доцент кафедры селекции и озеленения Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, кандидат биологических наук. ORCID: 0009-0005-0828-0187. Scopus AuthorID: 57368578100.

660037, пр. им. газ. «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия.
E-mail: lnsuntsova@mail.ru

SUNTSOVA Lyudmila N. – PhD (Biological), Associate Professor of the Department of Selection and Landscaping, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. ORCID: 0009-0005-0828-0187. Scopus AuthorID: 57368578100.

660037. Im. gazety «Krasnoyarskiy Rabochiy» av. 31. Krasnoyarsk. Russia.
E-mail: lnsuntsova@mail.ru

ИНШАКОВ Евгений Михайлович – доцент кафедры селекции и озеленения Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, кандидат сельскохозяйственных наук. ORCID: 0009-0006-9378-2030. Scopus AuthorID: 57367332600.

660037, пр. им. газ. «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия.
E-mail: eminchakov62@mail.ru

INSHAKOV Evgeniy M. – PhD (Agricultural), Associate Professor of the Department of Selection and Landscaping, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. ORCID: 0009-0006-9378-2030. Scopus AuthorID: 57367332600.

660037. Im. gazety «Krasnoyarskiy Rabochiy» av. 31. Krasnoyarsk. Russia.
E-mail: eminchakov62@mail.ru

М.Ю. Филатова, Л.Т. Крупская, А.В. Леоненко

**ПЕРСПЕКТИВЫ ПЛАНТАЦИОННОГО ЛЕСОВЫРАЩИВАНИЯ
НА РЕКУЛЬТИВИРОВАННЫХ ЗЕМЛЯХ
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА**

Введение. В настоящее время одной из важнейших проблем является уменьшение лесных ресурсов, используемых в деревоперерабатывающей промышленности. Восстановление древостоя на обезлесенных участках позволит не только решить этот вопрос, но и улучшить экологическую обстановку в регионах за счет восстановления деградированных земель и продуцирования фитомассы в виде древесного сырья. Объектами исследования послужили: лесные экосистемы, включая характеристики лесных участков и насаждений (полнота, возраст, прирост; почвогрунты, световой режим, температура); рекультивированные земли; сеянцы и черенки лиственницы и др. хвойных и лиственных пород; природно-климатические факторы. В связи с этим цель исследования состояла в определении перспектив создания лесных плантаций, в том числе на рекультивированных территориях, нарушенных в прошлом веке горнорудной деятельностью, для снижения ее отрицательного воздействия. Исходя из цели исследования, определены его задачи.

1. Анализ, обобщение и систематизация литературных данных по названной проблеме.
2. Исследование плантационного лесовыращивания на техногенных образованиях как объектах лесной рекультивации на основе выявленных критериев лесных участков.
3. Обоснование необходимости восстановления техногенно нарушенных территорий путем рекультивации и плантационного лесовыращивания и возврат их в фонд лесных земель.

Сохранение биологического разнообразия является одной из основных задач, которую необходимо учитывать при воспроизведении продуктивности техногенно загрязненных лесных участков с использованием потенциала биологических систем (биоремедиации) и, соответственно, в процессе создания лесных плантаций. В связи с этим важным аспектом является анализ генетической, видовой и экосистемной компонент биоразнообразия. Для этого необходимо восстанавливать не только ценные с точки зре-

ния сохранения биоразнообразия лесные ландшафты местного породного состава и возрастной структуры, но и промышленно ценные леса с ускоренным оборотом рубки, которые были утрачены в результате техногенного влияния. Так, Chaubey [Chaubey, Bohre, 2014] исследовал возможность восстановления угольных отвалов путем создания лесных плантаций. В качестве добавок применялись компост, мочевина и Олдрин при посадке саженцев шести доминирующих видов: *Dalbergia sissoo* Roxb. ex D.C., *Pongamia pinnata* (L.) Pierre, *Tectona grandis* L. f., *Gmelina arborea* Roxb. ex Sm., *Azadirachta indica* A. Juss., *Cassia siamea* Lam. Результаты показали, что объемная плотность рекультивированных участков постепенно снижалась с возрастом плантаций, а содержание органического углерода в почве (*Dalbergia sissoo* – 358%, *Tectona grandis* – 233,3%), кислотность, влагоудерживающая способность увеличились. Наблюдалось постепенное увеличение микробной биомассы от 40,2 (плантация *T. grandis* возрастом 2 года) до 66,6 мг kg^{-1} у *D. sissoo* (плантация возрастом 18 лет).

Farooq et al. [2021] изучали вопросы защиты естественных лесов в процессе экономической деятельности промышленности при помощи плантационного лесовыращивания. В процессе создания и дальнейшего роста плантаций возникает множество проблем, таких как: лесопатологические, снижения плодородия почвы, сокращения биоразнообразия и снижения продуктивности. Существует потребность в дальнейших исследованиях микробной и ферментативной активности почвы, которые расширяют понимание долгосрочного воздействия плантаций.

Daugaviete et al. [2020] в своих исследованиях обобщили данные по выращиванию лесных плантаций на бывших сельскохозяйственных землях. Исследователями отслеживались динамика роста и продуктивность различных пород деревьев в местных климатических условиях. Для плантационного лесовыращивания в условиях короткого оборота рубок (25–40 лет) и сухих минеральных почв легкого и среднетяжелого состава были подобраны наиболее подходящие породы деревьев – береза повислая (*Betula pendula* Roth), ольха серая (*Alnus incana* (L.) Moench) и ель обыкновенная (*Picea abies* (L.) H. Karst.). За 15 лет был достигнут максимальный объем древесины 100–300 $\text{m}^3 \text{ га}^{-1}$, что является минимальным показателем для хвойных пород и максимальным для широколистенных. Наблюдалось положительное влияние на агрохимические свойства почвы, соответственно, прямо пропорциональное увеличение надземной растительности и увеличение экономической выгоды от реализации большего объема сельскохозяйственной продукции.

В статье М. Парфененковой [2022] указана необходимость перехода к устойчивому управлению и интенсивному воспроизведству лесов в России для компенсации последствий активной вырубки леса. Установлено, что за 70 лет, начиная с 1950-х гг. XX века, почти в полтора раза уменьшилась площадь, занимаемая наиболее ценными и пригодными для использования насаждениями, при этом восполнение запасов древесины лесовосстановительными мероприятиями позволило восстановить только треть утраченных запасов. Предотвратить это возможно применением современных методик управления плантациями. По оценкам экспертов, интенсивная форма ведения хозяйств в Сибири применяется примерно на 15% площади лесного фонда, на которой заготавливается от 45 до 60% от общего объема потребляемой лесной продукции. Экстенсивная форма ведения хозяйства применяется на 25–30% площади, бъемы лесозаготовок – 35–45%.

Ю.А. Ширниным с соавторами [2021] представлен анализ влияния пространственного размещения древостоя и его геометрических параметров на динамику роста лесных плантаций. Изучены способы и средства проведения рубок ухода, окончательной рубки, и установлена необходимость создания условий для их проведения. Сделан вывод о необходимости предоставления потребителю для производства товарной продукции древесины, заготовленной не только при окончательной рубке, но и во время рубок ухода. Авторами предложены новые элементы технологических схем разработки пасек и лент в условиях плантационных насаждений.

Н.Р. Сунгуровой и И.А. Попковой [2022] изучено восстановление антропогенно нарушенных территорий, негативно влияющих на окружающую среду и хозяйствственно-ценные лесные насаждения. Проводилась рекультивация карьеров путем восстановления искусственного ландшафта с применением дополнительных мероприятий. В выросших 15-летних насаждениях сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) при проведении учета древостоя установлены следующие их характеристики: класс бонитета – II, класс возраста – второй, средний диаметр – 14,6 см, высота – 15,6 м, запас – 168 м³/га. Также результаты исследований показали, что при игнорировании лесомелиоративных работ в карьерах после добычи песка через 17 лет насчитывалось 1525 шт./га березы (*Betula pendula*) семенного происхождения, что крайне недостаточно для формирования высокопродуктивных насаждений.

Проведенный анализ и обобщение отечественного и зарубежного опыта свидетельствуют о том, что в условиях Дальневосточного федерального округа России названная проблема недостаточно изучена.

Материалы и методика исследования. Объектами исследования послужили: лесные экосистемы, включая характеристики древостоев (полнота, возраст, прирост; почвогрунты, световой режим, температура); рекультивированные земли; сеянцы и черенки лиственницы и др. хвойных и лиственных пород; природно-климатические факторы. Для изучения влияющих на состояние лесных фитоценозов и почвообразование факторов были заложены 2 постоянные пробные площади. В качестве методологической основы исследований послужило учение академика В.И. Вернадского [1989] о биосфере и ноосфере, а также основные положения, изложенные в Программе и методике изучения техногенных биогеоценозов Л.В. Моториной и Б.П. Колесникова [1978]. Теоретической основой исследования явились научные труды И.С. Мелехова [2003], В.Н. Сукачева [1972], Н.П. Анутина [1982] и др. В процессе реализации программы использованы различные методы, в том числе маршрутно-рекогносцировочные, геоботанические, лесоводственно-таксационные, геоморфологические.

Результаты исследования. Плантационное лесовыращивание в Дальневосточном федеральном округе находится на начальной стадии развития. В связи с этим возникла необходимость в проведении исследований перспектив плантационного выращивания леса на рекультивируемых территориях. Для этого были проанализированы материалы по подбору быстрорастущих древесных пород, в том числе опыт селекционных работ российских исследователей из ФГБУ «ВНИИЛГИСбиотех». Достоинством тополей, например, североамериканских гибридов в 2–5-летнем возрасте на опытных плантациях в Воронежской области, по данным [Русин, 2008; Русин и др., 2008], а также [Царев и др., 2010; Tsarev et al., 2019] является накопление запаса древесины до 1000 м³/га. В результате обследования опытных посадок 505 черенков 16 клонов тополей селекции ФГБУ «ВНИИЛГИСбиотех» в питомнике Хабспецхоза с. Некрасовка, высаженных в 2016 г. сотрудниками ФБУ «ДальНИИЛХ», были определены наиболее перспективные быстрорастущие сорта тополя для плантационного лесовыращивания – Волосистоплодный, Китайский, Мариландика, Сакрау-59, Брабантика-175 (№ 55), Ведуга, Версия, Стройн, Пионер, Э.С.-38. Общее состояние исследуемых тополей оказалось удовлетворительным. Был заготовлен материал для черенкования.

Был проведен эксперимент в оранжерее ФБУ «ДальНИИЛХ» и в производственных условиях на рекультивированном три года назад техногенном участке в Кавалеровском лесничестве Приморского края по созданию

лесных плантаций [Krupskaya et al., 2023]. Применение биоактиваторов (растворы Ростивина (1 г/л), Гуминола (1 мл/л), янтарной кислоты (1 г/л)) показало, что самые высокие показатели укоренения черенков тополя выявлены у сортов Пионер, Волосистоплодный, Китайский, Мариландика, Брабантика-175, Стройн в вариантах с применением следующих биоактиваторов: янтарная кислота, гуминол, ростивин (рис. 1, 2).



Рис. 1. Черенок тополя сорта Брабантика-175 и его корневая система при применении биоактиватора – янтарной кислоты

Fig. 1. The stalk of a poplar of the Brabantika-175 variety and its root system when using a bioactivator – succinic acid



Рис. 2. Черенок тополя сорта Волосистоплодный и его корневая система при применении биоактиватора – гуминола

Fig. 2. The stalk of a poplar of the Hairy-fruited variety and its root system with the use of a bioactivator – huminol

Инвентаризация, проведенная осенью 2023 г., показала их большую сохранность, которая отмечалась у всех исследованных сортов, за исключением сорта Ведуга, что позволило сделать предварительный вывод о положительном влиянии гуминола и янтарной кислоты на приживаемость и рост черенков тополя, а также лиственницы.

На рекультивированных три года назад площадях, нарушенных в прошлом веке освоением минерального сырья, на площади 0,25 га после ее чистовой планировки, рыхления и внесения разработанного авторами состава, способствующего восстановлению продуктивности земель, высаже-

ны саженцы древесно-кустарниковой растительности (всего 395 экземпляров, в т.ч.: сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*) – 156, дуб монгольский (*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.) – 53, ель аянская (*Picea jezoensis* (Siebold & Zucc.) Carrière) – 107, ильм мелколистный (*Ulmus parvifolia* Jacq.) – 14, лиственница Даурская (*Larix dahurica* Laws.) – 19, рябинник рябинолистный (*Sorbaria sorbifolia* (L.) A. Braun) – 16, клен мелколистный (*Acer mono* Maxim. ex Rupr.) – 21, мискантус китайский (*Miscanthus sinensis* Andersson) – 9). В качестве контроля использованы отходы переработки оловорудного сырья. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что наибольшую выживаемость показали саженцы (в порядке убывания): сосны обыкновенной, ели аянской, дуба монгольского, рябинника рябинолистного, клена мелколистного и др. (рис. 3). Причем выживаемость саженцев с закрытой корневой системой составила почти 95%, в отличие от саженцев с открытой корневой системой, у которых этот показатель существенно ниже – 61,32%.

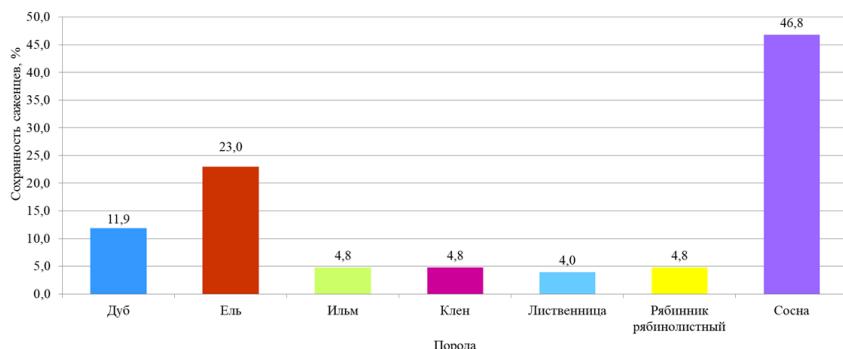


Рис. 3. Сохранность саженцев (%) древесной растительности

Fig. 3. Safety of seedlings (%) of woody vegetation

Осенью, 20.09.2023, проведена инвентаризация лесных насаждений, которая показала гибель 147 из 395 экземпляров древесно-кустарниковой растительности, что составило 37,2%, также связанную с природно-климатическими особенностями региона (муссонные дожди, тайфуны).

За вегетационный период (2023 г.) получены высокие показатели прироста по высоте у травянистой растительности, в частности у мискантуса, а среди древесно-кустарниковой растительности наилучший результат – у сосны обыкновенной и рябинника рябинолистного (рис. 4).

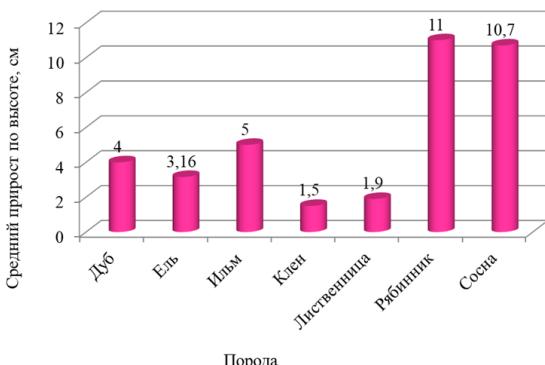


Рис. 4. Средний прирост саженцев деревьев и кустарников по высоте за один вегетационный период

Fig. 4. Average growth of seedlings of trees and shrubs in height during one growing season

Инвентаризация весенних посадок 2023 года, проведенная 20.09.2023, показала следующие результаты: из высаженных 188 экземпляров древесно-кустарниковой растительности, состоящей из саженцев лиственницы даурской и сосны обыкновенной, черенков различных сортов тополя, сеянцев ильма мелколистного, с применением различных биоактиваторов (ростивина и янтарная кислота) выявлена сохранность древесных насаждений 83%; гибель составила 17% (32 экземпляра).

На контроле, где не применялись биоактиваторы, выявлена стопроцентная гибель черенков тополя.

Обсуждение. Комплексный коэффициент адаптации дает возможность рекомендовать для создания лесных плантаций следующие сорта, сочетающие высокую энергию роста и адаптацию к условиям Дальневосточного региона: Мариландика, Сакрау-59, Брабантика, Волосистоплодный, Китайский, Э.С.-38, Версия, Стройн.

Проведенные экспериментальные исследования по разработке технологии создания лесных плантаций на рекультивированных участках Кавалеровского лесничества Приморского края свидетельствуют о том, что самые высокие показатели укоренения черенков тополя выявлены у сортов Пионер, Волосистоплодный, Китайский, Мариландика, Брабантика-175, Стройн в вариантах с применением следующих биоактиваторов: янтарная кислота, гуминол, ростивин. Выявлено, что состояние саженцев лиственницы, сосны, дуба, клена оказалось удовлетворительным.

На рекультивированном участке Кавалеровского лесничества Приморского края выявлено, что прирост по диаметру и высоте зависит (по мере убывания) от ростивина, гуминола и янтарной кислоты (рис. 5)

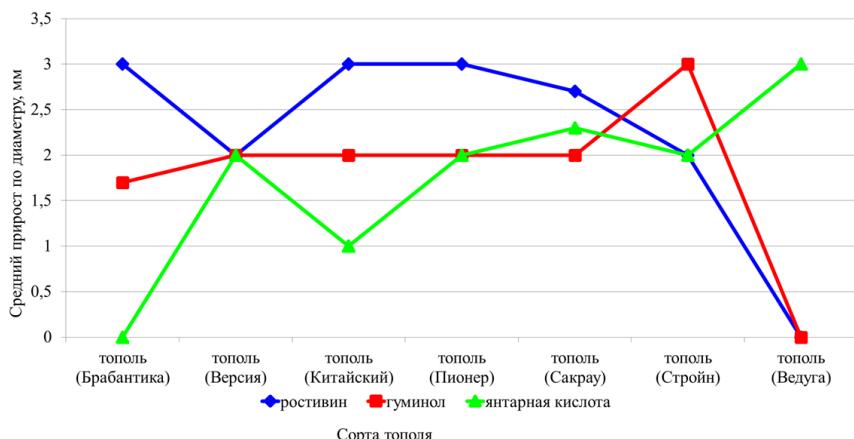


Рис. 5. Средний прирост черенков тополя по диаметру при применении различных биоактиваторов

Fig. 5. The average increase in poplar cuttings in diameter with the use of various bioactivators

На основе теоретических и экспериментальных исследований нами выявлены критерии оценки пригодности различных лесных участков для создания лесных плантаций. Наиболее важными из критериев являются: контурность (размеры участка могут быть: крупноконтурные, оптимально-контурные, средне -и мелкоконтурные или микроконтурные), рельеф, каменистость почвы, ее механический состав и влажностный режим, наличие пней, а также живых и сухостойных деревьев и крутизна местоположения. Выявлено, что большая роль принадлежит таким критериям, как: подготовка площади и обработка почв, дифференцированный подход к выбору технических средств при этом и защите почв от эрозии, воссоздание почвенного плодородия. Эффективное использование и достижение сравнительно высокой производительности и характеристик деревьев и насаждений возможно за счёт мероприятий по сохранению биоразнообразия. Большое значение имеют экологические показатели, в том числе предотвращение отрицательных воздействий загрязнения грунтовых вод на фло-

ру и фауну участка и соседних с ним при поверхностном стоке и попадании загрязняющих веществ в водоёмы. Помимо этого, необходим интенсивный режим выращивания улучшенного посадочного материала, постоянное осуществление мероприятий ухода с высоким уровнем механизации, обеспечение оптимального размещения на создаваемых плантациях быстрорастущих пород, применение биологически активных веществ для ухода за насаждениями и ускорения их роста.

В процессе подбора и обследования лесных участков для плантационного лесовыращивания необходимо наиболее полное выявление всех факторов, которые могут ограничивать выполнение этого вида деятельности. По нашему мнению, разработанный сотрудниками «ДальНИИЛХ» перечень конкретизированных лимитирующих факторов для обследования и проведения лесокультурных работ [Сапожников и др., 1986] может быть использован при подборе лесных участков для создания лесных плантаций.

В дальнейшем планируется продолжение наблюдений и постановка дополнительных экспериментов по применению различных биоактиваторов роста.

Заключение. Постановка экспериментов в оранжерее «ДальНИИЛХ» и в производственных условиях на рекультивированном участке Кавалеровского лесничества (Приморский край) позволила выявить возможность успешного выращивания плантационных лесных насаждений, а именно посадкой черенками акклиматизированного тополя и саженцами древесных культур с использованием следующих биоактиваторов (биологически активных веществ): гуминола, ростивина, янтарной кислоты. Проведенные исследования позволяют сделать предварительный вывод, что при выращивании черенков тополя на плантации можно рекомендовать использование гуминола и янтарной кислоты. Достоверность результатов исследования обеспечена использованием современных методов с применением аттестованных измерительных приборов и апробированных методик, их воспроизводимостью, длительным наблюдением за изменением концентрации загрязняющих веществ в объектах окружающей среды и результатами опытно-полупромышленных испытаний, апробацией результатов на конференциях разного уровня (региональных, российских, международных) и их публикацией в высокорейтинговых журналах.

Результаты исследований позволяют разработать новую эффективную технологию создания лесных плантаций быстрорастущих пород в лесных районах Дальневосточного федерального округа, а также нормативные до-

кументы, четко регламентирующие порядок, способы, технологию проведения этих работ в зависимости от конкретных природных условий. Это даст возможность снизить промышленную нагрузку на естественные леса и уменьшить дефицит деловой древесины, а также приведет к увеличению площади арендованных лесных участков и доходов от использования лесов.

Вклад авторов. М.Ю. Филатова – анализ и обобщение литературных данных, проведение экспериментальных исследований; Л.Т. Крупская – аналитический обзор и систематизация материалов, проведение экспериментальных исследований, оценка, обобщение и интерпретация результатов исследования; А.В. Леоненко – графическое оформление полученных результатов.

Сведения о финансировании исследования. Работа выполнена за счет средств государственного задания по прикладным исследованиям в 2023 и 2024 гг. № 3-И23 плантации.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Анучин Н.П. Лесная таксация: учебник для вузов. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 552 с.

Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера. М.: Наука, 1989. 258 с.

Мелехов И.С. Лесоводство. М.: Изд-во МГУ, 2003. 320 с.

Моторина Л.В., Колесников Б.П. Программа и методика изучения техногенных биогеоценозов. М.: Наука, 1978. 227 с.

Парфененкова М. Сибирские ученые: лесная политика в России требует изменений // Ведомости. Экология: эл. изд. URL: <https://www.vedomosti.ru/ecology/regulation/articles/2022/01/26/906503-sibirskie-uchenie-lesnaya-politika-v-rossii-trebuet-izmenenii> (дата обращения: 19.02.2024).

Русин Н.С. Повышение продуктивности лесов путем создания плантационных культур быстрорастущих пород // Лесохозяйственная информация. 2008. № 3–4. С. 27–28.

Русин Н.С., Русина Л.М., Горевалова С.Ю. Клоны рода *Populus* L. для создания плантационных насаждений целевого назначения // Генетика и селекция лесных древесных растений. Воронеж, 2008. С. 116–124.

Сукачев В.Н. Избранные труды: в трех томах. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1972. 418 с.

Сунгурова Н.Р., Попкова И.А. Продуктивность сосновых насаждений при рекультивации песчаных карьеров // ИВУЗ. Лесной журнал. 2022. № 2. С. 50–58. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-50-58

Царев А.П., Царева Р.П. Гибридизация тополей и первичное испытание гибридных потомств в ЦЧР // Генетика, селекция, семеноводство и воспроизведение

ство древесных пород: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с между. уч., посвященной 100-летию со дня рождения профессора М.М. Вересина. Воронеж, 2010. С. 125–138.

Ширнин Ю.А., Рукомойников К.П., Гайсин И.Г., Ширнин А.Ю. Обоснование необходимости развития стратегии технологических процессов лесопользования на лесных плантациях // Лесной вестник. 2021. Т. 25, № 3. С. 49–57. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-3-49-57

Chaubey O.P., Bohre P. Restoration of Degraded Lands through Plantation Forests // The global scientific Journal Frontier Research. 2014. Vol. 14, no. C1. P. 19–27.

Daugaviete M., Lazdina D., Bambe B., Lazdins A., Makovskis K., Daugavietis U. Plantation Forests: A Guarantee of Sustainable Management of Abandoned and Marginal Farmlands // Energy Efficiency and Sustainable Lighting – A Bet for the Future. IntechOpen, 2020. P. 1–28. DOI: 10.5772/intechopen.88373.

Farooq T.H., Shakoor A., Wu Xiaohong, Li Yong, Rashid M.H., Zhang Xiang, Gilani M.M., Kumar U., Chen Xiaoyong, Yan Wende. Perspectives of plantation forests in the sustainable forest development of China // iForest – Biogeosciences and Forestry. 2021. Vol. 14, iss. 2. P. 166–174. DOI: 10.3832/ifor3551-014

Krupskaya L.T., Kovalev A.P., Shugalei I.V., Orlov A.M., Filatova M.Yu. Substantiation of biological methods for recreating the protective functions of forest areas contaminated with toxic solid waste from the mining industry // Russian Journal of General Chemistry. 2023. Т. 93, no. 13. P. 3285–3295.

Tsarev A.P., Tsareva R.P., Tsarev V.A. Poplar testing and breeding in the central chernozem region of Russia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 392. Art. no. 012010.

References

Anuchin N.P. Forest taxation. Textbook for universities. M.: Forest industry, 1982. 552 p. (In Russ.)

Chaubey O.P., Bohre P. Restoration of degraded lands with the help of forest plantations. *Global Scientific Journal Frontier Research*, 2014, vol. 14, no. C1, pp. 19–27.

Daugaviete M., Lazdina D., Bambe B., Lazdins A., Makovskis K., Daugavietis U. Plantation Forests: A Guarantee of Sustainable Management of Abandoned and Marginal Farmlands. *Energy Efficiency and Sustainable Lighting – A Bet for the Future*. IntechOpen, 2020, pp. 1–28. DOI: 10.5772/intechopen.88373

Farooq T.H., Shakoor A., Wu Xiaohong, Li Yong, Rashid M.H., Zhang Xiang, Gilani M.M., Kumar U., Chen Xiaoyong, Yan Wende. Perspectives of plantation forests in the sustainable forest development of China. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, 2021, vol. 14, iss. 2, pp. 166–174. DOI: 10.3832/ifor3551-014

Krupskaya L.T., Kovalev A.P., Shugalei I.V., Orlov A.M., Filatova M.Yu. Substantiation of biological methods for recreating the protective functions of forest

areas contaminated with toxic solid waste from the mining industry. *Russian Journal of General Chemistry*, 2023, vol. 93, no. 13, pp. 3285–3295.

Melekhov I.S. Forestry. M.: Publishing House of Moscow State University, 2003. 320 p. (In Russ.)

Motorina L.V., Kolesnikov B.P. Program and methodology for studying technogenic biogeocenoses. M.: Nauka, 1978. 227 p. (In Russ.)

Parfenenkova M. Siberian scientists: forest policy in Russia requires changes. *Vedomosti. Ecology: el. publ.* URL: <https://www.vedomosti.ru/ecology/regulation/articles/2022/01/26/906503-Siberian-teaching-forestry-policy-in-Russia-requires-changes> (accessed February 19, 2024). (In Russ.)

Rusin N.S. Increasing forest productivity by creating plantation crops of fast-growing species. *Forestry information*, 2008, no. 3–4, pp. 27–28. (In Russ.)

Rusin N.S., Rusina L.M., Gorevalova S.Yu. Clones of the genus Populus L. for the creation of plantation plantations for special purpose. *Genetics and breeding of forest woody plants.* Voronezh, 2008, pp. 116–124. (In Russ.)

Shirnin Yu.A., Rukomoynikov K.P., Gaisin I.G., Shirnin A.Yu. Justification of the need to develop a strategy for technological processes of forest management on forest plantations. *Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 3, pp. 49–57. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-3-49-57. (In Russ.)

Sukachev V.N. Selected works: in three volumes. L.: Nauka. Leningr. publishing house, 1972. 418 p. (In Russ.)

Sungurova N.R., Popkova I.A. Productivity of pine plantations during reclamation of sand pits. *IVUZ. Forestry Journal*, 2022, no. 2, pp. 50–58. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-50-58. (In Russ.)

Tsarev A.P., Tsareva R.P. Hybridization of poplars and primary testing of hybrid offspring in the Central Park. *Genetics, breeding, seed production and reproduction of tree species: materials of the All-Russian sci.- pract. conf. with international participation dedicated to the 100th anniversary of the birth of prof. M.M. Veresin.* Voronezh, 2010, pp. 125–138. (In Russ.)

Tsarev A.P., Tsareva R.P., Tsarev V.A. Testing and selection of poplars in the central chernozem region of Russia. *IOP conference series: Science of the Earth and the Environment*, 2019, vol. 392, art. no. 012010.

Vernadskiy V.I. Biosphere and noosphere. M.: Nauka, 1989. 258 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 19.03.2024

Филатова М.Ю., Крупская Л.Т., Леоненко А.В. Перспективы плантационного лесовыращивания на рекультивированных землях Дальневосточного федерального округа // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 252. С. 155–169. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.155-169

В статье рассмотрены перспективы плантационного лесовыращивания на землях, нарушенных в результате работы ресурсодобывающих предприятий. В настоящее время одной из важнейших проблем является уменьшение лесных ресурсов, используемых в деревоперерабатывающей промышленности. Восстановление древостоя на обезлесенных участках позволит не только решить этот вопрос, но и улучшить экологическую обстановку в регионах за счет восстановления деградированных земель и продуцирования фитомассы в виде древесного сырья. Объектами исследования послужили: лесные экосистемы, включая характеристики древостоев (полнота, возраст, прирост; почвогрунты, световой режим, температура); рекультивированные земли; сеянцы и черенки лиственницы и др. хвойных и лиственных пород; природно-климатические факторы. В связи с этим цель исследования состояла в определении перспектив создания лесных плантаций, в том числе на рекультивированных территориях, нарушенных в прошлом веке горнопромышленной деятельностью, для снижения негативного ее воздействия. Проведенные экспериментальные исследования по разработке технологии создания лесных плантаций на рекультивированных участках Кавалеровского лесничества Приморского края, свидетельствуют о том, что самые высокие показатели укоренения черенков тополя выявлены у сортов Пионер, Волосистоплодный, Китайский, Мариландика, Брабантика-175, Стройн в вариантах с применением следующих биоактиваторов: янтарная кислота, гуминол, ростивин. Выявлено, что состояние саженцев лиственницы, сосны, дуба, клена оказалось удовлетворительным. Постановка экспериментов в оранжерее «ДальНИИЛХ» и в производственных условиях на рекультивированном участке Кавалеровского лесничества (Приморский край) позволила выявить возможность успешного выращивания плантационных лесных насаждений, а именно посадкой черенками акклиматизированного тополя и саженцами древесных культур с использованием следующих биоактиваторов (биологически активных веществ): гуминола, ростивина, корневина и янтарной кислоты. Проведенные исследования позволяют сделать предварительный вывод, что при выращивании черенков тополя на плантации можно рекомендовать использование янтарной кислоты и гуминола.

Ключевые слова: лесная рекультивация, черенок, техногенное загрязнение, обеспечение экологической безопасности, устойчивость природной среды, биоактиватор.

Filatova M.Yu., Krupskaya L.T., Leonenko A.V. Prospects of plantation forest cultivation on reclaimed lands of the Far Eastern Federal District. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 252, pp. 155–169 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.155-169

The article considers the prospects of plantation forest cultivation on lands disturbed as a result of the work of resource-extracting enterprises. Currently, one of the most important problems is the reduction of forest resources used in the wood processing industry. Restoration of forest stands on deforested areas will not only solve this problem, but also improve the ecological situation in the regions due to the restoration of degraded lands and the production of phytomass in the form of wood raw materials. The objects of the study were: forest ecosystems, including the characteristics of tree stands (fullness, age, growth; soils, light conditions, temperature); reclaimed lands; seedlings and cuttings of larch and other coniferous and deciduous species; natural and climatic factors. In this regard, the aim of the study was to determine the prospects for creating forest plantations, including on reclaimed areas disturbed by mining activities in the last century, to reduce their negative impact. The experimental studies conducted to develop a technology for creating forest plantations on reclaimed areas of the Kavalerovsky forestry in Primorsky Krai indicate that the highest rooting rates of poplar cuttings were found in the varieties Pioner, Volosistoplodny, Kitaysky, Marilandika, Brabantika-175, Stroyn in variants using the following bioactivators: succinic acid, huminol and rostivin. It was found that the condition of larch, pine, oak and maple seedlings was satisfactory. Experiments in the greenhouse of "DalNIILH" and in production conditions, on the reclaimed site of Kavalerovsky forestry (Primorsky Krai) allowed to identify the possibility of successful cultivation of plantation forest plantations, namely: planting cuttings of acclimatized poplar and seedlings of tree crops using the following bioactivators (biologically active substances): huminol, rostivin, rootin and succinic acid. The conducted studies allow to make a preliminary conclusion that when growing poplar cuttings on a plantation, it is possible to recommend the use of succinic acid and huminol.

Keywords: forest reclamation, cuttings, man-made pollution, environmental safety, environmental sustainability, bioactivator.

ФИЛАТОВА Мария Юрьевна – старший научный сотрудник Дальневосточного научно-исследовательского института лесного хозяйства, кандидат технических наук. SPIN-код: 9944-1983. ORCID: 0000-0002-2212-9783.

680020, ул. Волочаевская, д. 71, г. Хабаровск, Россия. E-mail: filatovamariya@mail.ru.

FILATOVA Maria Yu. – PhD (Technical), Senior Researcher of the Far Eastern Scientific Research Institute of Forestry. SPIN-code: 9944-1983. ORCID: 0000-0002-2212-9783.

680020. Volochaevskaia str. 71. Khabarovsk. Russia. E-mail: filatovamariya@mail.ru.

КРУПСКАЯ Людмила Тимофеевна – главный научный сотрудник Дальневосточного научно-исследовательского института лесного хозяйства, доктор биологических наук, профессор. SPIN-код: 5997-3143. ORCID: 0000-0002-4479-4047.

680020, ул. Волочаевская, д. 71, г. Хабаровск, Россия. E-mail: ecologiya2010@yandex.ru

KRUPSKAYA Lyudmila T. – DSc (Biological), Chief Scientific Researcher of the Far Eastern Scientific Research Institute of Forestry, Professor. SPIN-code: 5997-3143. ORCID: 0000-0002-4479-4047.

680020. Volochaevskaia str. 71. Khabarovsk. Russia. E-mail: ecologiya2010@yandex.ru

ЛЕОНЕНКО Анна Валерьевна – научный сотрудник Института горного дела ДВО РАН Хабаровского федерального исследовательского центра ДВО РАН. SPIN-код: 4669-4993. ORCID: 0000-0002-0499-7675.

680000, ул. Тургенева, д. 51, г. Хабаровск, Россия. E-mail: 334212@mail.ru

LEONENKO Anna V. – Scientific Researcher, Institute of Mining of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. SPIN-code: 4669-4993. ORCID: 0000-0002-0499-7675.

680000. Turgenev str. 51. Khabarovsk. Russia. E-mail: 334212@mail.ru

С.Н. Штрахов, Д.А. Данилов, Д.А. Зайцев

**ОСОБЕННОСТИ СМОЛОВЫДЕЛЕНИЯ В ДРЕВОСТОЯХ СОСНЫ
(*PINUS SYLVESTRIS L.*) РАЗНОГО СОСТАВА
И ТОВАРНОЙ СТРУКТУРЫ В ЧЕРНИЧНОМ ТИПЕ ЛЕСА**

Введение. В настоящее время объем добычи сосновой живицы в России заметно снизился по причине общего спада производства в стране и высокой трудоемкости подсочного производства. Максимальный объем заготовки живичной массы был достигнут в 1965 году и составил 198,2 тыс. тонн [Пастухова, 2017]. По данным интернет-порталов объем спроса на рынке канифоли и смоляных кислот в России в 2022 году составил 30138 тонн, что ниже объема рынка предыдущего года на 39,5% [Анализ..., 2022]. Доля импортной продукции в 2021 году составила 26,3%, в следующем году данный показатель увеличился до 42,4%. На сегодняшний день Беларусь является лидером по производству живичной канифоли в СНГ, производя около 5 тыс. тонн и занимая 20% на российском рынке. При этом емкость отечественного рынка белорусами оценивается в 100 тыс. тонн [Клюев, Прокопчук, 2017]. Несмотря на это, спрос на живицу и продукты ее переработки остался стабильным, а нехватка сырья компенсируется за счет различных синтетических заменителей, поставляемых из Китая [Пастухова, 2017]. При этом в мире ежегодно собирается около 800 тыс. тонн хвойной живицы, из которых две трети поступает из Китая [Анализ..., 2022]. Вопрос импортозамещения продуктов заготовки и переработки живицы ввиду сложившейся ситуации встает достаточно остро [Горкин, 2019]. В связи с вышеизложенным, актуальность исследований по данной проблематике на сегодняшний день имеет особенную значимость.

Подсочка базируется, как правило, на эксплуатации сосновых древостоев. Сосна обыкновенная, произрастающая на территории России, имеет более низкую по сравнению с другими видами сосен смолопродуктивность, хотя основной объем живицы и добывается в древостоях этого вида сосны [Пастухова, 2017]. При проведении подсочки большой интерес вызывают деревья с повышенной способностью выделять живичную массу. Использование низкосмолопродуктивных деревьев делает нерентабельным подсочное производство, поэтому необходимо уметь распознать деревья

с наименьшим выходом живицы до начала подготовительных работ при заготовке добываемого сырья. Наиболее рациональным мероприятием по совершенствованию подсочного производства и повышению его рентабельности является улучшение природы самого объекта эксплуатации, то есть улучшение биологической естественной смолопродуктивности сосновых древостоев, особенно в насаждениях с разной долей участия сосны [Ярунов, Петрик, 2002].

На количество выделяемой живицы влияют условия произрастания древостоя, лесоводственно-таксационные признаки насаждений, а также морфологические и биометрические критерии насаждений и макроструктурные показатели древесины. Основным показателем, который существенно влияет на процессы смолообразования и смоловыделения, а также имеет сложные и многогранные связи с сосновыми насаждениями, являются условия местопроизрастания древостоев [Фролов, Штрахов, 2009; Новоселов и др., 2014]. Наиболее продуктивными считаются черничные и брусничные местообитания [Пастухова и др., 2018]. В таких древостоях могут встречаться как деревья с низкой продуктивностью, так и с высокой, что делает важным вопрос их дифференциации в конкретном лесном массиве [Пастухова и др., 2014]. Уход за лесом также влияет на смолопродуктивность насаждений [Петрик, 2002; Беляева, Данилов, 2014; Пастухова, Антонов, 2014].

Согласно действующим правилам (Приложение к приказу Минприроды России от 09.11.2020 № 911 «Правила заготовки живицы») в подсочку могут передаваться лесные насаждения с долей участия сосны в составе древостоя менее 40% от общего запаса древесины лесного насаждения. В подсочку передаются спелые и перестойные лесные насаждения сосны I–IV классов бонитета. В разновозрастных сосновых насаждениях, в которых предусматривается проведение выборочных рубок, подсочка может проводиться за 10 лет до проведения рубки. При этом подсочка должна проводиться только в отношении деревьев, подлежащих рубке в первый прием. В связи с вышеизложенным целью проводимого исследования было определение смолопродуктивности сосны в насаждениях с разной долей её участия.

Материалы и методика исследования. Опытными объектами для исследования смолопродуктивности сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) являлись спелые древостои с разной долей участия сосны на постоянных пробных площадях, заложенных сотрудниками ЛенНИИЛХа [Филиппов, Пирогов, 2001]. Данные объекты были заложены для изучения естественной динамики хода роста насаждений, поэтому древостои сформировались

без лесохозяйственного воздействия и ныне относятся к Дружносельскому участковому лесничеству в Гатчинском районном лесничестве Ленинградской области [Проект..., 2001]. Исследования смолопродуктивности в чистых по составу древостоях сосны проводились на пробных площадях с различными вариантами рубок ухода и комплексного ухода, заложенных в начале 70-х гг. С.Н. Сенновым в том же лесничестве. Рубки ухода проводились средней интенсивности, вносимое удобрение – азот 120 кг/га по д.в. [Сеннов, 1984, 2001]. Все исследуемые насаждения относятся к черничному типу леса, объединены сходством почвенно-грунтовых условий и находятся в смежных кварталах лесничества (40 и 48). Характеристики насаждений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Таксационные характеристики древостоев на опытных объектах

Taxation characteristics of forest stands at experimental sites

№ ППП	Состав и возраст древостоя на 2023 год	Тип леса	Средняя высота, м	Средний диаметр, см	Запас, м ³ /га
14	6C ₉₀ 3E ₉₀ 1Б ₉₀	С.ЧВО	24	24	495
16А	8C ₉₀ 2E ₉₀ +Б ₈₀	С.ЧС	24	22	370
16Б	5C ₉₀ 4E ₉₀ 1Б ₈₀	С.ЧО	24	22	405
22	8C ₉₀ 2E ₉₀ +Б ₉₀ , Oc ₈₀	С.ЧС	28	28	360
23	9C ₉₅ 1E ₈₀ +Б ₉₅ , Oc ₈₅	С.ЧС	28	28	475
12-1	10C ₉₀	С.ЧВО	24	24	345
12-2	10C ₉₀	С.ЧВО	25	26	380
12-3	10C ₉₀	С.ЧВО	25	28	375

Примечание: С.ЧВО – черничник влажный осушенный; С.ЧС – черничник свежий; С.ЧО – черничник осушенный

На сегодняшний день существует несколько методов ускоренного определения смолопродуктивности сосновых древостоев, имеющих свои особенности, трудозатраты и точность опыта [Горкин и др., 2017; Бегунков, Бегункова, 2023]. Выбор метода зависит от технических возможностей и лесоводственно-таксационных показателей древостоя. Самое распространенное определение осуществляется по прямому признаку – выходу живицы [Петрик, 2004]. Поэтому важно определить наиболее точный метод определения смолопродуктивной способности отдельного дерева и древостоя.

Согласно ОСТ 13-80-79 «Подсочка деревьев хвойных пород. Термины и определения» для определения выхода живицы из дерева используется метод с односторонней карой шириной 10 см, который позволяет получить точные результаты с одной подновки. Однако этот метод требует значительных затрат времени и усилий, что делает его применение не всегда целесообразным, а в некоторых случаях даже невозможным. В связи с этим разработаны альтернативные методы, которые позволяют быстрее определить смолопродуктивность сосновых насаждений. Эти методы менее точные, но требуют меньше трудозатрат.

Существует метод микроранений, который был предложен Высоцким в 1983 г. [Пастухова и др., 2014]. Такой метод менее трудоемок и практически не оказывает влияния на жизнедеятельность деревьев (размеры ранений минимальные), но дает возможность определять в основном только относительную смолопродуктивность. Способ заключается в том, что на дерево пробойником наносится по одному круглому микроранению диаметром 5 мм и глубиной 4-5 мм. Далее в рану вставляется полиэтиленовая трубка того же диаметра длиной 100 см. Затем через 24 ч по длине выделившейся и накопившейся в трубке живицы судят о смолопродуктивной способности дерева. Главный недостаток данного метода – зависимость от качества нанесения ранений, так как при их малой площади даже незначительные изменения глубины могут привести к большим колебаниям по длине в выходе живицы. Существует еще один метод ускоренного определения смолопродуктивности сосновых насаждений, который был предложен Проказиным – метод сверления [Пастухова, 2017]. Суть способа заключается в том, что кору дерева подрумянивают, не доходя до луба, а затем с помощью сверла диаметром 16 мм делают отверстие на глубину 10 мм и прикрепляют смолоприемник с пробиркой, куда и поступает живица через отводную трубку. При сопоставлении данных этого метода с результатами обычной (без химического воздействия) подсочки автором способа установлена тесная связь абсолютных показателей, которая выражается коэффициентами прямолинейной корреляции $R = 0,63...0,85$. Один ускоренный способ определения смолопродуктивности сосны, предложенный Хировым и Невзоровым в 1965 г., осуществляется с помощью насечек луба [Петрик, Ярунов, 1997]. На стволе дерева зачищается грубая кора на высоте груди и метчиком проводится вертикальный желоб. Верх желоба расширяют до небольшой площадки и на ней небольшим сверлом высекают кружок луба. Смолопродуктивность дерева определяется через 24 ч после нанесения ранения.

Предложенный Петриком и Яруновым способ заключается в подрумянивании коры дерева на высоте груди, где затем специальным молотком со встроенным в него лезвием наносится ранение [Петрик, Ярунов, 1997]. По истечении 10 ч измеряется длина потока живицы. Данный метод и использовался как базовый в нашем исследовании.

Учет на пробных площадях проводился с использованием четырехсанитметровых ступеней толщины. Отбор деревьев осуществлялся с равномерным охватом всех ступеней на пробных площадях. По действующим нормативам пригодными для проведения подсочки являются здоровые, без значительных повреждений деревья с диаметром ствола сосны 20 см и более, поэтому ряд распределения деревьев для отбора и определялся этими параметрами. Деревья были промаркованы, после чего проводилось удаление грубой коры с участка 100–120 см на высоте 1,3 м от уровня земли. На обработанной поверхности на высоте 1,3 м наносилось микроранение диаметром и глубиной 5 мм под углом в 45°. Через 10 ч у каждого дерева измерялся поток живицы. Химическое воздействие не применялось, были охвачены только неповрежденные, здоровые деревья сосны. На обработанные участки ствола наносилось по четыре ранения, расположенных по направлениям сторон света. По истечении установленного времени была проведена оценка длины потоков живицы, после чего вычислено среднее арифметическое значение потока на одно дерево, а также для каждой категории толщины и для всего лесного массива в целом. Измерения осуществлялись ежемесячно в летний период 2023 г., чтобы обеспечить надежные результаты и оценить влияние месяца на продуктивность смолы.

Для последующей статистической обработки использовались программы Microsoft Excel и Statistica 11. Для анализа влияния факторов на показатели применялся однофакторный дисперсионный анализ, рассчитывался *F*-критерий Фишера. При сравнении средних значений по группам использовался *t*-критерий Стьюдента [Бондаренко, Жигунов, 2016].

Результаты исследования. Влияние месяца сбора на показатель смолопродуктивности было достоверно определено только на одном объекте – ППП-23. Разница между июлем и августом по показателям смолопродуктивности составила по средним значениям подтека насаждения 40,2 против 49,6 (значение расчетного *t*-критерия для зависимых выборок составило 2,92 при *p* = 0,027). На остальных семи опытных объектах значимого на уровне 95% влияния месяца лета на смолопродуктивность не наблюдается. В связи с этим в дальнейшем рассматривалась средняя смолопродуктивность ступени толщины древостоя за летний период без разделения по месяцам сбора.

Относительно влияния направления сбора по сторонам света было определено, что в целом на исследуемых объектах значимых различий не наблюдается (табл. 2). Статистический анализ показал, что в чистых сосновнях несмотря на относительно большую разницу в средних значениях (Юг – 36,49 и Восток – 43,20), достоверные различия дисперсий групп отсутствуют.

Таблица 2

Средние показатели подтека живицы (см) на опытных объектах**Average indices of resin underflow (cm) on experimental sites**

№ ППП	Направление				
	Север	Юг	Запад	Восток	Среднее на ППП
Смешанные насаждения с преобладанием сосны					
ПП-14	47,39	47,73	43,75	51,29	47,54
ПП-16А	35,91	29,26	34,69	33,50	33,34
ПП-16Б	48,44	46,31	57,86	46,18	49,70
ПП-22	30,80	35,78	29,08	36,67	33,08
ПП-23	44,61	46,83	39,55	48,62	44,90
Среднее по направлению	41,43	41,18	40,98	43,25	-
Чистые сосновки					
ПП-12-1	41,53	43,04	29,88	50,10	41,14
ПП-12-2	37,67	27,45	30,08	31,92	31,78
ПП-12-3	42,47	38,97	51,75	47,59	45,19
Среднее по направлению	40,55	36,49	37,24	43,20	-

По представленным в табл. 2 средним значениям подтека по ППП можно наблюдать, что смолопродуктивность исследуемых древостоев не одинакова. Для выявления влияния состава и структуры древостоя на показатели смолопродуктивности сосны был проведён однофакторный дисперсионный анализ на основе полученных данных по пробным площадям. Гипотеза влияния состава и структуры насаждения на смолопродуктивность подтвердилась, $F_{расч} = 4,34$ при $p = 0,021$. С целью анализа наличия

разницы между ППП и группировками данных был проведен анализ по t -критерию. Полученные результаты подтвердили значимые различия по выделению живицы сосновой между пробными площадями с разным составом древостоя (табл. 3)

Таблица 3

***t*-критерий для независимых выборок по смолопродуктивности на опытных объектах с разной долей участия сосны в насаждении**

***t*-criterion for independent samples of resin productivity
in experimental sites with different proportion of pine in the stand**

Сравниваемые ППП	Среднее по группе 1	Среднее по группе 2	<i>t</i>	<i>v</i>	<i>p</i>	σ групп-группы 1	σ групп-группы 2	<i>F</i> -отн. дисп.	<i>p</i> -знач. дисп.
22 и 23	33,01	44,90	-2,03	18	0,057	13,90	7,56	3,38	0,146
22 и 16А	33,31	33,34	-0,01	23	0,995	13,90	13,29	1,09	0,889
22 и 16Б	33,31	49,70	-3,12	23	0,005	13,90	12,23	1,29	0,679
22 и 14	33,31	47,27	-2,46	24	0,021	13,90	15,02	1,17	0,793
23 и 16А	44,90	33,34	2,10	17	0,051	7,56	13,29	3,09	0,178
23 и 16Б	44,90	49,70	-0,93	17	0,364	7,56	12,23	2,62	0,249
23 и 14	44,90	47,27	-0,39	18	0,702	7,56	15,02	3,94	0,103
16А и 16Б	33,34	49,70	-3,14	22	0,005	13,29	12,23	1,18	0,788
16А и 14	33,34	47,27	-2,45	23	0,022	13,29	15,02	1,28	0,693
16Б и 14	49,70	47,27	0,44	23	0,664	12,23	15,02	1,51	0,505

Примечание: t – t -критерий Стьюдента; v – степени свободы; p – расчетный уровень значимости при тестировании с использованием t -критерия; σ – стандартное отклонение; F -отн. дисп. – расчетное значение F -критерия; p -знач. дисп. – расчетный уровень значимости при дисперсионном анализе. Жирным выделены показатели, значимые на уровне $p < 0,05$

Анализируя различия по смолопродуктивности сосны в древостоях с разным составом, можно отметить, что в ряде случаев они отсутствуют. Это в первую очередь связано фактически с равной долей участия сосны в составе насаждения, как например 80% сосны на ППП-22 и ППП-16А (табл. 1). Однако в ряде случаев при разной доле участия сосны в составе древостоя статистического различия не наблюдается. Вероятно, это связа-

но с тем, что в данных насаждениях деревья сосны находятся в оптимуме произрастания для продуцирования живицы и доля участия других пород не оказывает на них угнетающего воздействия в данных лесорастительных условиях. Необходимо отметить, что различия в показателях смолопродуктивности на ППП-23 с ППП-14 и ППП-16Б наблюдаются при p -уровне = 0,1, но не являются достоверными при заданном уровне значимости в 95% (табл. 3). При этом ППП-14 и ППП-16Б, имеющие в составе 60% и 50% сосны соответственно, имеют относительно однородные показатели по продуктивности. Таким образом, в насаждениях с различной долей сосны можно выделить 2 подгруппы по показателям смолопродуктивности – ППП-22 и ППП-16А и подгруппа ППП-23, ППП-16Б, ППП-14.

Для постоянных пробных площадей в чистых насаждениях сосны не было выявлено различий по выделению живицы между контрольной секцией и секцией с комплексным уходом, между остальными вариантами различия наблюдаются (табл. 4).

Таблица 4

***t*-критерий для независимых выборок по смолопродуктивности на опытных объектах в чистых сосновках**

***t*-criterion for independent samples of resin productivity in experimental sites with different proportion of pine in the clear pine stands**

Сравниваемые ППП	Среднее по группе 1	Среднее по группе 2	<i>t</i>	<i>v</i>	<i>p</i>	σ группы 1	σ группы 2	<i>F</i> -отн. дисп.	<i>p</i> -знач. дисп.
12-3 и 12-2	45,19	31,96	2,96	21	0,007	12,76	7,81	2,67	0,134
12-3 и 12-1	45,19	41,14	0,82	22	0,419	12,76	11,35	1,26	0,704
12-2 и 12-1	31,96	41,14	-2,24	21	0,036	7,81	11,35	2,11	0,250

Примечание: сокращения те же, что и в табл. 3

В данный момент на объекте с чистыми сосновыми насаждениями последствия уходов значительно сказались на ряде распределения деревьев по ступеням толщины. После проведения комплексного ухода формировалось насаждение со значительной представленностью крупных ступеней толщины 28-32 см, а в насаждении, затронутом только рубкой ухода, ряд распределения имеет перекос в левой части в сторону малых ступеней толщины 12-16 см, не пригодных для подсочки. В контрольном насаждении наблюдается близкое к нормальному распределение (рис. 1).

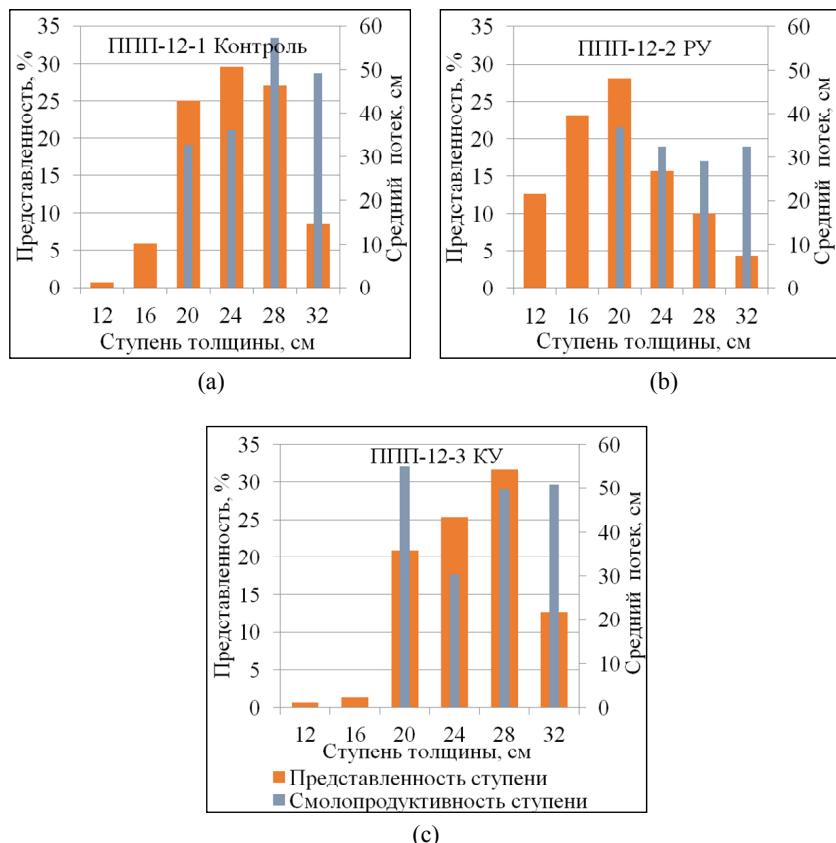


Рис. 1. Ряды распределения по ступеням толщины древостоя и показатели среднего потока смолы в чистых сосновых насаждениях:

(а) ППП-12-1 – контроль; (б) ППП-12-2, затронутая рубками ухода;
 (с) ППП-12-3, затронутая комплексным уходом

Fig. 1. Gradient distribution series of stand thickness and average resin runoff in pure pine stands: (a) Plot 12-1 – Control; (b) Plot 12-2 affected by thinning;
 (c) Plot 12-3 affected by complex maintenance

Общих закономерностей в корреляции представленности ступени толщины дерева в насаждении и её смолопродуктивности не наблюдается. Фактор влияния ступени толщины древостоя на смолопродуктивность присутствует на ППП-12-1 и 12-3 (табл. 5), на ППП 12-2 предварительный дисперсионный анализ не выявил значимого влияния фактора ступени,

в связи с этим в табл. 5 данные по анализу различий между ступенями толщины древостоя на данной ППП не представлены. В обоих рассмотренных случаях деревья сосны ступени толщины 20 см контрастно отличаются по смолопродуктивности от остальных. В контрольном насаждении – в меньшую сторону, а в насаждении, пройденном комплексным уходом – в большую сторону.

Таблица 5

***t*-критерий для независимых выборок по смолопродуктивности
в чистых сосняках**

***t*-criterion for independent samples of resin productivity in pure pine stands**

Сравни- ваемые ступени	Среднее по группе 1	Среднее по группе 2	<i>t</i>	<i>v</i>	<i>p</i>	$\sigma_{\text{группы } 1}$	$\sigma_{\text{группы } 2}$	<i>F</i> -отн. дисп.	<i>p</i> -знач. дисп.
Для ППП-12-1 (контроль)									
20 и 24	32,69	36,17	-0,49	14	0,630	11,54	16,27	1,99	0,385
20 и 28	32,69	57,33	-2,08	14	0,057	11,54	31,48	7,44	0,017
20 и 32	32,69	49,28	-2,38	14	0,032	11,54	15,99	1,92	0,409
24 и 28	36,17	57,33	-1,69	14	0,113	16,27	31,48	3,74	0,103
24 и 32	36,17	49,28	-1,62	14	0,127	16,27	15,99	1,04	0,964
28 и 32	57,33	49,28	0,64	14	0,529	31,48	15,99	3,88	0,095
Для ППП 12-3 (комплексный уход)									
20 и 24	54,93	30,30	4,15	30	<0,001	18,45	14,96	1,52	0,427
20 и 28	54,93	49,89	0,69	22	0,496	18,45	12,70	2,11	0,322
20 и 32	54,93	50,82	0,58	22	0,568	18,45	10,63	3,01	0,146
24 и 28	30,30	49,89	-3,17	22	0,004	14,96	12,70	1,39	0,685
24 и 32	30,30	50,82	-3,45	22	0,002	14,96	10,63	1,98	0,366
28 и 32	49,89	50,82	-0,16	14	0,876	12,70	10,63	1,43	0,651

Примечание: сокращения те же, что и в табл. 3

Для выявления сходств и различий в насаждениях с разным составом по смолопродуктивности был проведён анализ данных на пробных площадях в смешанных сосновых насаждениях по ступеням толщины. В связи со статистическими закономерностями, отмеченными выше, данные на части

ППП являлись однородными, поэтому выборки рассматривались по двум подгруппам. Одна из подгрупп имеет сходный состав, средняя структура и смолопродуктивность данной группы приведены на рис. 2. Единично встречаются деревья ступеней толщины 40–48 см.

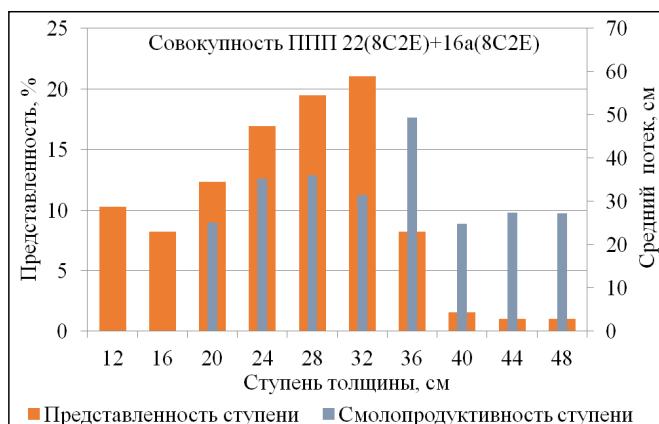


Рис. 2. Представленастъ деревьев сосны по ступеням толщины древостоя и длина потека смолы в модели насаждения с долей сосны 80%

Fig. 2. Representation of pine trees by diameter classes and resin flow length in model stands with 80% pine share

Полученные результаты показали, что в насаждении с долей участия сосны 80% в составе имеются значимые различия по выделению живицы по ступеням толщины. Для ступени 36 см смолопродуктивность статистически значимо выше всех остальных ступеней. Прослеживается тенденция уменьшения смолопродуктивности незначительно представленных толстых деревьев (всего по 1–2 такому дереву на пробной площади) от 40 до 48 см ступени толщины. Ступень толщины 40 см значимо отличается от ступени 28 см ($t_{расч} = -2,14$ при $p = 0,040$) и 36 см ($t_{расч} = 4,12$ при $p < 0,001$). От других ступеней на уровне значимости 95% она не отличается. По другим ступеням толщины показатели смолопродуктивности различаются незначимо.

Для совокупности участков с большей (ППП-23 – 90%) и меньшей долей участия сосны (ППП-16Б и ППП-14 – 50–60%) в составе насаждения прослеживается тенденция увеличения смолопродуктивности ступеней толщины 32 и 36 см. Показатели ступени толщины 32 см значимо отлича-

ются от остальных в большую сторону, однако со степенью толщины 36 см данные однородны ($t_{расч} = 1,70$ при $p = 0,096$). Если отобразить данную совокупность ППП, объединенных сходными показателями смолопродуктивности, в виде модели, то распределение и соответствующая степеням толщины продуктивность будут иметь вид, представленный на рис. 3.

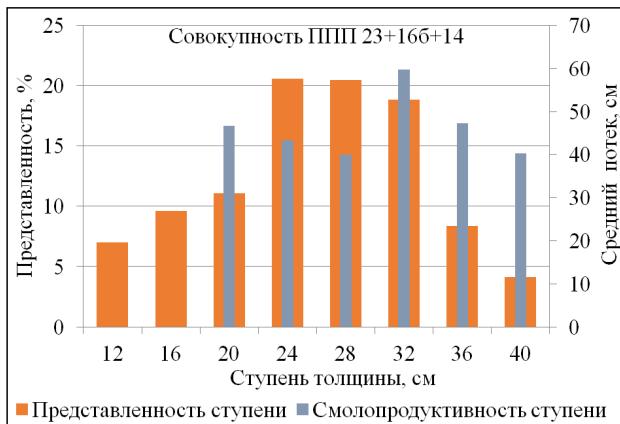


Рис. 3. Представленность деревьев сосны по ступеням толщины древостоя и длина потека смолы в модели насаждения с различной долей сосны

Fig. 3. Representation of pine trees by diameter classes and resin flow length in model pine stand

Заключение. Проведённое исследование показало неоднозначный характер влияния состава насаждения на смолопродуктивность сосны.

В ряде случаев не было выявлено явных различий между насаждениями с преобладанием сосны и древостоями с меньшей долей её участия. Вероятно, влияние количественной представленности деревьев по категориям крупности является более весомым фактором по смолопродуктивности в древостоях с различной долей участия сосны. В целом наблюдается тенденция большего выделения живицы с увеличением доли сосны в составе древостоя с ростом класса диаметра ствола. Для постоянных пробных площадей в чистых насаждениях сосны не было выявлено различий по выделению живицы между контрольной секцией и секцией с комплексным уходом. Однако между остальными вариантами наблюдаются значимые различия, что связано, так же как и в смешанных древостоях сосны, с различной долей представ-

ленности деревьев по ступеням крупности. Наиболее рациональным мероприятием по совершенствованию подсочного производства и повышению его рентабельности является улучшение природы самого объекта эксплуатации, то есть улучшение биологической естественной смолопродуктивности сосновых древостоев, особенно в насаждениях с разной долей участия сосны.

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

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Анализ рынка канифоли в России – 2022. Показатели и прогнозы. URL: <https://marketing.rbc.ru/research/35646> (дата обращения: 15.07.2024).

Бегунков О.И., Бегункова Н.О. Эффективность приживленного использования древесных ресурсов // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 10 (136). С. 1–4.

Беляева Н.В., Данилов Д.А. Закономерности функционирования сосновых и еловых фитоценозов на объектах рубок ухода и комплексного ухода за лесом: монография. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2014. 164 с.

Бондаренко А.С., Жигунов А.В. Статистическая обработка данных в лесном хозяйстве: учебное пособие. СПб.: СПбГЛТУ, 2016. 124 с.

Горкин А.И. О возможности переработки сосновой живицы на местах ее заготовки // ИВУЗ. Лесной журнал. 2019. № 1 (367). С. 96–105.

Горкин А.И., Иконникова О.В., Петрик В.В. Методы определения продуктивности сосновых насаждений по выходу живицы // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: матер. межд. науч.-тех. конф. Вологда: ВоГУ, 2017. С. 11–13.

Клюев А.Ю., Прокопчук Н.Р. Глубокая комплексная переработка живицы сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. 2017. №1(193). С. 41-53.

Новоселов А.С., Федяев А.Л., Петрик В.В. Влияние экологических условий на получение терпентина в осушенных сосновках Вологодской области // ИВУЗ. Лесной журнал. 2014. № 2 (338). С. 40-45.

Пастухова Н.О. Критерии смолопродуктивности сосновых древостоев: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Архангельск: САФУ, 2017. 19 с.

Пастухова Н.О., Антонов А.М. Лесоводственно-таксационные признаки смолопродуктивности сосновок и проект мероприятий по повышению выхода живицы // Международный студенческий научный вестник. 2014. № 3. URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=11891> (дата обращения: 15.07.2024).

Пастухова Н.О., Петрик В.В., Наквасина Е.Н., Горкин А.И. Связь морфологических признаков со смолопродуктивной способностью сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в гидроморфных и автоморфных типах леса // Вестник КрасГАУ. 2014. № 8 (95). С. 151–155.

Пастухова Н.О., Горкин А.И., Лебедева О.П. Сравнительный анализ смолопродуктивности сосны в разных лесорастительных условиях // ИВУЗ. Лесной журнал. 2018. № 2 (362). С. 49–57.

Петрик В.В. Лесоводственные методы интенсификации подсочки сосновых древостоев // ИВУЗ. Лесной журнал. 2002. № 3. С. 38–44.

Петрик В.В. Лесоводственные методы повышения смолопродуктивности сосновых древостоев. Архангельск: Изд-во Арханг. гос. техн. ун-та, 2004. 236 с.

Петрик В.В., Ярунов А.С. Точность ускоренных методов определения смолопродуктивности сосны // ИВУЗ. Лесной журнал. 1997. № 5. С. 125–130.

Проект организации и ведения лесного хозяйства ОЛХ «Сиверский лес» СПбНИИЛХа: пояснительная записка. СПб., 2001. 201 с.

Сеннов С.Н. Уход за лесом (экологические основы). М.: Лесн. пром-ть, 1984. 128 с.

Сеннов С.Н. Результаты длительных опытов с рубками ухода за лесом // Лесное хозяйство. 2001. № 2. С. 28–29.

Филиппов Г.В., Пирогов Н.А. Ход роста древостоев, не затронутых хозяйственным воздействием // Сб. тр. СПбНИИЛХ. 2001. Вып. 1(5). 32 с.

Фролов Ю.А., Штрахов С.Н. Основные показатели смолопродуктивности сосновых насаждений для расчета нормативов // ИВУЗ. Лесной журнал. 2009. № 3. С. 129–131.

Ярунов А.С., Петрик В.В. Перспективы подсочного производства и исследований в области подсочки // ИВУЗ. Лесной журнал. 2002. № 5. С. 30–35.

References

Analysis of rosin market in Russia – 2022. Indicators and forecasts. URL: <https://marketing.rbc.ru/research/35646> (assessed: 15.07.2024). (In Russ.)

Begunkov O.I., Begunkova N.O. Efficiency of lifetime utilization of wood resources. *International Research Journal*, 2023, no. 10 (136), pp. 1–4. (In Russ.)

Belyaeva N.V., Danilov D.A. Regularities of functioning of soybean and spruce phytocenoses on the objects of thinning and integrated forest care: a monograph. St. Petersburg: Polytechnic University Publishing House, 2014. 164 p. (In Russ.)

Bondarenko A.S., Zhigunov A.V. Statistical data processing in forestry: textbook. St. Petersburg: St. Petersburg State Forestry University Publishing House, 2016. 124 p. (In Russ.)

Filippov G.V., Pirogov N.A. Growth progress of stands not affected by economic impact. *Proceedings of the St. Petersburg Research Institute of Agriculture*, 2001, vol. 1(5). 32 p. (In Russ.)

Frolov Y.A., Shtrakhov S.N. Basic indices of resin productivity of pine plantations for calculation of norms. *IVUZ. Forestry Journal*, 2009, no. 3, pp. 129–131. (In Russ.)

Gorkin A.I. On the possibility of processing pine oleoresin at the places of its harvesting. *IVUZ. Forestry Journal*, 2019, no. 1 (367), pp. 96–105. (In Russ.)

Gorkin A.I., Ikonnikova O.V., Petrik V.V. Methods for determining the productivity of pine plantations based on oleoresin yields. *Actual problems of forest complex development: materials of the international sci.-tech. conf.* Vologda, 2017, pp. 11–13. (In Russ.)

Klyuev A.Y., Prokopchuk N.R. Deep complex processing of pine oleoresin (*Pinus sylvestris* L.). *Proceedings of BSTU. Series 2: Chemical Technologies, Biotechnology, Geoecology*, 2017, no. 1(193), pp. 41–53. (In Russ.)

Novoselov A.S., Fedyayev A.L., Petrik V.V. Influence of ecological conditions on terpentine production in drained pine forests of the Vologda Oblast. *Russian Forestry Journal*, 2014, no. 2 (338), pp. 40–45. (In Russ.)

Pastukhova N.O. Criteria of resin productivity of pine stands: author's abstract. Dis. ... Candidate of Agricultural Sciences. Arkhangelsk: NAFU, 2017. 19 p. (In Russ.)

Pastukhova N.O., Antonov A.M. Forest taxation indications of resin productivity of pine forests and the project of measures to increase the yield of oleoresin. *International Student Scientific Bulletin*, 2014, no. 3. URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=11891> (accessed July 15, 2024). (In Russ.)

Pastukhova N.O., Petrik V.V., Nakvasina E.N., Gorkin A.I. Relation of morphological features to the resin-productive capacity of the common pine (*Pinus sylvestris* L.) in hydromorphic and automorphic forest types. *The Bulletin of KrasGAU*, 2014, no. 8 (95), pp. 151–155. (In Russ.)

Pastukhova N.O., Gorkin A.I., Lebedeva O.P. Comparative analysis of pine resin productivity in different forest conditions. *IVUZ. Forestry Journal*, 2018, no. 2 (362), pp. 49–57. (In Russ.)

Petrik V.V. Forestry methods of intensification of pine stands under resin harvesting. *IVUZ. Forestry Journal*, 2002, no. 3, pp. 38–44. (In Russ.)

Petrik V.V. Forestry methods of increasing resin productivity of pine stands. Arkhangelsk: Arkhangelsk State Technical University Publishing House, 2004. 236 p. (In Russ.)

Petrik V.V., Yarunov A.S. Accuracy of accelerated methods for determining the resin productivity of pine trees. *IVUZ. Forestry Journal*, 1997, no. 5, pp. 125–130. (In Russ.)

Project of forestry organization and management in Siversky les Experimental Forestry of St. Petersburg Research Institute of Agriculture: explanatory note. St. Petersburg, 2001. 201 p. (In Russ.)

Sennov S.N. Forest care (Environmental Basics). Mocsow: Forest industry, 1984. 128 p. (In Russ.)

Sennov S.N. Results of long-term experiments with forest maintenance cuttings. *Forestry Journal*, 2001, no. 2, pp. 28–29. (In Russ.)

Yarunov A.S., Petrik V.V. Prospects of resin production and research in the field of resin harvesting. *IVUZ. Forestry Journal*, 2002, no. 5, pp. 30–35. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 19.08.2024

Штрахов С.Н., Данилов Д.А., Зайцев Д.А. Особенности смоловыделения в древостоях сосны (*Pinus sylvestris* L.) разного состава и товарной структуры в черничном типе леса // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 252. С. 170–187. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.170-187

Актуальность исследований по смолопродуктивности сосны на сегодняшний день имеет особую значимость, так как этот вопрос встает достаточно остро в связи с импортозамещением продуктов заготовки и переработки живицы. Подсочка живицы базируется, как правило, на эксплуатации сосновых древостоев, и при её проведении большой интерес вызывают деревья с повышенной способностью выделять живичную массу. Согласно действующим правилам заготовки живицы в Российской Федерации в подсочку могут передаваться лесные насаждения с долей участия сосны в составе древостоя не менее 40% от общего запаса древесины лесного насаждения. В связи с вышеизложенным целью проводимого исследования было определение смолопродуктивности сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в насаждениях с разной долей её участия. Опытными объектами для исследования смолопродуктивности сосны являлись спелые древостои сосны с долей её участия от 50 до 100% на постоянных пробных площадях в Ленинградской области. Для определения смолопродуктивности сосны применялся метод микроранений с последующим измерением потока через 10 ч. Проведённое исследование показало неоднозначный характер влияния состава насаждения на смолопродуктивность сосны. В ряде случаев не было выявлено явных различий между насаждениями с преобладанием сосны и древостоями с меньшей долей её участия. Вероятно, влияние количественной представленности деревьев по категориям крупности является более весомым фактором по смолопродуктивности в древостоях с различной долей участия сосны. В целом наблюдается тенденция большего выделения живицы с увеличением доли сосны в составе древостоя с ростом класса диаметра ствола. Для постоянных пробных площадей в чистых насаждениях сосны не было выявлено различий по выделению живицы между контрольной секцией и секцией с комплексным уходом. Однако между остальными вариантами наблюдаются значимые различия, что связано, так же как и в смешанных древостоях сосны, с различной долей представлена деревьев по ступеням крупности.

Ключевые слова: сосновые древостои, подсочка, живица, смолопродуктивность, недревесное пользование лесом.

Shtrakhov S.N., Danilov D.A., Zaytsev D.A. Specific aspects of resin production in pine (*Pinus sylvestris* L.) stands of different stand composition and commodity structure in the blueberry forest type. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 252, pp. 170–187 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.170-187

The relevance of research on this issue today is of particular importance, because in connection with the current situation the issue of import substitution of products of harvesting and processing of oleoresin is quite acute. Oleoresin extraction is based, as a rule, on the exploitation of pine stands, and during its realization the trees with increased ability to produce oleoresin mass are of great interest. According to the current rules of oleoresin harvesting in the Russian Federation, the following forest stands can be transferred for exploitation: forest stands with the share of pine in the stand composition of not less than 40% of the total wood stock of the forest stand. In connection with the above-mentioned, the purpose of this study was to determine the resin productivity of pine in stands with different shares of pine (*Pinus sylvestris* L.). Experimental objects for the study were mature stands of pine with the share of its participation from 50 to 100% on permanent sample plots in the Leningrad region. To determine the resin productivity of pine trees, the micro-wounding method was used followed by flow measurement after 10 hours. The study showed that the influence of stand composition on pine resin productivity is not unambiguous. In some cases, no clear differences were found between pine-dominated stands and stands with a lower proportion of pine. Probably, the influence of quantitative representation of trees by size categories is a more significant factor in resin productivity in stands with a different proportion of pine. In general, there is a tendency for greater oleoresin extraction as the proportion of pine in the stand increases with increasing trunk diameter class. For the permanent sample plots, in pure pine stands, no differences in oleoresin extraction were found between the control section and the section with integrated management. However, a significant difference was observed between the other variants, which is related, as well as in mixed pine stands, to the different proportion of tree representation by size stages.

Keywords: pine stands, resin harvesting, oleoresin, resin productivity, non-timber forest use.

ШТРАХОВ Сергей Николаевич – начальник департамента лесного хозяйства по Северо-Западному федеральному округу.

194021, Институтский пр., д. 21, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: info@szfo.rosleshoz.gov.ru

SHTRAKHOV Sergey N. – Head of the Forestry Department for the North-West Federal District.

194021. Institutskiy pr. 21. St. Petersburg. Russia. E-mail: info@szfo.rosleshoz.gov.ru

ДАНИЛОВ Дмитрий Александрович – заведующий кафедрой почвоведения Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 5826-3852. ORCID: 0000-0002-7504-5743.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: stown200@mail.ru

DANILOV Dmitriy A. – DSc (Agriculture), Head of Soil Science Department, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 5826-3852. ORCID: 0000-0002-7504-5743.

194021. Institutsky per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: stown200@mail.ru

ЗАЙЦЕВ Дмитрий Андреевич – старший научный сотрудник отдела агрохимии и агроландшафтов Ленинградского НИИСХ «Белогорка» – филиала Федерального исследовательского центра картофеля имени А.Г. Лорха, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 1340-0849. ORCID: 0000-0002-8704-6516.

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

ZAYTSEV Dmitriy A. – PhD (Agriculture), 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. Leningrad Region. Russia. E-mail: disoks@gmail.com

Д.М. Черниховский

**ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ
СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ SENTINEL-2
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕОБЛАДАЮЩИХ ДРЕВЕСНЫХ ПОРОД
ПРИ ТАКСАЦИИ ЛЕСОВ**

Введение. Дистанционные способы таксации лесов указаны наряду с другими (наземным, рационального сочетания и актуализации) в действующей Лесоустроительной инструкции¹. К дистанционным способам относятся аналитико-измерительное дешифрирование материалов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и автоматизированная обработка и анализ материалов ДЗЗ (ст. 209 и 211 Инструкции). Таксация лесов путем аналитико-измерительного дешифрирования с применением фотограмметрического программного обеспечения в последние годы активно применяется в лесоустроительном производстве государственными и частными компаниями. Стадии разработки, апробации и внедрения технологии аналитико-измерительного дешифрирования отражены в публикациях [Архипов и др., 2014а, б; Березин, Черниховский, 2019; Черниховский, 2020]. Методика работ опубликована [Архипов и др., 2021] и находится в открытом доступе².

К известным недостаткам таксации путем аналитико-измерительного дешифрирования относят низкий уровень автоматизации работ и субъективность определения таксационных характеристик. При аналитическом (визуальном) дешифрировании процесс обучения специалистов проходит через просмотр сотен снимков вместе с тесным изучением условий окружающей среды и наблюдаемых процессов. Успех в дешифрировании материалов ДЗЗ зависит от опыта и подготовки дешифровщика, природы дешифрируемых объектов или явлений и качества используемых снимков. Опытным дешифровщикам, как правило, присущи острая наблюдательность в сочетании с воображением и большим терпением [Lillesand et al., 2015].

Определение породного состава относится к ключевым задачам таксации лесов. Изучение признаков дешифрирования древесных пород и

¹ Лесоустроительная инструкция. Утверждена приказом Минприроды России от 5 августа 2022 года № 510.

² <https://lesproekt.org/?p=index>

насаждений на материалах съемки происходит в процессе полевой и камеральной тренировки. Для организации тренировки в пределах конкретного объекта лесоучётных работ закладывается таксационно-дешифровочный полигон [Архипов и др., 2021]. К итоговым результатам анализа признаков дешифрирования относятся сводные таблицы признаков с пошаговым определением достоверности дешифрирования. Алгоритм статистической обработки признаков дешифрирования [Данюолис и др., 1980] реализован в программном продукте Photomod StereoMeasure³ (рис. 1).

Одной из практических проблем, возникающих в процессе аналитико-измерительного дешифрирования, является трудность разделения близких по признакам дешифрирования древесных пород. Для условий Ленинградской области к таким породам могут относиться, например, береза и осина, береза и ольха черная. Сходство и различие древесных пород по признакам дешифрирования зависят от географического положения, параметров и времени проведения съемки, особенностей камеры и иных факторов.

Важной научно-практической задачей является поиск новых подходов, способствующих правильному определению древесных пород при дешифрировании. К возможным направлениям решения данной задачи относятся различные многочисленные алгоритмы автоматизированной классификации материалов ДЗЗ [Воробьев и др., 2015; Курбанов и др., 2018; Али и др., 2020; Тарасова, 2023; Дмитриев и др., 2024]. Перспективным направлением при изучении лесов по материалам ДЗЗ является использование вегетационных индексов [Пушкин и др., 2020]. Вегетационные индексы широко используются для оценки повреждения лесов насекомыми [Крылов и др., 2011; Рахматуллина и др., 2021; Сультсон и др., 2023; Abdullah, 2019; Abdullah et al. 2019a, b; Alekseev, Chernikhovskii, 2021, 2022; Georgiev et al., 2022] и пожарами [Стыценко и др., 2019], проведения гидромелиоративных исследований [Пахучий, Пахучая, 2014; Пахучий, Шевелев, 2016], классификации растительного покрова [Али и др., 2020], оценки состояния лесных культур [Копытков, Гусев, 2023], оценки зарастания сельскохозяйственных земель древесными породами [Мартынова и др., 2020] и иных задач при изучении лесов, сельскохозяйственных угодий, мониторинге, картографировании [Пушкин и др., 2020; Гусев, 2021]. На сезонную и многолетнюю изменчивость вегетационных индексов лесных насаждений может влиять содержание хлорофиллов в хвое [Силкина, Винокурова, 2009], различия в стадиях лесообразования, возрасте, типе леса, составе, группе [Жирин и др., 2014, 2016]. Разные вегетационные индексы обладают различной сезонной изменчивостью.

³ <https://racurs.ru/program-products/photomod-stereomeasure/>

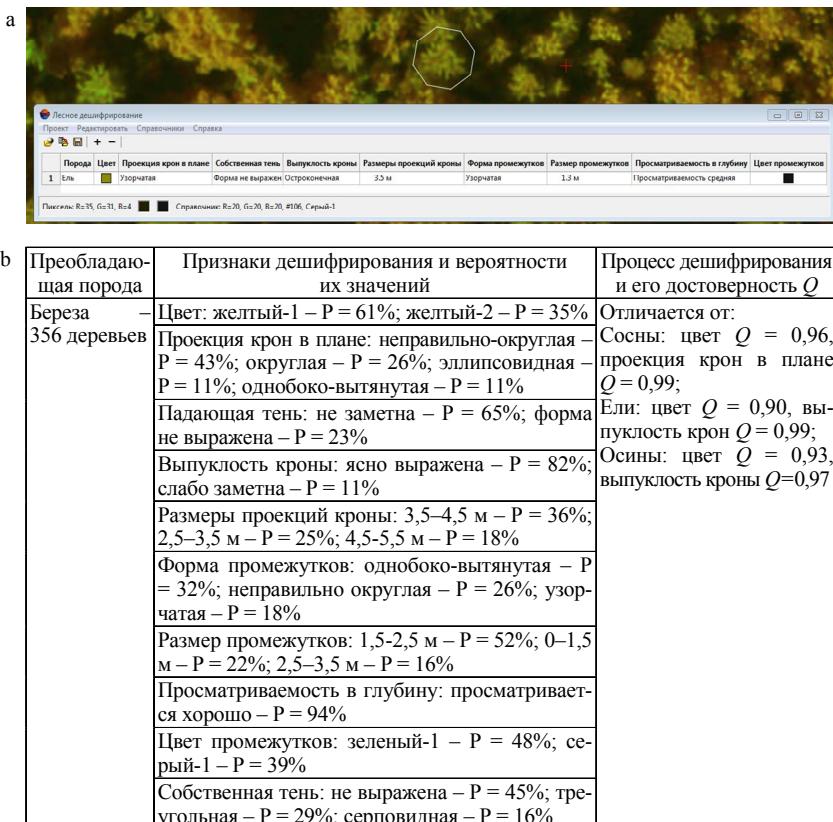


Рис. 1. Этапы анализа признаков дешифрирования в программе Photomod StereoMeasure: а – процесс заполнения таблицы признаков дешифрирования отдельных деревьев; б – фрагмент итоговой таблицы признаков дешифрирования с определением достоверности дешифрирования

Fig. 1. Stages of the analysis of decryption signs in the Photomod StereoMeasure program: a – the process of filling in the table of decryption signs of individual trees; b – a fragment of the final table of decryption signs with the determination of the reliability of decryption

Цель исследования заключалась в оценке целесообразности применения многозональных космических снимков в качестве дополнительных материалов для определения древесных пород при аналитико-измерительном дешифрировании. Задачи исследования состояли в выборе лесотаксационных выделов с преобладанием основных лесообразующих пород для модельной территории, получении материалов многозональной космической

съемки, оценке спектральных характеристик выбранных участков и статистическом анализе результатов.

Материалы и методика исследования. В качестве модельной территории выбрана Лисинская часть Учебно-опытного лесничества (бывший Лисинский учебно-опытный лесхоз), расположенная в Тосненском муниципальном районе Ленинградской области. Это компактный лесной массив с длительной лесокультурной и научной историей, который представляет собой типичный образец интенсивного лесного хозяйства данного лесного района⁴. Последнее лесоустройство лесничества было проведено в 2021 г. Территория относится к Балтийско-Белозерскому таежному району Российской Федерации. Все леса относятся к защитным, представленным преимущественно ценными лесами, имеющими научное или историческое значение. Средний состав насаждений по данным ГЛР на 01.01.2023 3Е2С3Б2Ос, средний возраст 88 лет, средний класс бонитета 2,3, средняя полнота 0,65⁵.

Методика работ включала выбор лесотаксационных выделов с преобладанием основных лесообразующих пород из геоинформационных баз данных лесоустройства, получение материалов многозональной космической съемки Sentinel-2 за отдельные месяцы вегетационного периода 2021 г., определение спектральных характеристик и вегетационных индексов выбранных участков и статистический анализ.

На основе анализа литературы [Черепанов, Дружинина, 2009; Черепанов, 2011; Пахучий, Шевелев, 2016; Стыценко и др., 2019; Мартынова и др., 2020; Пушкин и др., 2020; Рахматуллина и др., 2021; Использование..., 2024] выбран набор вегетационных индексов, потенциально полезных для определения породного состава.

Для оценки возможностей разделения участков с преобладанием различных древесных пород на основе материалов космической съемки использовался однофакторный дисперсионный анализ. Средствами дисперсионного анализа проводилось сопоставление изменчивости характеристик космических снимков для участков с различными древесными породами (графики средних значений), выполнялись количественная оценка изменчивости и группировка анализируемых участков (множественный ранговый тест).

На основе геоинформационных баз данных лесоустройства были сделаны выборки лесотаксационных выделов насаждений основных лесообразующих пород – березы, осины, ольхи серой и ольхи чёрной, расположенных на территории трех участковых лесничеств Лисинской части Учебно-

⁴ Лесохозяйственный регламент Учебно-опытного лесничества Ленинградской области. СПб., 2023. 349 с.

⁵ Лесной план Ленинградской области. СПб., 2023. 333 с.

опытного лесничества. Критериями выбора служили возраст (80 лет и выше для хвойных, 60 лет и выше для березы, осины и ольхи черной, 40 лет и выше для ольхи серой), коэффициент преобладающей породы (8 и более единиц для сосны, ели, березы и осины; 7 и более единиц для ольхи черной и серой), класс бонитета (3-й и выше), относительная полнота (0,6 и выше). Обобщенные характеристики выбранных выделов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Краткие характеристики лесотаксационных выделов основных лесообразующих пород, выбранных в качестве тренировочных участков
Brief characteristics of forest inventory plots of the main forest-forming species selected as training sites

Преобладающая порода	Количество выделов, шт.	Средний возраст, лет	Средний коэффициент преобладающей породы	Средний класс бонитета	Средняя относительная полнота	Средняя площадь, га
Сосна	124	121,3	10,0	2,6	0,69	2,99
Ель	49	93,5	8,5	1,8	0,70	1,73
Береза	110	76,5	8,5	2,1	0,68	2,38
Осина	81	90,4	8,6	1,0	0,71	1,96
Ольха серая	10	45,5	7,3	2,6	0,66	1,9
Ольха черная	10	70,5	7,2	2,1	0,72	2,3

Выбранные выделы расположены на территории трех участковых лесничеств Лисинской части Учебно-опытного лесничества. Перечисленные критерии предполагают выбор спелых и перестойных сомкнутых насаждений высоких классов бонитета, преимущественно чистых по составу.

С помощью картографического сервиса EO Browser⁶ на основе сформированных выборок были получены материалы безоблачной космической съемки Sentinel-2 с уровнем обработки Level 2A, прошедшие атмосферную коррекцию. Были выбраны следующие даты съемки: 18 апреля, 11 мая, 17 июня и 12 июля 2021 г. Полученные данные ДЗЗ в виде набора растровых слоев экспортировались в ГИС QGIS и далее использовались для определения средних значений спектральных яркостей отдельных каналов (B2, B3, B4, B8, B8A, B11 и B12) и расчета вегетационных индексов (SR, NDVI, EVI, ARVI, SWVI, NDMI). Краткая характеристика и формулы для расчета вегетационных индексов приведены в табл. 2.

⁶ <https://www.sentinel-hub.com/>

Таблица 2

Вегетационные индексы, рассчитываемые на основе данных Sentinel-2**Vegetation indices calculated based on Sentinel-2 data**

Формула	Назначение индекса
Относительный вегетационный индекс SR (Simple Ratio): $SR = \frac{B08}{B04}$	Характеризует состояние растительности, количество зеленой фитомассы, сомкнутость
Нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI (Normalized differential vegetation index): $NDVI = \frac{B08 - B04}{B08 + B04}$	Характеризует количество фитомассы
Усовершенствованный вегетационный индекс EVI (Enhanced Vegetation Index): $EVI = 2,5 \cdot \frac{B08 - B4}{B8 + 6B4 - 7,5B2 + 1}$	Является модификацией NDVI, позволяющей уменьшить влияние атмосферы и почвенного фона. Характеризует количество фитомассы и состояние растительности. Применяется при обилии растительной биомассы, наличии плотного полога растительности с высоким индексом листовой поверхности
Атмосферно устойчивый вегетационный индекс ARVI (Atmospherically Resistant Vegetation Index): $ARVI = \left(B08 - \frac{2B04 - B02}{B08} \right) + (2B04 - B02)$	Является модификацией NDVI, учитывающей влияние атмосферы. Применяется при определении границ и классификации растительного покрова
Коротковолновый вегетационный индекс SWVI (Short wave vegetation index) и нормализованный разностный индекс влажности NDMI (Normalized differential moisture index): $SWVI = \frac{B08 - B11}{B8 + B11}$ $NDMI = \frac{B08A - B11}{B08A + B11}$	Характеризуют относительное содержание влаги и хлорофилла в фитомассе растений. Используются для количественной оценки усыхания и повреждения растительности вследствие воздействия на неё деструктивных факторов

Для статистической обработки данных использовались программы MS Excel и Statgraphics.

Результаты исследования. Графики изменений средних значений спектральных яркостей и вегетационных индексов насаждений основных древесных пород в течение апреля-июля 2021 г. показаны на рис. 2 и 3.

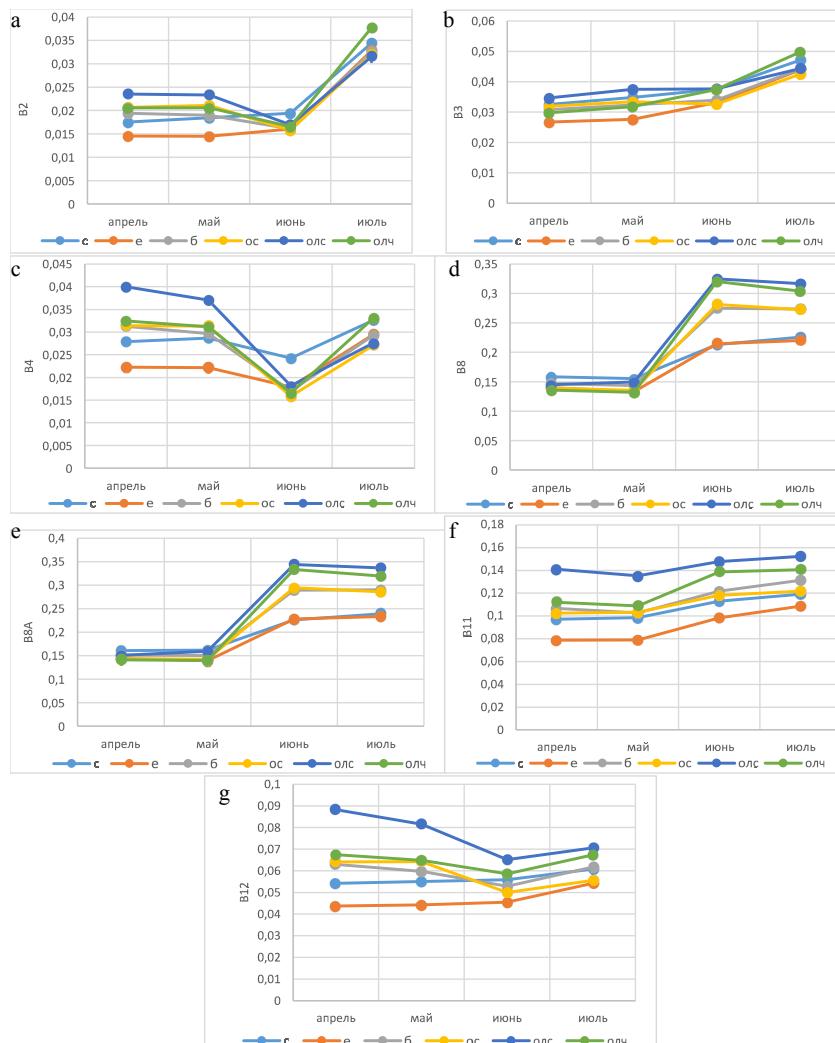


Рис. 2. Средние значения спектральной яркости каналов Sentinel-2 для основных лесообразующих пород за отдельные месяцы 2021 г.: а – B2; б – B3; в – B4; д – B8; е – B8А; ф – B11; г – B12

Fig. 2. Average values of spectral brightness of Sentinel-2 channels for the main forest-forming species for individual months of 2021:
a – B2; b – B3; c – B4; d – B8; e – B8A; f – B11; g – B12

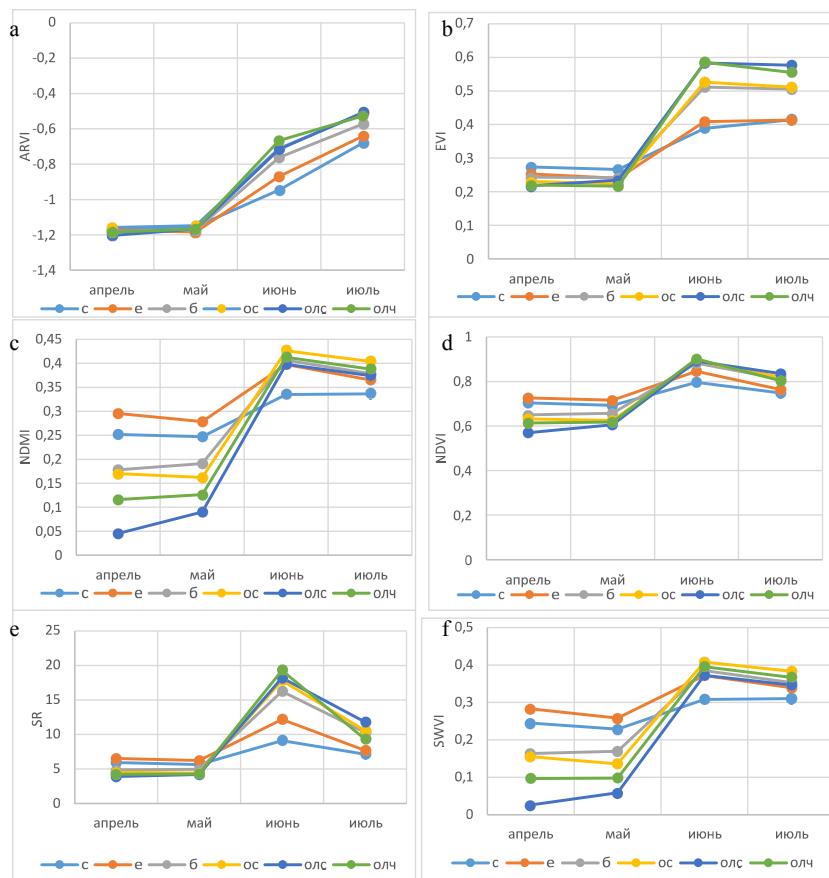


Рис. 3. Средние значения индексов, рассчитанных на основе Sentinel-2 для основных лесообразующих пород за отдельные месяцы 2021 г.: а – ARVI; б – EVI; в – NDMI; д – NDVI; е – SR; ж – SWVI

Fig. 3. Average values of the indices calculated on the basis of Sentinel-2 for the main forest-forming species for individual months of 2021:
a – ARVI; b – EVI; c – NDMI; d – NDVI; e – SR; f – SWVI

Изменения средних значений яркостей и вегетационных индексов насаждений преобладающих пород по времени неоднородны. Закономерна сезонная динамика индексов и связанных с ними спектральных каналов. Сезонная динамика индексов и спектральных яркостей лесных насаждений рассматривается в публикациях [Жирин и др., 2014, 2016; Пушкин и др.,

2020]. На многих графиках видны существенные различия между характеристиками материалов ДЗЗ для разных пород в отдельные месяцы.

Для оценки возможностей определения отдельных древесных пород был выполнен дисперсионный анализ, где в качестве зависимой переменной рассматривались характеристики материалов ДЗЗ (средние значения спектральной яркости отдельных каналов, средние значения индексов), в качестве фактора – преобладающая древесная порода. Пример результатов дисперсионного анализа показан на рис. 4 и в табл. 3, 4.

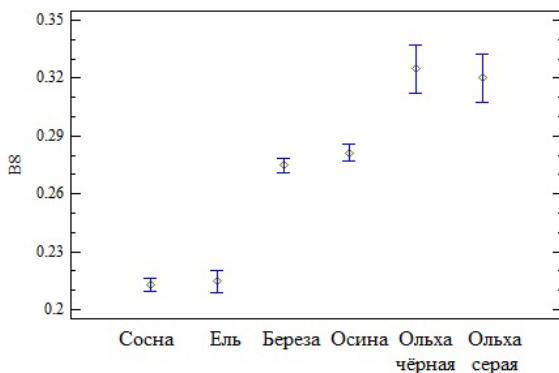


Рис. 4. Результаты дисперсионного анализа изменения спектральной яркости канала B8 спутника Sentinel-2 в июне в зависимости от преобладающей древесной породы: средние значения и их 95%-е доверительные интервалы

Fig. 4. Results of the analysis of variance of changes in the spectral brightness of the Sentinel-2 satellite channel B8 in June, depending on the predominant tree species: average values and 95% confidence intervals

Таблица 3

Результаты однофакторного дисперсионного анализа изменения спектральной яркости канала B8 по преобладающим древесным породам в июне

Results of one-factor variance analysis of changes in B8 channel spectral brightness based on predominant tree species in June

Источник изменчивости	Сумма квадратов отклонений	Число степеней свободы	Средний квадрат	F-критерий Фишера	Вероятность ошибки
Между группами	0,4816	5	0,0963	119,54	0,0000
Внутри групп	0,3030	376	0,0008		
Всего	0,7846	381			

Таблица 4

Результаты множественного рангового теста изменения спектральной яркости канала B8 по преобладающим древесным породам в июне (метод Фишера с наименьшей значимой разницей между средними)

Results of multiple range test of changes in B8 channel spectral brightness based on predominant tree species in June (Fisher's least significant difference method)

Идентификатор породы	Название преобладающей породы	Количество участков	Среднее	Однородные группы
1	Сосна	124	0,2130	X
2	Ель	49	0,2146	X
3	Береза	108	0,2748	X
4	Осина	81	0,2813	X
5	Ольха чёрная	10	0,3200	X
6	Ольха серая	10	0,3247	X

Попарное сравнение	Значимость	Разница средних значений	Доверительные интервалы, +/–
1 – 2		–0,0016	0,0094
1 – 3	*	–0,0618	0,0073
1 – 4	*	–0,0683	0,0080
1 – 5	*	–0,1117	0,0183
1 – 6	*	–0,1070	0,0183
2 – 3	*	–0,0602	0,0096
2 – 4	*	–0,0667	0,0101
2 – 5	*	–0,1101	0,0194
2 – 6	*	–0,1054	0,0194
3 – 4		–0,0065	0,0082
3 – 5	*	–0,0499	0,0184
3 – 6	*	–0,0452	0,0184
4 – 5	*	–0,0434	0,0187
4 – 6	*	–0,0387	0,0187
5 – 6		0,0047	0,0250

Примечание: * обозначает статистически значимую разницу между значениями спектральной яркости древесных пород в паре на 95%-м уровне доверительных интервалов

Обобщенные результаты дисперсионного анализа спектральных яркостей отдельных каналов и вегетационных индексов приведены в табл. 5. В табл. 6 отмечены древесные породы, для которых характеристики материалов ДЗЗ в определенные месяцы значимо отличаются.

Таблица 5

**Результаты дисперсионного анализа (критерий Фишера и его значимость)
изменчивости спектральных яркостей и вегетационных
индексов материалов космической съемки Sentinel-2
в зависимости от преобладающих древесных пород**

**Results of the dispersion analysis (Fisher criterion and its significance)
of the variability of spectral brightness and vegetation indices
of Sentinel-2 space imagery materials depending on the predominant tree species**

Месяц	Спектральная яркость						
	B2	B3	B4	B8	B8A	B11	B12
Апрель	29,39 (0,00)	19,34 (0,00)	21,6 (0,00)	54,37 (0,00)	44,13 (0,00)	31,16 (0,00)	33,21 (0,00)
Май	26,90 (0,00)	21,66 (0,00)	17,65 (0,00)	53,5 (0,00)	46,07 (0,00)	29,58 (0,00)	32,59 (0,00)
Июнь	44,89 (0,00)	25,71 (0,00)	82,57 (0,00)	119,54 (0,00)	119,51 (0,00)	39,12 (0,00)	26,6 (0,00)
Июль	0,79 (0,5577)	1,85 (0,1025)	2,26 (0,0482)	60,88 (0,00)	62,28 (0,00)	17,4 (0,00)	5,69 (0,00)
Месяц	Вегетационные индексы						
	ARVI	EVI	NDMI	NDVI	SR	SWVI	
Апрель	10,22 (0,00)	60,29 (0,00)	49,84 (0,00)	40,71 (0,00)	51,95 (0,00)	51,64 (0,00)	
Май	16,44 (0,00)	68,32 (0,00)	51,62 (0,00)	37,46 (0,00)	46,85 (0,00)	55,27 (0,00)	
Июнь	220,67 (0,00)	163,21 (0,00)	123,28 (0,00)	220,06 (0,00)	245,34 (0,00)	126,29 (0,00)	
Июль	70,12 (0,00)	79,60 (0,00)	50,33 (0,00)	32,69 (0,00)	49,77 (0,00)	51,77 (0,00)	

Таблица 6

**Определение древесных пород на основе дисперсионного анализа
значений спектральной яркости каналов Sentinel-2B**

**Determination of tree species based on dispersion analysis
of spectral brightness values of Sentinel-2B channels**

Месяц	Спектральная яркость						
	B2	B3	B4	B8	B8A	B11	B12
Апрель	C, Е, Олс (29,39)	E (19,34)	C, Е, Олс (21,6)	C (54,37)	C (44,13)	C, Е, Олс (31,16)	C, Е, Олс (33,21)
Май	E (26,90)	E (21,66)	E, Олс (17,65)	-	Б (46,07)	C, Е, Олс (29,58)	C, Е, Олс (32,59)
Июнь	C (44,89)	-	C (82,57)	C-Е, Б-ОС, ОЛс- ОЛч (119,54)	C-Е, Б-ОС, ОЛс- ОЛч (119,51)	C, Е (39,12)	E, Ос, Б, Олс (26,6)
Июль	-	-	-	C-Е, Б-ОС, ОЛс- ОЛч (60,88)	C-Е, Б-ОС, ОЛс- ОЛч (62,28)	E (17,40)	-
Месяц	Вегетационные индексы						
	ARVI	EVI	NDMI	NDVI	SR	SWVI	
Апрель	-	C, Е, Б (60,29)	C, Е, ОЛс, ОЛч (49,84)	C, Е, Б (40,71)	C, Е, Б (51,95)	C, Е, ОЛс, ОЛч (51,64)	
Май	-	C (68,32)	C, Е, Б (51,62)	C, Е, Б (37,46)	C, Е, Б (46,85)	C, Е, Б (55,27)	
Июнь	C, Е, Б (220,67)	C, Е, Б, Ос (163,21)	C (123,28)	C, Е (220,06)	C, Е, Б (245,34)	C (126,29)	
Июль	C, Е, Б (70,12)	C-Е, Б-ОС, ОЛс –ОЛч (79,60)	C (50,33)	Хвойные, листвен- ные (32,69)	-	C (51,77)	

Примечание: в ячейках таблицы указаны древесные породы, значимо отличающиеся от других средними значениями спектральной яркости или значениями вегетационных индексов. В скобках приведены значения критерия Фишера (F-value). Уровень значимости дисперсионного анализа (p-value) для всех указанных комбинаций менее 0,05

Результаты дисперсионного анализа дополняют графики спектральных яркостей и индексов, представленные на рис. 2 и 3, и указывают на различную значимость применения данных ДЗ3 за разные периоды для определения древесных пород. Так, например, использование для разделения древесных пород каналов B2, B3, B4, B12 в июле будет наименее продуктивным: значения яркостей всех пород будут близки. Аналогично значения индекса ARVI в апреле и мае будут близкими для всех пород. В отдельные месяцы по значениям яркостей и индексов могут значимо отличаться группы древесных пород. Например, по значениям индекса NDVI в июле отличаются хвойные и лиственные породы. По значениям яркостей каналов B8 и B8A в июле выделяются три группы древесных пород – хвойные (сосна и ель), береза и осина, а также ольха (серая и черная). Такие же группы выделяются на основе значений индекса EVI в июле. Индексы SWVI и NDMI, часто отождествляемые в литературе (отличаются использованием каналов B8 и B8A), дают практически идентичные результаты в отношении определения древесных пород.

Обзор литературы подтверждает трудность успешного разделения древесных пород по материалам одномоментной многозональной космической съемки. Для более надежного разделения пород рекомендуется использовать разновременную съемку и разные характеристики материалов ДЗ3 [Тарасова, 2023].

Полученные результаты не предполагают проведения автоматической классификации породного состава на основе космических снимков в целях таксации лесов. Установленные различия характеристик материалов ДЗ3 между отдельными преобладающими породами могут использоваться в качестве дополнительного признака при аналитико-измерительном дешифрировании. В первую очередь такие различия могут помочь при дешифрировании трудноразличимых на материалах аэрофотосъемки древесных пород (например, березы и осины). Часть показанных в табл. 5 и 6 результатов не будет иметь при этом значительного практического смысла. Так, разделение на материалах аэрофотосъемки хвойных и лиственных насаждений выполняется, как правило, достаточно успешно на основе синтеза «ложные цвета» и использования морфометрических признаков.

Представляет интерес дальнейшее развитие данного направления – оценка спектральных характеристик древесных пород, их варьирования и сезонной динамики для других территорий, других временных интервалов, разных режимов ведения лесного хозяйства, разных лесорастительных условий, разных групп возраста и т. д.

Заключение. Проведенное исследование представляет теоретический и практический интерес. Продемонстрирована динамика спектральных характеристик основных древесных пород в течение четырех первых месяцев вегетационного периода на территории Лисинской части Учебно-опытного лесничества. Отмечены значимые различия значений характеристик материалов ДЗЗ для основных лесообразующих пород в отдельные месяцы. Сведения о локальной динамике значений индексов и спектральных яркостей важны для ряда направлений, связанных с оценкой и мониторингом лесов на основе дистанционных методов. На практике выявленные различия характеристик материалов космической съемки Sentinel-2 для основных лесообразующих пород могут использоваться в качестве дополнительного признака при производственном дешифрировании (наряду с формой и размерами крон, просматриваемостью полога и пр.). Изложенный подход может быть усовершенствован и автоматизирован для производственного применения с использованием картографических сервисов и открытого программного обеспечения.

Исследование выполнено в контексте участия ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова» во Всероссийском инновационном проекте государственного значения (ВИП Г3) «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ».

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Али М.С., Воробьев О.Н., Курбанов Э.А. Алгоритм «дерево решений» для классификации лесов Сирийской Арабской Республики по снимку SENTINEL-2 // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2020. № 1(45). С. 5–30.

Архипов В.И., Басков В.И., Белов В.А., Березин В.И., Черниховский Д.М. Руководство по таксации лесов дешифровочным способом. СПб.: ООО «ЛЕСПРОЕКТ», 2021. 99 с.

Архипов В.И., Черниховский Д.М., Березин В.И. Опыт таксации лесов дешифровочным способом на основе современного программно-аппаратного обеспечения и цифровых аэроснимков нового поколения // Сибирский лесной журнал. 2014а. № 5. С. 29–37.

Архипов В.И., Черниховский Д.М., Березин В.И., Белов В.А. Современная технология таксации лесов дешифровочным способом «От съемки – к проекту» // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2014б. Вып. 208. С. 22–42.

Березин В.И., Черниховский Д.М. Современное развитие методологии лесного стереоскопического дешифрирования средствами фотограмметрического программного обеспечения (теория и практика) // Проблемы инвентаризации лесов и лесоустройства: матер. 5-й Междунар. научно-практич. конф. М.: Рослесинфорт, 2019. С. 112–117.

Воробьев О.Н., Курбанов Э.А., Губаев А.В., Демишиева Е.Н. Методика пошаговой классификации спутниковых снимков для тематического картирования лесов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2015. № 4(28). С. 57–72.

Гусев А.П. Многолетние изменения вегетационных индексов как индикатор динамики состояния природных и антропогенных геосистем // Геополитика и экogeодинамика регионов. 2021. Т. 7 (17), вып. 2. С. 202–209.

Данюлис Е.П., Осипенко Г.С., Резник М.Х., Березин В.И. Вероятностный анализ признаков дешифрирования // Экономико-математическое моделирование лесохозяйственных мероприятий: сб. научных трудов. Л.: ЛенНИИЛХ, 1980. С. 153–160.

Дмитриев Е.В., Кондранин Т.В., Мельник П.Г., Донской С.А. Определение видового состава смешанного леса на основе совместной обработки публичных спутниковых карт и многовременных изображений Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21, № 1. С. 31–50. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-31-50

Жирин В.М., Князева С.В., Эйдлина С.П. Динамика спектральной яркости породно-возрастной структуры групп типов леса на космических снимках Landsat // Лесоведение. 2014. № 5. С. 3–12.

Жирин В.М., Князева С.В., Эйдлина С.П. Многолетняя динамика вегетационных индексов темнохвойных лесов после повреждения сибирским шелкопрядом // Лесоведение. 2016. № 1. С. 3–14.

Использование вегетационных индексов для анализа растительности. URL: https://gisproxima.ru/ ispolzovanie_vegetatsionnyh_indeksov?ysclid=lxavkdetdj933222750 (дата обращения: 12.06.2024).

Копытков В.В., Гусев А.П. Исследования состояния лесных культур и биологической устойчивости насаждений в зоне первоочередного отселения с использованием многозональной космической съемки // Вестник Мозырского государственного педагогического университета им. И.П. Шамякина. 2023. № 1(61). С. 22–28.

Крылов А.М., Соболев А.А., Владимирова Н.А. Выявление очагов короедатипографа в Московской области с использованием снимков Landsat // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2011. № 4. С. 54–60.

Курбанов Э.А., Боробьев О.Н., Меньшиков С.А., Смирнова Л.Н. Распознавание лесных насаждений и доминирующих древесных пород Пензенской области

по данным спутника Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 5. С. 154–166. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-154-166

Мартынова М.В., Султанова Р.Р., Габделхаков А.К., Рахматуллин З.З., Одинцов Г.Е. Оценка зарастания сельскохозяйственных земель древесными породами по спутниковым данным Landsat на примере участка Бакалинского района Республики Башкортостан // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг. 2020. № 6. С. 128–134.

Пахучий В.В., Пахучая Л.М. Опыт использования вегетационных индексов при комплексных исследованиях на объектах гидролесомелиорации // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2014. № 1(21). С. 33–41.

Пахучий В.В., Шевелев Д.А. Использование лесоустроительных материалов и спутниковых технологий при гидролесомелиоративных исследованиях // Успехи современного естествознания. 2016. № 5. С. 69–73.

Пушкин А.А., Сидельник Н.Я., Ковалевский С.В. Оценка возможностей использования спектрального вегетационного индекса EVI для дешифрирования лесных насаждений по материалам космической съемки // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2020. № 1(228). С. 5–11.

Рахматуллина И.Р., Рахматуллин З.З., Тагирова О.В., Хамидуллина Г.Г., Кулагин А.Ю. Использование вегетационных индексов для оценки характеристик сосновых насаждений г. Уфы и ее пригородов // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. Электронный научный журнал. 2021. № 3(39). С. 35–48. DOI: 10.32516/2303-9922.2021.39.3

Силкина О.В., Винокурова Р.И. Сезонная динамика содержания хлорофиллов и микроэлементов в формирующейся хвои *Abies sibirica* и *Picea abies* // Физиология растений. 2009. Т. 56, № 6. С. 864–870.

Стыценко Ф.В., Барталев С.А., Букасъ А.В., Еришов Д.В., Сайгин И.А. Возможности пролонгированной оценки постпожарного состояния хвойных вечнозелёных лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 5. С. 217–227. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-217-227

Сультсон С.М., Пономарев Е.И., Швецов Е.Г., Третьяков П.Д., Горошко А.А., Кулакова Н.Н., Михайлова П.В. Применение дистанционного зондирования для прогноза нарушений темнохвойных лесов после вспышки численности сибирского шелкопряда // Биосфера. 2023. Т. 15, № 1. С. 21–32.

Тарасова Л.В. Дистанционный мониторинг и спектральная разделимость классов лесного покрова водоохранных зон рек (на примере Мариинского лесного

Заволжья): дис. ... канд. с.-х. наук. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2023. 179 с.

Черепанов А.С. Вегетационные индексы // Геоматика. 2011. № 2. С. 98–102.

Черепанов А.С., Дружинина Е.Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // Геоматика. 2009. № 3. С. 28–32.

Черниховский Д.М. Теория и методы инвентаризации лесов на основе данных дистанционного зондирования Земли, цифрового моделирования рельефа и ГИС-технологий: дис. ... д-ра с.-х. наук. СПб.: СПбГЛТУ, 2020. 386 с.

Abdullah H.J. Remote sensing of European spruce (*Ips typographus* L.) bark beetle green attack: PhD thesis. University of Twente, 2019. 151 p. DOI: 10.3990/1.9789036547956

Abdullah H., Darvishzadeh R., Skidmore A.K., Heurich M. Sensitivity of Landsat-8 OLI and TIRS Data to Foliar Properties of Early Stage Bark Beetle (*Ips typographus* L.) Infestation // Remote Sensing. 2019a. Vol. 11, iss. 4. Art. no. 398.

Abdullah H., Skidmore A.K., Darvishzadeh R., Heurich M. Sentinel-2 accurately maps green-attack stage of European spruce bark beetle (*Ips typographus*, L.) compared with Landsat-8 // Remote Sensing in Ecology and Conservation. 2019b. Vol. 5, iss. 1. P. 87–106.

Alekseev A., Chernikhovskii D. Assessment of the health status of tree stands based on Sentinel – 2B remote sensing materials and the short-wave vegetation index SWVI // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 876. Art. no. 012003. DOI: 10.1088/1755-1315/876/1/012003

Alekseev A.S., Chernikhovskii D.M. Assessment of the State of Forests Based on Joint Statistical Processing of Sentinel-2B Remote Sensing Data and the Data from Network of Ground-Based ICP-Forests Sample Plots // Open Journal of Ecology. 2022. Vol. 12. P. 513–528. DOI: 10.4236/oje.2022.128028

Georgiev G., Georgieva M., Belilov S., Mirchev P., Deliyanchev S., Mladenov V., Kropov K., Haydarova S. Early Detection of Ips Typographus Infestations by Using Sentinel-2 Satellite Images In Windthrow Affected Norway Spruce Forests In Smolyan Region, Bulgaria // Silva Balcanica. 2022. Vol. 23, iss. 2. P. 27–34. DOI: 10.3897/silvabalconica.22.e98314

Lillesand T.M., Kiefer R.W., Chipman J.W. Remote Sensing and Image Interpretation. Seventh Edition. New York, Wiley, 2015. 736 p.

References

Abdullah H.J. Remote sensing of European spruce (*Ips typographus*, L.) bark beetle green attack: PhD Thesis. University of Twente, 2019. 151 p. DOI: 10.3990/1.9789036547956

Abdullah H., Darvishzadeh R., Skidmore A.K., Heurich M. Sensitivity of Landsat-8 OLI and TIRS Data to Foliar Properties of Early Stage Bark Beetle (*Ips typographus* L.) Infestation. *Remote Sensing*, 2019a, vol. 11, iss. 4, art. no. 398. DOI: 10.3390/rs11040398

Abdullah H., Skidmore A.K., Darvishzadeh R., Heurich M. Sentinel-2 accurately maps green-attack stage of European spruce bark beetle (*Ips typographus*, L.) compared with Landsat-8. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2019b, vol. 5, iss. 1, pp. 87–106. DOI: 10.1002/rse2.93

Alekseev A., Chernikhovskii D. Assessment of the health status of tree stands based on Sentinel – 2B remote sensing materials and the short-wave vegetation index SWVI. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 876, art. no. 012003. DOI: 10.1088/1755-1315/876/1/012003

Alekseev A.S., Chernikhovskii D.M. Assessment of the State of Forests Based on Joint Statistical Processing of Sentinel-2B Remote Sensing Data and the Data from Network of Ground-Based ICP-Forests Sample Plots. *Open Journal of Ecology*, 2022, vol. 12, pp. 513–528. DOI:10.4236/oje.2022.128028

Ali M.S., Vorobev O.N., Kurbanov E.A. Decision Tree Algorithm for Forest Classification of Syrian Arab Republic with the Use of Sentinel-2 Image. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management*, 2020, no. 1 (45), pp. 5–30. DOI: 10.25686/2306-2827.2020.1.5 (In Russ.)

Arkipov V.I., Baskov V.I., Belov V.A., Berezin V.I., Chernikhovskii D.M. Manual on forest taxation by decryption method. St. Petersburg: LESPROEKT LLC, 2021. 99 p. (In Russ.)

Arkipov V.I., Chernikhovskii D.M., Berezin V.I. An Experience of Forest Inventory by Photo Interpretation Method Based on Advanced Firmware and Digital Aerial Photographs of New Generation. *Sibirskij Lesnoj Zurnal (Siberian Journal of Forest Science)*, 2014a, no. 5, pp. 29–37. (In Russ.)

Arkipov V.I., Chernikhovskii D.M., Berezin V.I., Belov V.A. Modern technology of forest mensuration by interpretation method «From survey – to the project». *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2014b, iss. 208, pp. 22–42. (In Russ.)

Berezin V.I., Chernikhovskii D.M. Modern development of the methodology of forest stereoscopic decryption by means of photogrammetric software (theory and practice). *Problems of forest inventory and forest management: Proceedings of 5th International Scientific and Practical Conference*. M: Roslesinforg, 2019, pp. 112–117. (In Russ.)

Cherepanov A.S. Vegetation indices. *Geomatics*, 2011, no. 2, pp. 98–102. (In Russ.)

Cherepanov A.S., Druzhinina E.G. Spectral properties of vegetation and vegetation indices. *Geomatics*, 2009, no. 3, pp. 28–32. (In Russ.)

Chernikhovskii D.M. Theory and methods of forest inventory based on data from remote sensing of the Earth, digital terrain modeling and GIS technologies: Dis. ... Doctor of Agricultural Sciences. St. Petersburg: St. Peterburg State Forest Technical University, 2020. 386 p. (In Russ.)

Danyulis E.P., Osipenko G.S., Reznik M.H., Berezin V.I. Probabilistic analysis of decryptions signs. *Economic and mathematical modeling of forestry measures: Collection of scientific papers*. L.: LenNIIILH, 1980, pp. 153–160. (In Russ.)

Dmitriev E.V., Kondranin T.V., Melnik P.G., Donskoi S.A. Determining mixed forest species composition based on joint processing of public satellite maps and multi-temporal Sentinel-2 images. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa (Current problems in remote sensing of the Earth from space)*, 2024, vol. 21, no. 1, pp. 31–50. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-31-50 (In Russ.)

Georgiev G., Georgieva M., Belilov S., Mirchev P., Deliyanchev S., Mladenov V., Kropov K., Haydarova S. Early Detection of *Ips typographus* Infestations by Using Sentinel-2 Satellite Images In Windthrow Affected Norway Spruce Forests In Smolyan Region, Bulgaria. *Silva Balcanica*, 2022, vol. 23, iss. 2, pp. 27–34. DOI: 10.3897/silvabalconica.22.e98314

Gusev A.P. Long-term changes in vegetation indices as an indicator of the dynamics of the state of natural and anthropogenic geosystems. *Geopolitics and ecogeodynamics of regions*, 2021, vol. 7 (17), iss. 2, pp. 202–209. (In Russ.)

Kopytkov V.V., Gusev A.P. Investigations of the state of forest crops and biological stability of plants in the zone of priority resettlement using multi-zone space image. *Bulletin of the I.P. Shamyakin Mozyr State Pedagogical University*, 2023, no. 1(61), pp. 22–28. (In Russ.)

Krylov A.M., Sobolev A.A., Vladimirova N.A. Revealing of Centers *Ips typographus* in Moscow Region with Use of Pictures Landsat. *Lesnoy vestnik (Forestry Bulletin)*, 2011, no. 4, pp. 54–60. (In Russ.).

Kurbanov E.A., Vorobiev O.N., Menshikov S.A., Smirnova L.N. Identification of forest stands and dominant tree species in Penza Region using Sentinel-2 imagery. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa (Current problems in remote sensing of the Earth from space)*, 2018, vol. 15, no. 5, pp. 154–166. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-154-166. (In Russ.)

Lillesand T.M., Kiefer R.W., Chipman J.W. Remote Sensing and Image Interpretation. Seventh Edition. New York, Wiley, 2015. 736 p.

Martynova M.V., Sultanova R.R., Gabdelkhakov A.K., Rakhmatullin Z.Z., Odintsov G.E. Assessment of reforestation on abandoned agricultural lands using Landsat data on the example of a site in the Bakalinsky Region of the Republic Bashkortostan. *Forest ecosystems in the context of climate change: biological productivity and remote monitoring*, 2020, no. 6, pp. 128–134. (In Russ.)

Pakhuchiy V.V., Pakhuchaya L.M. Experience of vegetation indices use for complex researches on the objects of hydro and forest amelioration. *Vestnik of Volga State University of Technology Series «Forest. Ecology. Nature Management»*, 2014, no. 1(21), pp. 33–41. (In Russ.)

Pakhuchiy V.V., Shevelev D.A. Use of forest management materials and satellite technologies at the forest drainage researches. *Advances in current natural sciences*, 2016, no. 5, pp. 69–73. (In Russ.)

Pushkin A.A., Sidelnik N.Ya., Kovalevskiy S.V. Estimation of possibilities of using the EVI spectral vegetation index for deciphering forest stands by satellite imagery. *Trudy BGTU [Proceedings of BSTU]*, 2020, no. 1 (228): Forestry, environmental management and processing of renewable resources, pp. 5–11. (In Russ.)

Rakhmatullina I.R., Rakhmatullin Z.Z., Tagirova O.V., Khamidullina G.G., Kulagin A.Yu. Using vegetation indices to assess the characteristics of pine plantations in Ufa and its suburbs. *Vestnik of Orenburg State Pedagogical University. Electronic Scientific Journal*, 2021, no. 3(39), pp. 35–48. DOI: 10.32516/2303-9922.2021.39.3 (In Russ.)

Sil'kina O.V., Vinokurova R.I. Seasonal dynamics of the content of chlorophylls and trace elements in the emerging conifers *Abies sibirica* and *Picea abies*. *Plant Physiology*, 2009, vol. 56, no. 6, pp. 864–870. (In Russ.)

Stytsenko F.V., Bartalev S.A., Bukas A.V., Ershov D.V., Saigin I.A. The possibilities of a prolonged assessment of the post-fire state of coniferous evergreen forests according to multispectral satellite measurements. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 2019, vol. 16, no. 5, pp. 217–227. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-217-227 (In Russ.)

Sultson S.M., Ponomarev E.I., Shvetsov E.G., Tretyakov P.D., Goroshko A.A., Kulakova N.N., Mikhailov P.V. The use of remote sensing for forecasting violations of dark coniferous forests after the outbreak of the Siberian silkworm population. *Biosphere*, 2023, vol. 15, no. 1, pp. 21–32. DOI: 10.24855/biosfera.v15i1.790 (In Russ.)

Tarasova L.V. Remote monitoring and spectral separability of classes of forest cover of water protection zones of rivers (on the example of the Mari forest Volga region): Dis. ... Candidate of Agricultural Sciences. Yoshkar-Ola: Volga State University of Technology, 2023. 179 p. (In Russ.)

The use of vegetation indices for vegetation analysis [Electronic resource]. URL: https://gisproxima.ru/ispolzovanie_vegetatsionnyh_indeksov?ysclid=lxavkdetdj933222750 (assessed: 12.06.2024) (In Russ.)

Vorobyev O.N., Kurbanov E.A., Gubayev A.V., Demisheva E.N. Method of stepwise classification of satellite images for the thematic mapping of forest cover. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management*, 2015, no. 4 (28), pp. 57–72. (In Russ.)

Zhirin V.M., Knyazeva S.V., Eidlina S.P. Dynamics of spectral brightness of the breed-age structure of groups of forest types on Landsat satellite images. *Forest science*, 2014, no. 5, pp. 3–12. (In Russ.)

Zhirin V.M., Knyazeva S.V., Eidlina S.P. Long-term dynamics of vegetation indices of dark coniferous forests after damage by Siberian silkworm. *Forest science*, 2016, no. 1, pp. 3–14. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 25.06.2024

Черниховский Д.М. Оценка возможностей применения материалов спутниковой съемки Sentinel-2 для определения преобладающих древесных пород при таксации лесов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 252. С. 188–210. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.188-210

Исследование посвящено оценке возможностей применения материалов многозональной космической съемки Sentinel-2 в качестве дополнительных материалов для лесотаксационного дешифрирования. Модельной территорией выбрана Лисинская часть Учебно-опытного лесничества (бывший Лисинский учебно-опытный лесхоз), расположенная в Тосненском муниципальном районе Ленинградской области. На основе данных лесоустройства получен набор лесотаксационных выделов, представляющих насаждения основных лесообразующих пород. Критериями отбора служили преобладающая порода, возраст, коэффициент состава, класс бонитета, относительная полнота и площадь. Всего выбрано 384 выдела спелых и перестойных сомкнутых насаждений основных преобладающих пород высоких классов бонитета, преимущественно чистых по составу. Для выбранных выделов с помощью картографического сервиса EO Browser получены материалы безоблачной космической съемки Sentinel-2 за период с апреля по июль 2021 г. Определены значения яркостей каналов Sentinel-2, значимых для изучения растительности, а также рассчитаны значения ряда вегетационных индексов – SR, NDVI, EVI, ARVI, SWVI, NDMI. Оценены изменения средних значений яркостей и вегетационных индексов насаждений преобладающих пород за первые четыре месяца вегетационного периода. В отдельные месяцы были отмечены существенные различия характеристик материалов ДЗЗ для разных пород. Для оценки возможностей определения отдельных древесных пород на основе материалов Sentinel-2 выполнен дисперсионный анализ. В качестве зависимой переменной поочередно рассматривались яркости и вегетационные индексы, в качестве фактора – преобладающая древесная порода. Установлено, что в отдельные месяцы характеристики материалов ДЗЗ для отдельных пород и их групп значимо отличаются. Например, по значениям индекса NDVI в июле отличаются хвойные и лиственные породы. По значениям яркостей каналов B8 и B8A, а также по величине индекса EVI в июле различаются три группы пород –

хвойные (сосна и ель), ольха (серая и черная), а также береза с осиной. Установленные различия характеристик материалов ДЗЗ между отдельными преобладающими породами могут использоваться в качестве дополнительного признака при аналитико-измерительном дешифрировании.

Ключевые слова: вегетационный индекс, дисперсионный анализ, преобладающая порода, признаки дешифрирования, аналитико-измерительное дешифрирование.

Chernikhovskii D.M. Assessment of the possibilities of using Sentinel-2 satellite imagery materials to determine the predominant tree species in forest taxation. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 252, pp. 188–210 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.188-210

The study is devoted to the identification of the early stages of damage to Norway spruce tree stands by a bark beetle. The scale, intensity and dynamics of bark beetle damage are difficult to predict, and the negative consequences are comparable to the consequences of forest fires. From a practical point of view, it is of crucial importance to identify the initial stage of bark beetle damage, in which colonized trees do not yet show distinct symptoms of damage, and the needles retain their green color. The objective of the study was to study by methods of mathematical statistics changes in the vegetation indices NDVI and SWVI for Norway spruce stands, which in 3 years have gone from healthy to severely damaged, using as an example the sites of mass reproduction of bark beetle and other stem pests identified during a ground survey. The objects of the study were 12 sites of mass reproduction of bark beetles and other stem pests formed in 2021 on the territory of Vyborg and Gatchina districts of the Leningrad region in mature Norway spruce tree stands. During the ground work, the survey and mapping of damaged sites were carried out. With the help of the EO Browser mapping service, Sentinel-2B satellite survey materials for June-September 2020 (no damage), 2021 (early stages of damage) and 2022 (late stages of damage) were received on the territory of the damaged sites. Vegetation indices NDVI and SWVI were calculated on the basis of the received remote sensing materials. With the help of variance analysis, a reliable and significant decrease in the values of both indices was established by the years of damage, as well as by years and months. It is noted that when bark beetles damage plantings, the seasonal dynamics of index values changes. Reliable linear trends of decreasing of both index values by year and month are revealed. Analysis of the sensitivity coefficients and synchronicity of changes in vegetation indices by year and month showed that the decrease in index values occurs independently of external (random) factors, as well as well as not synchronously relative to each other. In practical terms, the revealed patterns of changes in the vegetation indices NDVI and SWVI can serve as a signal about the initial stage of damage to plantings and the basis for conducting ground surveys with the aim of early detection of damage and timely prevention of their spread.

К e y w o r d s: vegetation index, analysis of variance, predominant tree species, signs of interpretation, analytical and measuring interpretation.

ЧЕРНИХОВСКИЙ Дмитрий Михайлович – профессор Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 2189-1988. ORCID: 0000-0002-6375-3080

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: cherndm2006@yandex.ru

CHERNIKHOVSKII Dmitry M. – DSc (Agriculture), Professor, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 2189-1988. ORCID: 0000-0002-6375-3080

194021. Institutsky per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: cherndm2006@yandex.ru

А.К. Габделхаков

**ДИНАМИКА ТЕКУЩЕГО ПРИРОСТА ДРЕВОСТОЯ
ЛИПЫ МЕЛКОЛИСТНОЙ (*TILIA CORDATA MILL.*)**

Введение. Изменение климата [State ..., 2021; Третий оценочный ..., 2022] оказывает влияние как на древесные виды, так и на лесные экосистемы в целом. Это становится все более очевидным в течение последних десятилетий [Juknys et al., 2011; Pretzsch et al., 2014; Dahlhausen et al., 2018; Hilmers et al., 2019]. Деревья и леса меняют свой рост из-за измененных потенциальных условий произрастания и, кроме того, могут столкнуться с новыми эффектами конкуренции со стороны других видов экосистемы [Pretzsch et al., 2022]. При этом рост деревьев и насаждений позволяет оценить устойчивость и приспособленность вида к изменениям окружающей среды [Pretzsch et al., 2009]. Однако существуют значительная неопределенность и, следовательно, трудности в количественном определении многих конкретных рисков и/или воздействий на этот процесс [Hemery et al., 2010; Albert et al., 2017]. При анализе роста деревьев и древостоев наиболее чувствительным и информативным индикатором является их текущий прирост, который позволяет реконструировать историю реакций древесного вида на изменения окружающей среды, а также сделать выводы о степени его адаптивности, особенно на границах ареала распространения [Muffler et al., 2020; Martinez Del Castillo et al., 2022]. Величину текущего прироста с учетом отпада и древесных растений, перешедших в результате роста из категории подроста в древостой, можно рассчитать путем двух контрольных измерений древостоя постоянной пробной площади (ППП) – в начале и в конце периода исследований. Длительные наблюдения на ППП обладают рядом преимуществ перед однократными, но связаны с большими трудозатратами [Pretzsch et al., 2019]. Поэтому необходимы как повторные наблюдения на ППП для подтверждения или опровержения состояния наблюдаемых деревьев и тенденций их роста с течением времени [Pretzsch et al., 2022], так и наблюдения на временных пробных площадях (ВПП) для однократных исследований путем реконструкции древесно-кольцевой хронологии на основе кернов деревьев [Neum et al., 2018].

В настоящее время многие исследователи фиксируют повышенный уровень прироста лесных насаждений по сравнению с таблицами хода роста дре-

востоев [Kohnle et al., 2014; Staupendahl et al., 2016; Pretzsch et al., 2020], большинство которых в нашей стране были разработаны в прошлом веке. Годовые темпы прироста стали выше, запасы древостоев быстрее достигают возраста количественной спелости [Pretzsch et al., 2020]. Поскольку данные прироста насаждений используются при оценке расчетной лесосеки, они обеспечивают устойчивое использование лесов, и, следовательно, их недооцененный потенциал приведет к ошибкам в планировании лесного хозяйства.

Чистые и смешанные насаждения липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) занимают свыше одной пятой части лесного фонда Республики Башкортостан (около 1,2 млн га) и имеют очень важное значение с экологической, лесоводственной, хозяйственной и ландшафтной точек зрения. Липа может быть ценной в изменяющемся климате породой за ее широкую экологическую амплитуду, устойчивость к засухе и многочисленные лесоводственные свойства [Pigott, 2012; Daugaviete et al., 2019]. Учитывая потенциальное изменение конкуренции между видами в одних регионах и необходимость существенной диверсификации в других, липа может играть важную роль в адаптации лесов к изменению климата [Latte et al., 2020]. Для этого необходимо расширить наши знания о регенерации и реакции на экологические и лесоводственные факторы, установить четкие рекомендации по ведению лесного хозяйства в насаждениях липы [Jaegere et al., 2016].

В связи с вышеизложенным у исследования было три цели. Первая заключалась в оценке величины общего текущего прироста запаса древостоя на ППП. Вторая цель состояла в том, чтобы сравнить методы оценки текущего прироста по данным длительных наблюдений и по однократным измерениям. Третья цель заключалась в том, чтобы оценить, отклоняется ли текущий прирост исследуемого древостоя от данных существующих таблиц хода роста.

Материалы и методика исследования. Исследуемый лесной участок находится на территории Дмитриевского участкового лесничества, около деревни Ягодная Поляна, в 13 км на северо-запад от центра г. Уфы (Республика Башкортостан). Координаты участка 54.77855 с.ш. 55.77220 в.д., высота около 104 м н. у. м., почва темно-серая лесная суглинистая. Климат континентальный (среднегодовая температура воздуха +3 °C, средняя температура января – –15 °C, июля – +19 °C), среднегодовое количество осадков около 500 мм.

Наблюдавшийся древостой липы мелколистной порослевого происхождения III класса бонитета расположен в равнинной местности, где на наиболее характерном по условиям участке автором статьи в 1990 г. была заложе-

на постоянная пробная площадь (ППП) размером 0,3 га. Все деревья на ППП с диаметром на высоте 1,3 м (d) > 6 см были пронумерованы, была собрана информация об их состоянии (живые или сухостойные), видах, d и высотах (h). Дополнительно учитывалась валёжная древесина. Такое наблюдение на ППП проводилось в 1990, 1995, 2006, 2013, 2018 и 2023 гг., что позволило использовать для расчета текущего прироста древостоя как выжившие при смежных учетах деревья, так и ушедшие в отпад.

В 1990 г. на лесном участке (за пределами буферной зоны ППП) для полного анализа хода роста было срублено десять деревьев в зависимости от h и d : одно доминантное – лучшего роста и с развитой кроной в верхнем пологе, пять средних – хорошего роста из средней части полога, четыре подчиненных – с худшим ростом из нижней части полога (табл. 1). Анализ хода роста стволов произведен стандартным методом по замерам годичных колец и их ширины на каждом диске из середины 2-метровых секций. Процент объемного прироста (P_V) модельных деревьев найден по формуле М. Пресслера:

$$P_V = \frac{200}{t} \cdot \frac{V_a - V_{a-t}}{V_a + V_{a-t}}, \quad (1)$$

где V_a – объем ствола в возрасте A ; V_{a-t} – объем ствола в возрасте t лет назад; t – учетный период времени.

Таблица 1
Дендрометрические параметры модельных деревьев

Dendrometric parameters of model trees

Класс	A , лет	h , м	d , см	Длина кроны, м	Ширина кроны, м	Z_h , м·год $^{-1}$	Z_d , см·год $^{-1}$	Z_V , м 3 ·год $^{-1}$	P_V , %
Доминантное	71	21,9	34,4	14,5	4,2	0,30	0,60	0,0200	4,4
Среднее	69	18,3	21,1	14,4	4,7	0,07	0,28	0,0090	4,1
Среднее	68	22,0	26,1	12,0	3,2	0,34	0,43	0,0200	5,3
Среднее	60	21,5	20,9	15,0	2,5	0,55	0,26	0,0074	3,9
Среднее	58	20,4	27,2	16,7	2,5	0,42	0,43	0,0216	5,7
Среднее	59	19,0	20,7	10,0	2,0	0,13	0,25	0,0105	4,2
Подчиненное	49	18,5	16,2	14,5	1,5	0,32	0,34	0,0080	6,6
Подчиненное	49	19,8	16,8	16,7	1,7	0,20	0,42	0,0079	5,7
Подчиненное	44	18,4	17,0	13,4	1,0	0,13	0,30	0,0063	5,0
Подчиненное	43	15,5	10,7	11,5	0,5	0,13	0,33	0,0055	10,3

Примечание: сокращения приведены в тексте статьи

Существуют различные методы нахождения текущего прироста древостоев [Верхунов, Черных, 2007]. В данной статье рассматриваются несколько способов, отличающихся по уровню организации во временном масштабе. Определение общего текущего прироста запаса древостоя (Z_{M_A}) на ППП произведено упрощенно а) с применением объемных таблиц [Сортиментные..., 2002] с двумя входами (d и h) как разница между запасами древостоя в настоящее время (M_A) и t лет назад (M_{A-t}) с учетом отпада за учетный период (M_t^o), соотнесенная к t :

$$Z_{M_A} = \frac{M_A - M_{A-t} + M_t^o}{t}. \quad (2)$$

Кроме отпада между двумя периодами наблюдений, учитывался объем деревьев, перешедших из категории подроста в древостой (они превысили порог d в 6 см).

Для начального периода наблюдения (1990 г.) Z_{M_A} определен:

б) через проценты объемного прироста срубленных модельных деревьев (P_V) и запаса древостоя (M_A) без коры:

$$Z_{M_A} = 0,01 \cdot M_A^{6k} \cdot \bar{P}_{Z_M}, \quad (3)$$

где \bar{P}_{Z_M} – средний процент текущего годового прироста запаса древостоя:

$$\bar{P}_{Z_M} = \frac{\sum_{j=1}^m (P_{V_j} \cdot V_j \cdot n_j)}{\sum_{j=1}^m (V_j \cdot n_j)}, \quad (4)$$

где P_{V_j} – процент текущего годового прироста объема ствола, отнесенный к j -й ступени толщины; V_j – объем ствола, отнесенный к j -й ступени толщины; n – количество деревьев в j -й ступени толщины; m – количество ступеней толщины в древостое. Показатели P_{V_j} получены выравниванием данных модельных деревьев (табл. 1) функцией:

$$P_{V_j} = -4,144 \cdot \ln(d) + 17,966, \quad (5)$$

при коэффициенте детерминации $R^2 = 0,51$, среднеквадратической ошибке $RMSE = 2,139$ и значимости уравнения $F = 8$ с вероятностью $p = 0,02$;

в) по прямой текущего объемного прироста (Z_V). Находится линейная зависимость Z_V от площади сечения на высоте 1,3 м ($g_{1,3}$) модельных деревьев:

$$Z_V = 0,00002 \cdot g_{1,3} + 0,003, \quad (6)$$

с $R^2 = 0,75$, $RMSE = 0,007$, $F = 24$ при $p = 0,001$. Значения Z_V для j -го класса d снимают по $g_{1,3}$ соответствующей ступени толщины. Далее прирост запаса всего древостоя составит:

$$Z_{M_A} = \sum_{j=1}^m (Z_{V_j} \cdot n_j); \quad (7)$$

г) по элементарному приросту объема стволов проф. М.Л. Дворецкого:

$$Z_{V^{ei}} = Z_V \div Z_d \text{ от } d \text{ модельного дерева.} \quad (8)$$

где Z_d – текущий прирост по d . Для этого составляются модели зависимости $Z_{V^{ei}}$ от d и Z_d от d . В нашем случае применили следующие модели:

$$Z_{(V^{ei})} = -0,00005 \cdot d_j^2 + 0,0038 \cdot d_j - 0,0241, \quad (9)$$

с $R^2 = 0,79$, $RMSE = 0,014$, $F = 13$ при $p = 0,004$;

$$Z_{d_j} = 0,0057 \cdot d_j + 0,2284, \quad (10)$$

с $R^2 = 0,25$, $RMSE = 0,086$, $F = 3$ при $p = 0,14$.

Далее применяем формулу:

$$Z_{M_A} = \sum_{j=1}^m (Z_{V_j}^{ei} \cdot Z_{d_j} \cdot n_j). \quad (11)$$

Верификация Z_{M_A} в конце наблюдения проведена по способу д) простых процентов прироста площади сечений (P_g) и высоты (P_h) деревьев. С этой целью в конце вегетационного сезона 2023 г. в исследуемом насаждении в буферной зоне ППП заложены три круговые пробные площади, где путем случайной выборки по специально заданной схеме [Габделхаков и др., 2023] были отобраны 19 деревьев, на которых приростным буравом Пресслера взято 44 керна. На кернах произведено измерение ширины последних пяти годичных колец ствола (r_5) с точностью до 0,01 мм. Это позволило рассчитать P_g :

$$P_g = 100 \cdot \frac{d^2 - (d - d_{t-1})^2}{(d - d_{t-1})^2}, \quad (12)$$

где $d_{t-1} = d - 2r_5/5$ – диаметр год назад, см.

Далее, используя модель

$$h = 1,3 + 1,427204 \cdot d - 0,036890 \cdot d^2 + 0,000457 \cdot d^3 - 0,000002 \cdot d^4, \quad (13)$$

с $R^2 = 0,99$, $RMSE = 0,038$, $F = 55602$ при $p < 0,001$, составленную по данным сортиментных таблиц для второго разряда высот, рассчитывается P_h :

$$P_h = 100 \cdot \frac{h^2 - (h - h_{t-1})^2}{(h - h_{t-1})^2}, \quad (14)$$

где h_{t-1} – высота год назад (м), также найденная по модели (12).

Учитывая короткий учетный период обследования, только 5 последних лет, игнорируется вариационная составляющая коэффициента формы, следовательно, процентный прирост объема деревьев будет примерно равным:

$$P_V = P_g + P_h. \quad (15)$$

Выравненные по d расчетные значения P_V учетных деревьев по ступеням толщины используются для нахождения общего текущего прироста древостоя по запасу:

$$Z_{M_A} = \sum_{j=1}^m (Z_{V_j} \cdot n_j) = \sum_{j=1}^m (0,01 \cdot P_{V_j} \cdot V_j \cdot n_j). \quad (16)$$

Сравнение расчетных значений Z_{M_A} проведено по данным таблиц хода роста, разработанных во второй половине прошлого столетия [Козыяков, 1963; Буховец, 1965; Мурахтанов, 1972; Böckmann, 1991].

Все расчеты выполнены в Microsoft Excel и Statistica.

Результаты исследования. На начальный период наблюдения (57 лет) Z_d модельных деревьев изменялся от $0,25 \text{ см}\cdot\text{год}^{-1}$ для дерева ступени толщины в 20 см до $0,60 \text{ см}\cdot\text{год}^{-1}$ для доминантной модели (ступень толщины 36 см), при этом наименьшая модель (12 см) имела Z_d , равный $0,33 \text{ см}\cdot\text{год}^{-1}$ (табл. 1). Период перехода дерева из одной ступени толщины в следующую варьировал от 8 до 15 лет соответственно для ступеней толщины от 8 до 36 см. К 90 годам этот период перехода, рассчитанный по кернам, составил, соответственно, 20 и 24 года.

Измеренные значения Z_h колеблются от $0,07 \text{ м}\cdot\text{год}^{-1}$ до $0,55 \text{ м}\cdot\text{год}^{-1}$ для моделей ступени толщины 20 см, в то время как доминантная модель имела Z_h , равный $0,30 \text{ м}\cdot\text{год}^{-1}$, а модель с минимальным d имела значение $0,13 \text{ м}\cdot\text{год}^{-1}$.

Для P_V модельных деревьев наблюдается тенденция уменьшения с увеличением d – от 10,3% для модели самого меньшего размера до 4,4% для доминантной с некоторыми вариациями (средняя модель с $P_V = 3,9\%$).

Таблица 2

Динамика таксационных показателей исследуемого древостоя

Dynamics of inventory indicators of the studied tree stand

Возраст, лет	Средняя высота, м	Средний диаметр, см	Число стволов, $\text{экз.}\cdot\text{га}^{-1}$	Сумма площадей сечений, $\text{м}^2\cdot\text{га}^{-1}$	Запас леса, $\text{м}^3\cdot\text{га}^{-1}$	
					сыро-растущего	сухостойного и валежного
57	18,8	20,6	867	30,90	281	12
62	19,1	21,6	864	33,09	296	19
73	19,2	22,9	855	36,71	335	43
80	19,3	24,1	825	40,33	380	14
85	19,8	25,8	749	40,81	389	4
90	20,1	27,2	708	43,23	418	18

Окончание таблицы 2

Возраст, лет	Текущий прирост запаса древостоя ($\text{м}^3\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$) по способам определения				
	(а)	(б)	(в)	(г)	(д)
57	–	9,86	8,63	9,47	–
62	6,80	–	–	–	–
73	7,45	–	–	–	–
80	8,43	–	–	–	–
85	2,60	–	–	–	–
90	9,40	–	–	–	6,21

На основе шести учетов получен набор данных, характеризующий динамику таксационных показателей древостоя (табл. 2). Древостой охвачен инвентаризацией в возрасте от 57 до 90 лет. За этот период времени состав древостоя изменился от 9ЛП1Б+Д+В до 10ЛП+Б+Д+Кл, общее количество деревьев сократилось с 867 до 708 $\text{экз.}\cdot\text{га}^{-1}$. Присутствие березы уменьшилось с 13 особей на 1 га до 3, дуба – с 10 до 9. Три экземпляра вяза выпали к 73 годам. Количество деревьев клена, превысивших в процессе роста порог d в 6 см, к 90 годам составило 6 $\text{экз.}\cdot\text{га}^{-1}$. Распределение деревьев липы по ступеням толщины показало соответствие их нормальному распределению на всех этапах наблюдения. Средняя высота древостоя за этот период

увеличилась с 18,8 м до 20,1 м, а запас растущего леса – с 281 до $418 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$. За весь период наблюдения отпад составил $110 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$, причем в возрасте 62, 73 и 90 лет он в среднем был выше ($3,8, 3,9$ и $3,6 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ соответственно), чем в остальные периоды ($0,8–2,4 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$).

Общий текущий прирост древостоя в возрасте 62–90 лет варьирует в пределах $2,6–9,4 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ (табл. 2); в 57 лет, рассчитанный по данным одних и тех же модельных деревьев, но разными способами – $8,63–9,86$ (в среднем $9,32 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$). Сравнение расчетных значений Z_{M_A} с данными таблиц хода роста представлено на рис. 1.

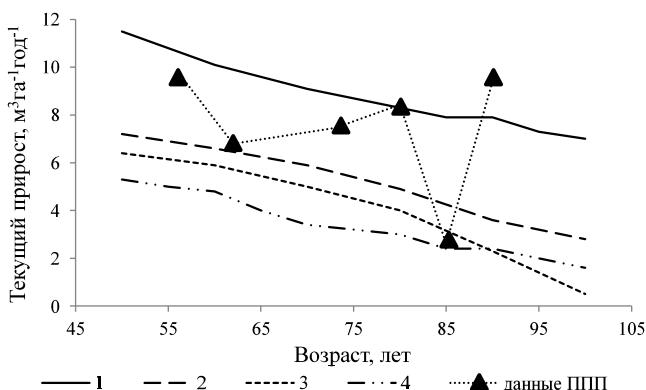


Рис. 1. Динамика Z_{M_A} древостоя липы по сравнению с таблицами хода роста Бöckmann T. [1991] (1), Буховец Г.М. [1965] (2), Козыякова С.И. [1963] (3), Мурахтанова Е.С. [1972] (4)

Fig. 1. Dynamics of Z_{M_A} of linden tree stand in comparison with the courses of the yield tables made by Böckmann T. [1991] (1), Bukhovets G.M. [1965] (2), Koz'yakov S.I. [1963] (3), Murakhtanov E.S. [1972] (4)

Обсуждение. В данном исследовании на основе 33-летних наблюдений на ППП древостоя липы мелколистной показаны несколько упрощенных способов оценки Z_{M_A} с результатом от $2,6$ до $9,4 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$. Причем показатель прироста для 85-летнего периода в $2,6 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ в два и более раза меньше, чем для остальных наблюдений. Можно предположить, что это реакция древостоя ППП на стрессовое воздействие повышения температуры при низких осадках в 2015–2016 гг. Точность определения прироста данным способом составляет в среднем $\pm 5–6\%$, отдельные погрешности могут достигать $\pm 8–10\%$ [Верхунов, Черных, 2007]. Для сравнения, в естественных лип-

няках Латвии, произрастающих в более благоприятных условиях, текущий прирост древостоев в возрасте 57–186 лет составил 8,9–14,5 $\text{м}^3\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ [Šnepsts et al., 2021]. По данным другого исследования в чистых липняках 80 лет с единичным участием сосны Z_{M_A} составил 6,0 $\text{м}^3\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$, в 90-летнем с примесью ели и ясения – 4,85 $\text{м}^3\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$, в смешанном липняке (6 единиц состава) с осиной, березой, ясенем и елью 115 лет – 10,65 $\text{м}^3\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ [Daugaviete et al., 2019]. В строго охраняемом заповеднике «Las lipowy Obrożyska» Польских Карпат реликтовые двухвековые липняки имели текущий прирост запаса от 6,30 до 9,58 $\text{м}^3\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ [Pach et al., 2013]. Данные Z_{M_A} исследованного древостоя заслуживают сравнения с текущим приростом липовых лесов Германии, где диапазоны продуктивности оцениваются в 8,8–5,0 $\text{м}^3\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ [Böckmann, 1990]. Таким образом, можно заключить, что исследованный липняк имеет прирост, сопоставимый с приростом европейских естественных древостоев липы.

Для начального периода наблюдения (57 лет) способы б), в) и г), основанные на применении данных анализа хода роста десяти модельных деревьев, дали близкие значения – в среднем 9,32 $\text{м}^3\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ (без учета отпада, который приближенно оценивается в размере 2,4 $\text{м}^3\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$). Различия Z_{M_A} между этими способами (0,4–1,2 $\text{м}^3\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$) обусловлены как методическим подходом, так и изменчивостью приростов модельных деревьев (Z_h , Z_d) и P_V , имеющим, независимо от возраста, тенденцию увеличения от толстых деревьев к тонким. По данным П.М. Верхунова и В.Л. Черных [2007] взятие 10–15 модельных деревьев обеспечивает определение прироста с точностью ±8–10%.

В 90 лет способ д) показал недооценку приращения запаса по сравнению с основным способом а) в 3,19 $\text{м}^3\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$. Однако если учесть величину отпада в 18 $\text{м}^3\cdot\text{га}^{-1}$ за 5 лет, то получаются вполне сопоставимые результаты: 9,40 $\text{м}^3\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ по способу а) и 9,81 $\text{м}^3\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ – по способу д). Следовательно, способ д) для оценки Z_{M_A} на ВПП, основанный на использовании анализа прироста на кернах и вероятностной скорости увеличения h по сортиментным таблицам, можно безопасно использовать при отсутствии возможности рубки модельных деревьев и замеров Z_h на растущих деревьях.

С дендрометрической точки зрения может показаться неправильным, что Z_h выводится не из реальных значений кривой h по A , а из вероятностной кривой h из сортиментных таблиц соответствующего разряда (h по d). Вероятностная кривая высот охватывает весь диапазон возможных расчетных проявлений диаметра, поэтому её можно отнести ко всему широкому диапазону индивидуальных возрастов. Кривые, выражющие изменения h ,

соответствующие изменениям d , в свою очередь подразумевают коррелированные изменения по A . Поэтому применение вероятностных кривых изменения h по сортиментным таблицам, соответствующее данному годовому изменению d , представляется правомерным [Scrinzi et al., 2011].

Анализ динамики Z_{M_A} исследуемого насаждения в сравнении с данными местных таблиц хода роста [Козыakov, 1963], соседней Республики Татарстан [Буховец, 1965] и региона Средней Волги [Мурахтанов, 1972] показывает значительную продуктивность (рис. 1). Это может свидетельствовать о благоприятных условиях произрастания данного древостоя и быть как единственным случаем, так и говорить об увеличении прироста древостоев в условиях меняющегося климата, которое отмечается в некоторых регионах Центральной Европы [Pretzsch et al., 2014, 2020; Hilmers et al., 2019]. Очевидно, что полученные данные не могут быть экстраполированы на длительные периоды и на другие насаждения. Несмотря на несопоставимые условия межсторонних сравнений, можно предположить, что отечественные таблицы хода роста липы (составлены в 60–70 гг.) и немецкие таблицы 90-х годов [Böckmann, 1991], где показатели Z_{M_A} в 1,5–2 раза превышают отечественные, отражают условия роста времени их составления. Более высокие, чем в прошлом, уровни прироста древостоев в настоящее время приводят к противоречивым оценкам продуктивности и жизнеспособности лесов [Pretzsch et al., 2022] и вызывают необходимость пересмотра существующих таблиц хода роста [Staupendahl et al., 2016; Albert et al., 2019].

Заключение. Наблюдаемый Z_{M_A} липы мелколистной на ППП высокий и значительно отличается от данных местных таблиц хода роста. В меняющихся климатических условиях для правильного принятия решений по рубкам и планированию лесного хозяйства в насаждениях липы необходима точная информация об их текущем приросте. Это вызывает необходимость как постоянных, так и краткосрочных исследований в этой области. В этих рамках оценки Z_{M_A} по способам а) и д) следует признать наиболее предпочтительными. Способ д) с учетом смертности деревьев позволяет получить достоверные результаты путем однократных наблюдений без рубки модельных деревьев.

Для получения статистически подтвержденных результатов влияния климата на Z_{M_A} насаждений липы в условиях Республики Башкортостан и необходимости корректировки местных таблиц хода роста необходимы дальнейшие исследования с использованием большего объема данных.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Буховец Г.М.* Рост и продуктивность липовых насаждений Татарской АССР: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Воронеж: Воронежский лесотехнический институт, 1965. 22 с.
- Верхунов П.М., Черных В.Л.* Таксация леса: учебное пособие. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2007. 396 с.
- Габделхаков А.К., Бикмухаметов А.А., Ахметкужин Д.И.* Апробация методики измерения текущего прироста древостоя липы мелколистной // Наука молодых – инновационному развитию АПК : матер. XVI Национальной научно-практической конференции. Уфа. 2023. Ч. 1. С. 20–26.
- Козыяков С.И.* Ход роста липовых насаждений по типам леса Башкирской АССР // Труды Башкирского сельскохозяйственного института. 1963. Т. 11. Ч. 1. С. 64–67.
- Мурахтанов Е.С.* Основы организации комплексного хозяйства в липняках Средней Волги. Л.: Изд-во ЛГУ, 1972. 302 с.
- Сортиментные и товарные таблицы для равнинных лесов Урала. М.: ВНИИЛМ, 2002. 488 с.
- Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцова. СПб.: Наукомекие технологии, 2022. 676 с.
- Albert M., Nagel R.-V., Nuske R.S., Stuttmöller J., Spellmann H.* Tree Species Selection in the Face of Drought Risk—Uncertainty in Forest Planning // Forests. 2017. Vol. 8, iss. 10. Art. no. 363. DOI: 10.3390/f8100363
- Albert M., Nagel J., Nagel R.-V., Spellmann H.* Eine neue Generation dynamischer Ertragstafeln für Nordwestdeutschland – erste Ergebnisse für die Baumart Buche // Tagungsband zur Jahrestagung der Sektion Ertragskunde im DVFFA vom 03.-05.06.2019 in Zwiesel/Bayern. 2019. S. 21–30.
- Böckmann T.* Wachstum und Ertrag der Winterlinde (*Tilia cordata* Mill.) in Niedersachsen und Nordhessen: Dissertation [Ph. D. Thesis] Forstl. Fak. Univ. Göttingen. 1990. 143 s.
- Böckmann T.* Ertragstafel für Winterlinde (*Tilia cordata* Milk) in Niedersachsen und Nordhessen // Allg. Forst-Jagdztg. 1991. Band. 162. P. 28–34.
- Dahlhausen J., Rötzer T., Biber P., Uhl E., Pretzsch H.* Urban climate modifies tree growth in Berlin // Int. J. Biometeorol. 2018. Vol. 62. P. 795–808. DOI: 10.1007/s00484-017-1481-3
- Daugaviete M., Lazdina D., Celma S., Daugavietis U.* Characteristic growing parameters of small-leaved lime and Norway maple stands in the climatic conditions of Latvia // Acta Biol. Univ. Daugavp. 2019. Vol. 19, iss. 2. P. 115–128.
- Hemery G.E., Clark J.R., Aldinger E., Claessens H., Malvolti M.E., O'Connor E., Raftoyannis Y., Savill P.S., Brus P.* Growing scattered broadleaved tree species in Europe in a changing climate: a review of risks and opportunities // Forestry: An Int. J. of Forest Research. 2010. Vol. 83, iss. 1. P. 65–81. DOI: 10.1093/forestry/cpp034

Heym M., Bielak K., Wellhausen K., Uhl E., Biber P., Perkins D., Steckel M., Thurm E.A., Rais A., Pretzsch A. A New Method to Reconstruct Recent Tree and Stand Attributes of Temporary Research Plots: New Opportunity to Analyse Mixed Forest Stands // Conifers. IntechOpen. 2018. P. 25–46. DOI: 10.5772/intechopen.79682

Hilmers T., Avdagic A., Bartkowicz L., Bielak K., Binder F., Boncina A., Dobor L., Forrester D.J., Hobi M.L., Ibrahimspahić A., Jaworski A., Klopčić M., Matović B., Nagel T.A., Petrás R., Rio M. del, Stajić B., Uhl E., Zlatanov T., Tognetti R., Pretzsch H. The productivity of mixed mountain forests comprised of *Fagus sylvatica*, *Picea abies*, and *Abies alba* across Europe // Forestry: An Int. J. of Forest Research. 2019. Vol. 92, iss. 5. P. 512–522. DOI: 10.1093/forestry/cpz035

Jaegere T. de, Hein S., Claessens H. A Review of the Characteristics of Small-Leaved Lime (*Tilia cordata* Mill.) and Their Implications for Silviculture in a Changing Climate // Forests. 2016. Vol. 7, iss. 3. Art. no. 56. DOI: 10.3390/f7030056

Juknys R., Sujetoviene G., Zeimavicius K., Gustainyte J. Effects of climate warming on timing of lime (*Tilia cordata* L.) phenology // 8th International Conference on Environmental Engineering. Vilnius. 2011. Vol. 1. P. 139–143.

Kohnle U., Albrecht A., Lenk E., Ohnemus K., Yue C. Zuwachstrends im Spiegel langfristiger Versuchsflächen in Südwestdeutschland // Allgemeine Forst und Jagdzeitung. 2014. Band 185, Heft 5/6. P. 97–117.

Latte N., Taverniers P., de Jaegere T., Claessens H. Dendroecological assessment of climate resilience of the rare and scattered forest tree species *Tilia cordata* Mill. in northwestern Europe // Forestry: An Int. J. of Forest Research. 2020. Vol. 93, iss. 5. P. 675–684. DOI: 10.1093/forestry/cpaa011

Martinez Del Castillo E., Zang C.S., Buras A., Hacket-Pain A., Esper J., Serrano-Notivoli R., Hartl C., Weigel R., Klesse S., Resco de Dios V., Scharnweber T., Dorado-Liñán I., Maaten-Theunissen M. van der, Maaten E. van der, Jump A., Mikac S., Banzragch B.-E., Beck W., Cavin L., Claessens H., Čada V., Čufar K., Dulamsuren C., Grigar J., Gil-Pelegriñ E., Janda P., Kazimirovic M., Kreyling J., Latte N., Leuschner C., Longares L.A., Menzel A., Merela M., Motta R., Muffler L., Nola P., Petritan A.M., Petritan J.C., Prislan P., Rubio-Cuadrado A., Rydval M., Stajić B., Svoboda M., Toromani E., Trotsiuk V., Wilmking M., Zlatanov T., Luis M. de Climate-change-driven growth decline of European beech forests // Communications biology. 2022. Vol. 5. Art. no. 163. DOI: 10.1038/s42003-022-03107-3

Muffler L., Weigel R., Hacket-Pain A.J., Klisz M., Maaten E. van der, Wilmking M., Kreyling J., Maaten-Theunissen M. van der Lowest drought sensitivity and decreasing growth synchrony towards the dry distribution margin of European beech // J. Biogeogr. 2020. Vol. 47. P. 1910–1921. DOI: 10.1111/jbi.13884

Pach M., Jaworski A., Skrzyszewski J. *Acer Pseudoplatanus* L., *Tilia Cordata* Mill. and *Pinus Sylvestris* L. as Valuable Tree Species in the Carpathian Forests // The Carpathians: Integrating Nature and Society Towards Sustainability. 2013. P. 285–300. DOI: 10.1007/978-3-642-12725-0_21

Pigott D. Lime-trees and Basswoods: A Biological Monograph of the Genus *Tilia*. 1st ed. New York: Cambridge University Press, 2012. 405 p.

Pretzsch H. Forest dynamics, growth and yield. Springer, Berlin, 2009. 664 p.
DOI: 10.1007/978-3-540-88307-4

Pretzsch H., Hilmers T., Uhl E., Río M. del, Avdagić A., Bielak K., Bončina A., Coll L., Giammarchi F., Stimm K., Tonon G., M. Höhn, Kašanin-Grubin M., Tognetti R. Efficacy of Trans-geographic Observational Network Design for Revelation of Growth Pattern in Mountain Forests Across Europe // Managing Forest Ecosystems. Springer, 2022. Vol. 40: Climate-Smart Forestry in Mountain Regions. P. 141–187. DOI: 10.1007/978-3-030-80767-2_5

Pretzsch H., Ammer C., Wolff B., Steckel M., Rukh S., Heym M. Zuwachsniveau, Zuwachstrend und episodische Zuwachseinbrüche. Ein zusammenfassendes Bild vom aktuellen Zuwachsgang in Rein- und Mischbeständen aus Fichte, Kiefer, Buche und Eiche // Allgemeine Forst- und Jagdzeitung. 2020. Band 191. P. 1–21. DOI: 10.23765/afjz0002055.

Pretzsch H., Biber P., Schütze G., Uhl E., Rötzer T. Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870 // Nat. Commun. 2014. Vol. 5. Art. no. 4967. DOI: 10.1038/ncomms5967

Pretzsch H., Río M. del, Biber P., Arcangeli C., Bielak K., Brang P., Dudzinska M., Forrester D.I., Kladtke J., Kohnle U., Ledermann T., Matthews R., Nagel J., Nagel R., Nilsson U., Ningre F., Nord-Larsen T., Wernsdorfer H., Sycheva E. Maintenance of long-term experiments for unique insights into forest growth dynamics and trends: review and perspectives // Eur. J. Forest Res. 2019. Vol. 138. P. 165–185. DOI: 10.1007/s10342-018-1151-y

Scrinzi G., Clementel F., Colle G., Farruggia C., Floris A., Torresan C. L'inventario dendrometrico nella nuova pianificazione forestale aziendale trentina (NPFAT). Provincia Autonoma di Trento – Servizio Foreste e Fauna, Consiglio per la Ricerca e la Sperimentazione in Agricoltura. 2011. 105 p.

Šņepsīts G., Donis J., Kaupe D., Laivīņš M. Deciduous Broad-Leaved Species (*Quercus Robur*, *Tilia Cordata*, *Acer Platanoides* and *Ulmus Laevis*) Forest Stand Productivity in Latvia // Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B. Natural, Exact, and Applied Sciences. 2021. Vol. 75, iss. 4. P. 239–247. DOI: 10.2478/prolas-2021-0036.

State of the Global Climate 2020. WMO. 2021. № 1264. 56 p.

Staupendahl K., Schmidt M. Kalibrierung der Ertragstafeln für die Hauptbaumarten in Hessen mithilfe der Daten der Bundeswaldinventur // Allgemeine Forst und Jagdzeitung. 2016. Band 187. P. 197–216.

References

Albert M., Nagel R.-V., Nuske R.S., Sutmöller J., Spellmann H. Tree Species Selection in the Face of Drought Risk—Uncertainty in Forest Planning. *Forests*, 2017, vol. 8, iss. 10, art. no. 363. DOI: 10.3390/f8100363

Albert M., Nagel J., Nagel R.-V., Spellmann H. Eine neue Generation dynamischer Ertragstafeln für Nordwestdeutschland – erste Ergebnisse für die Baumart Buche. *Tagungsband zur Jahrestagung der Sektion Ertragskunde im DVFFA vom 03.-05.06.2019 in Zwiesel/Bayern*, 2019, pp. 21–30.

Böckmann T. Wachstum und Ertrag der Winterlinde (*Tilia cordata* Mill.) in Niedersachsen und Nordhessen. Dissertation [Ph. D. Thesis] Forstl. Fak. Univ. Göttingen. 1990. 143 p.

Böckmann T. Ertragstafel für Winterlinde (*Tilia cordata* Milk) in Niedersachsen und Nordhessen. *Allg. Forst-Jagdztg*, 1991, vol. 162, pp. 28–34.

Bukhovets G.M. Rost i produktivnost' lipovykh nasazhdemii Tatarskoi ASSR: author's abstract. Diss... Candidate of Agricultural Sciences. Voronezh: Voronezhskiy lesotekhnicheskiy institut, 1965. 22 p. (In Russ.)

Dahlhausen J., Rötzer T., Biber P., Uhl E., Pretzsch H. Urban climate modifies tree growth in Berlin. *Int. J. Biometeorol*, 2018, vol. 62, pp. 795–808. DOI: 10.1007/s00484-017-1481-3

Daugaviete M., Lazdina D., Celma S., Daugavietis U. Characteristic growing parameters of small-leaved lime and Norway maple stands in the climatic conditions of Latvia. *Acta Biol. Univ. Daugavp*, 2019, vol. 19, iss. 2, pp. 115–128.

Gadelkhakov A.K., Bikmukhametov A.A., Akhmetkuzhin D.I. Aprobatsiya metodiki izmereniya tekushchego prirosta drevostoya lipy melkolistnoi. *Materialy XVI Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Nauka molodykh – innovatsionnomu razvitiyu APK»*. Ufa, 2023, part 1, pp. 20–26. (In Russ.)

Hemery G.E., Clark J.R., Aldinger E., Claessens H., Malvolti M.E., O'Connor E., Raftoyannis Y., Savill P.S., Brus P. Growing scattered broadleaved tree species in Europe in a changing climate: a review of risks and opportunities. *Forestry: An Int. J. of Forest Research*, 2010, vol. 83, iss. 1, pp. 65–81. DOI: 10.1093/forestry/cpp034

Heym M., Bielak K., Wellhausen K., Uhl E., Biber P., Perkins D., Steckel M., Thurm E.A., Rais A., Pretzsch A. A New Method to Reconstruct Recent Tree and Stand Attributes of Temporary Research Plots: New Opportunity to Analyse Mixed Forest Stands. *Conifers*, IntechOpen, 2018, pp. 25–46. DOI: 10.5772/intechopen.79682

Hilmers T., Avadagić A., Bartkowicz L., Bielak K., Binder F., Bončina A., Dobor L., Forrester D.I., Hobi M.L., Ibrahimspahić A., Jaworski A., Klopčić M., Matović B., Nagel T.A., Petrás R., Rio M. del, Stajić B., Uhl E., Zlatanov T., Tognetti R., Pretzsch H. The productivity of mixed mountain forests comprised of *Fagus sylvatica*, *Picea abies*, and *Abies alba* across Europe. *Forestry: An Int. J. of Forest Research*, 2019, vol. 92, iss. 5, pp. 512–522. DOI: 10.1093/forestry/cpz035

Jaegere T. de, Hein S., Claessens H. A Review of the Characteristics of Small-Leaved Lime (*Tilia cordata* Mill.) and Their Implications for Silviculture in a Changing Climate. *Forests*, 2016, vol. 7, iss. 3, art. no. 56. DOI: 10.3390/f7030056

Juknys R., Sujetoviene G., Zeimavicius K., Gustainyte J. Effects of climate warming on timing of lime (*Tilia cordata* L.) phenology. *8th International Conference on Environmental Engineering*, 2011, vol. 1, pp. 139–143.

Kohnle U., Albrecht A., Lenk E., Ohnemus K., Yue C. Zuwachstrends im Spiegel langfristiger Versuchsflächen in Südwestdeutschland. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, 2014, vol. 185, iss. 5/6, pp. 97–117.

Koz'yakov S.I. Khod rosta lipovykh nasazhdennii po tipam lesa Bashkirskoi ASSR. *Trudy Bashkirskogo sel'skokhozyaistvennogo instituta*, 1963, t. 11, part 1, pp. 64–67. (In Russ.)

Latte N., Taverniers P., Jaegere T. de, Claessens H. Dendroecological assessment of climate resilience of the rare and scattered forest tree species *Tilia cordata* Mill. in northwestern Europe. *Forestry: An Int. J. of Forest Research*, 2020, vol. 93, iss. 5, pp. 675–684. DOI: 10.1093/forestry/cpa011

Martinez Del Castillo E., Zang C.S., Buras A., Hacket-Pain A., Esper J., Serrano-Notivoli R., Hartl C., Weigel R., Klesse S., Resco de Dios V., Scharnweber T., Dorado-Liñán I., Maaten-Theunissen M. van der, Maaten E. van der, Jump A., Mikac S., Banzragch B.-E., Beck W., Cavin L., Claessens H., Čada V., Čufar K., Dulamsuren C., Gričar J., Gil-Pelegrín E., Janda P., Kazimirovic M., Kreyling J., Latte N., Leuschner C., Longares L.A., Menzel A., Merela M., Motta R., Muffler L., Nola P., Petritan A.M., Petritan J.C., Prislan P., Rubio-Cuadrado A., Rydval M., Stajić B., Svoboda M., Toromani E., Trotsiuk V., Wilmkimg M., Zlatanov T., Luis M. de Climate-change-driven growth decline of European beech forests. *Communications biology*, 2022, vol. 5, art. no. 163. DOI: 10.1038/s42003-022-03107-3

Muffler L., Weigel R., Hacket-Pain A.J., Klisz M., Maaten E. van der, Wilmkimg M., Kreyling J., Maaten-Theunissen M. van der Lowest drought sensitivity and decreasing growth synchrony towards the dry distribution margin of European beech. *J. Biogeogr.*, 2020, vol. 47, pp. 1910–1921. DOI: 10.1111/jbi.13884

Murakhtanov E.S. Osnovy organizatsii kompleksnogo khozyaistva v lipnyakakh Srednei Volgi. L.: Izd-vo LGU, 1972. 302 p. (In Russ.)

Pach M., Jaworski A., Skrzyszewski J. *Acer Pseudoplatanus* L., *Tilia Cordata* Mill. and *Pinus Sylvestris* L. as Valuable Tree Species in the Carpathian Forests. *The Carpathians: Integrating Nature and Society Towards Sustainability*, 2013, pp. 285–300. DOI: 10.1007/978-3-642-12725-0_21.

Pigott D. Lime-trees and Basswoods: A Biological Monograph of the Genus *Tilia*. 1st ed. New York: Cambridge University Press, 2012. 405 p.

Pretzsch H. Forest dynamics, growth and yield. Springer, Berlin, 2009. 664 p. DOI: 10.1007/978-3-540-88307-4

Pretzsch H., Hilmers T., Uhl E., Río M. del, Avadić A., Bielak K., Bončina A., Coll L., Giammarchi F., Stimm K., Tonon G., M. Höhn, Kašanin-Grubin M., Tognetti R. Efficacy of Trans-geographic Observational Network Design for Revelation of Growth Pattern in Mountain Forests Across Europe. *Managing Forest Ecosystems*, 2022, vol. 40: Climate-Smart Forestry in Mountain Regions, pp. 141–187. DOI: 10.1007/978-3-030-80767-2_5

Pretzsch H., Ammer C., Wolff B., Steckel M., Rukh S., Heym M. Zuwachs niveau, Zuwachstrend und episodische Zuwachseinbrüche. Ein zusammenfassendes Bild vom

aktuellen Zuwachsgang in Rein- und Mischbeständen aus Fichte, Kiefer, Buche und Eiche. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, 2020, vol. 191, pp. 1–21. DOI: 10.23765/afjz0002055.

Pretzsch H., Biber P., Schütze G., Uhl E., Rötzer T. Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. *Nat. Commun.*, 2014, vol. 5, art. no. 4967. DOI: 10.1038/ncomms5967

Pretzsch H., Río M. del, Biber P., Arcangeli C., Bielak K., Brang P., Dudzinska M., Forrester D.I., Kladtke J., Kohnle U., Ledermann T., Matthews R., Nagel J., Nagel R., Nilsson U., Ningre F., Nord-Larsen T., Wernsdorfer H., Sycheva E. Maintenance of long-term experiments for unique insights into forest growth dynamics and trends: review and perspectives. *Eur. J. Forest Res.*, 2019, vol. 138, pp. 165–185. DOI: 10.1007/s10342-018-1151-y

Scrinzi G., Clementel F., Colle G., Farruggia C., Floris A., Torresan C. L'inventario dendrometrico nella nuova pianificazione forestale aziendale trentina (NPFAT). Provincia Autonoma di Trento – Servizio Foreste e Fauna, Consiglio per la Ricerca e la Sperimentazione in Agricoltura. 2011. 105 p.

Šnepsts G., Donis J., Kaupe D., Laiviņš M. Deciduous Broad-Leaved Species (*Quercus Robur*, *Tilia Cordata*, *Acer Platanoides* and *Ulmus Laevis*) Forest Stand Productivity in Latvia. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B. Natural, Exact, and Applied Sciences*, 2021, vol. 75, iss. 4, pp. 239–247. DOI: 10.2478/prolas-2021-0036.

Sortimentnye i tovarnye tablitsy dlya ravninnykh lesov Urala. M.: VNIILM, 2002. 488 p. (In Russ.)

State of the Global Climate 2020. WMO. 2021. 1264. 56 p.

Staupendahl K., Schmidt M. Kalibrierung der Ertragstafeln für die Hauptbaumarten in Hessen mithilfe der Daten der Bundeswaldinventur. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, 2016, vol. 187, pp. 197–216.

Tretiy otsenochny doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoy Federatsii. St. Petersburg: Naukoemkie tekhnologii, 2022. 676 p. (In Russ.)

Verkhunov P.M., Chernykh V.L. Taksatsiya lesa: uchebnoe posobie. Ioshkar-Ola, 2007. 396 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 27.02.2024

Габделхаков А.К. Динамика текущего прироста древостоя липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 252. С. 211–228. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.211-228

Исследование текущего среднепериодического прироста запаса (Z_{M_A}) древостоя липы на постоянной пробной площади в Республике Башкортостан

преследовало три цели: 1) оценить величину Z_{M_A} ; 2) сравнить методы оценки Z_{M_A} по данным длительных наблюдений и по однократным измерениям; 3) сопоставить Z_{M_A} исследуемого древостоя с данными существующих таблиц хода роста. Оценка Z_{M_A} выполнена несколькими способами: а) путем повторных измерений запаса древостоя с учетом смертности и роста деревьев, превысивших порог d в 6 см, за 33-летний период; б) через проценты объемного прироста десяти срубленных модельных деревьев и запаса древостоя без коры; в) по прямой текущего объемного прироста модельных деревьев; г) по элементарному приросту объема стволов проф. М.Л. Дворецкого; д) по способу простых процентов прироста площади сечения с использованием информации за последние 5 лет из кернов и высоты деревьев. Полученные данные показали, что Z_{M_A} древостоя в возрасте 57 лет, рассчитанные по модельным деревьям, (способы б), в) и г)) составили 9,86, 8,63 и $9,47 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ соответственно. В возрасте 62–90 лет они варьируют от 2,6 до $9,4 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$. Способ д) для оценки Z_{M_A} , основанный на использовании анализа прироста на кернах и вероятностной скорости увеличения высоты по сортиментным таблицам с учетом смертности деревьев в древостое, можно безопасно использовать при отсутствии возможности рубки модельных деревьев и замеров прироста по высоте на растущих деревьях. Значения Z_{M_A} исследованного древостоя превосходят данные местных таблиц хода роста и сопоставимы по своей величине с немецкими таблицами. Необходимы дальнейшие исследования с использованием большего объема данных для получения статистически подтвержденных результатов влияния климата на текущий прирост насаждений липы и корректировки местных таблиц хода роста.

Ключевые слова: липа мелколистная, постоянная пробная площадь, текущий среднепериодический прирост, процент текущего годового прироста, приростные керны, текущий годовой прирост, таблица хода роста, Республика Башкортостан.

Gabdelkhakov A.K. Dynamics of the current growth of the small-leaved linden tree stand (*Tilia cordata* Mill.). *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 252, pp. 211–228 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.211-228

Investigation of the periodic annual increment volume (PAIV) linden stand on a permanent research plot in the Republic of Bashkortostan, pursued three goals: 1) to evaluate the PAIV; 2) comparison of methods for estimating PAIV based on long-term observations and by single measurement; 3) to compare the PAIV of the studied stand with the data of existing yield tables. PAIV assessment is performed in several ways: i) by repeated measurements of the volume of the stand, taking into account mortality and ingrowth of trees over a 33-year period; ii) through of the percentage PAIV of ten

felled model trees and the volume of stand without bark; ii) along the straight line of the PAIV of model trees; iv) according to the elementary PAIV of trees of Prof. M.L. Dvoretsky; v) according to the method of simple percent increment of basal area, using information for the last 5 years from cores, and of simple percent increment of height of trees. The data obtained showed that P of the tree stand at the age of 57 years calculated using model trees (methods ii), iii) and iv)) were 9.86 , 8.63 и $9.47 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$ accordingly. At the age of 62-90 years they vary between 2.6 and $9.4 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$. Method v) for estimating PAIV, based on the use of growth analysis on cores and the probabilistic rate of increase in height according to assortment tables taking into account the mortality of trees in the forest stand, can be safely used in the absence of the possibility of cutting down model trees and measuring height gain on growing trees. The PAIV values of the studied tree stand exceed the data from local yield tables and are comparable in value to German tables. It is concluded that further research is necessary using a larger volume of data to obtain statistically confirmed results of the influence of climate on the PAIV of linden plantings and adjustments to local yield tables.

Keywords: small-leaved lime, permanent research plot, periodic annual volume increment, percentage current annual increment, increment cores, current annual increment, yield table, Republic of Bashkortostan.

ГАБДЕЛХАКОВ Айдар Кавилович – доцент кафедры лесоводства и ландшафтного дизайна Башкирского государственного аграрного университета, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 1210-5914. ResearcherID: G-3023-2018. ORCID: 0000-0001-7129-880X. Scopus AuthorID: 57203967642.

450001, ул. 50-летия Октября, д. 34, г. Уфа, Россия. E-mail: aliya201199@mail.ru

GABDELKHAKOV Aydar K. – PhD (Agriculture), Associate Professor of the Department of Forestry and landscape design, Bashkir State Agrarian University. SPIN-code: 1210-5914. ResearcherID: G-3023-2018. ORCID: 0000-0001-7129-880X. Scopus AuthorID: 57203967642.

450001. 50-letia Octyabrya str. 34. Ufa. Russian Federation. E-mail: aliya201199@mail.ru

И.В. Шевелина, З.Я. Нагимов, И.С. Сальникова, В.З. Нагимов

**ОЦЕНКА ЗАПАСОВ НАДЗЕМНОЙ ФИТОМАССЫ
И УГЛЕРОД ДЕПОНИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ
СОСНОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ
В ГОРОДСКИХ ЛЕСАХ Г. ЕКАТЕРИНБУРГА**

Введение. В настоящее время с увеличением масштабов техногенного загрязнения окружающей среды существенно возрастает средозащитное значение лесов, особенно прилегающих к крупным промышленным центрам. Лесные насаждения вокруг городов и в пределах городской черты выполняют роль фитофильтра на пути распространения индустриальных и транспортных эмиссий в окружающую среду. Многие исследователи считают, что средоочищающий потенциал лесов тесно связан с их биологической продуктивностью, и указывают на важность региональных оценок фитомассы насаждений отдельных древесных пород с использованием лесоустроительных данных [Алексеев, Бердси, 1994; Уткин и др., 1999; Щепашенко, 2005; Вараксин и др., 2008; Усольцев, 2018; Kurbanov, Post, 2002; Zamolodchikov et al., 2005; Shvidenko et al., 2008].

Во многих районах страны, в том числе и на Урале, получены достаточно полные сведения о фитомассе насаждений в государственном лесном фонде. Леса городских поселений, не входящие в государственный лесной фонд, в этом отношении остаются слабоизученными. В то же время именно им отводится главная роль в оздоровлении окружающей среды и санитарно-гигиенических условий жизни в городах.

Целью исследований явилось определение запасов надземной фитомассы сосновых древостоев и объемов депонирования ими углерода в границах муниципального образования «город Екатеринбург».

Материалы и методика исследования. В настоящее время на территории муниципального образования «город Екатеринбург» экологические и средозащитные функции выполняют лесные насаждения городских лесов, которые делятся на три категории по подчинению – муниципальному (площадь лесов составляет 2934,8 га), областному (12094,8 га) и федеральному (29306,4 га). Все они вместе образуют мощный защитный лесной пояс города. В этом поясе общая площадь лесов составляет 44336 га, в том числе

земель, покрытых лесной растительностью – 38379,9 га (86,6% от общей площади). На исследуемой территории преобладают сосновые насаждения. Их доля по площади в составе земель, покрытых лесной растительностью, составляет 73,6%, поэтому они выбраны нами в качестве объектов исследования. Таксационная характеристика сосняков в городских лесах г. Екатеринбурга в разрезе подчиненности приведена в табл. 1. Данные табл. 1 свидетельствуют, что исследуемые объекты характеризуются близкими таксационными показателями.

Таблица 1

**Средние таксационные показатели сосняков в городских лесах
в разрезе их административного подчинения**

**Average taxation parameters of pine stands in urban forests
in the context of their administrative subordination**

Подчиненность лесов	Возраст, лет	Диаметр, см	Высота, м	Относительная полнота	Запас, м ³	Класс бонитета
муниципальная	111	28,9	23,9	0,69	272	II
областная	105	30,0	23,8	0,68	290	II
федеральная	110	28,4	24,0	0,72	366	II

Для достижения поставленной цели необходимо располагать моделями, показывающими изменение фракций фитомассы отдельных древостоев в зависимости от их основных таксационных показателей, и материалами распределения площади всех древостоев по этим показателям на исследуемой территории. Последние составляются на основе повыдельной базы лесоустроительных данных.

В районе исследований изучением фитомассы сосновых древостоев и разработкой различного рода моделей для ее оценки целенаправленно занимались на кафедре лесной таксации и лесоустройства УГЛТУ [Усольцев и др., 1991; Усольцев и др., 1993; Усольцев и др., 1994; Трофимова и др., 2012]. В нашей работе использованы модели, разработанные З.Я. Нагимовым [2000] на основе результатов предыдущих исследований, которые прошли верификацию [Трофимова, 2015] и успешно применяются в лесоводственно-таксационных исследованиях [Трофимова, 2015; Нагимов и др., 2019]:

Для фракции «ствол в коре» (P_c):

$$P_c = 2,2929 + 0,41008 M + 0,09575 A - 0,30596 H_{100}, \quad (1)$$

$$t_0 = 1,6; t_1 = 75,0; t_2 = 4,3; t_3 = -2,2; R^2 = 0,985; \delta = \pm 6,7\%.$$

Для фракции «древесина ствола» (P_{dc}):

$$P_{dc} = -0,55098 + 0,38426 M + 0,08643 A - 0,23402 H_{100}, \quad (2)$$

$$t_0 = -2,3; t_1 = 70,0; t_2 = 3,8; t_3 = -1,8; R^2 = 0,980; \delta = \pm 7,2\%;$$

Для фракции «крона» (P_{kp}):

$$\begin{aligned} \ln P_{kp} = & -31,3807 + 11,7002 \ln A - 0,9163 \ln^2 A - 4,8194 \ln S_p - \\ & - 0,8164 \ln^2 S_p - 0,0128 \ln^3 S_p + 9,1610 \ln H_{100} - \\ & - 0,5330 \ln^2 H_{100} + 0,7291 \ln A \ln S_p - 1,7713 \ln A \ln H_{100} + \\ & + 0,6126 \ln S_p \ln H_{100} + 0,0714 \ln A \ln S_p \ln H_{100}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$t_0 = -17,4; t_1 = 20,0; t_2 = -19,5; t_3 = -11,4; t_4 = -10,5; t_5 = -5,8; t_6 = 13,1; \\ t_7 = -6,9; t_8 = 7,8; t_9 = -17,3; t_{10} = 5,5; t_{11} = 2,7; R^2 = 0,890; \delta = \pm 13,5\%;$$

Для фракции «хвоя» (P_{xb}):

$$\begin{aligned} \ln P_{xb} = & -26,4189 + 9,9839 \ln A - 0,8610 \ln^2 A - 1,9971 \ln S_p - \\ & - 0,0849 \ln^2 S_p - 0,0109 \ln^3 S_p + 7,0217 \ln H_{100} - 0,3926 \ln^2 H_{100} + \\ & + 0,05241 \ln A \ln S_p - 1,3139 \ln A \ln H_{100} + 0,2429 \ln S_p \ln H_{100} + \\ & + 0,0654 \ln A \ln S_p \ln H_{100}; \end{aligned} \quad (4)$$

$$t_0 = -25,5; t_1 = 30,0; t_2 = -29,1; t_3 = -11,1; t_4 = -10,1; t_5 = -5,8; t_6 = 17,9; \\ t_7 = -9,1; t_8 = 10,7; t_9 = -22,8; t_{10} = 5,0; t_{11} = 5,4; R^2 = 0,885; \delta = \pm 13,7\%.$$

Примечание: в моделях (1)–(4) P_c , P_{dc} , P_{kp} , P_{xb} – соответственно масса стволов, древесины стволов, крон и хвои в абсолютно сухом состоянии на 1 га, т/га; M – запас древесины на 1 га, м³/га; A – средний возраст древостоя, лет; H_{100} – средняя высота древостоев в столетнем возрасте, м; S_p – средняя площадь питания деревьев, м²; R^2 – коэффициент детерминации; δ – среднеквадратическая ошибка, %; t – значение t критерия Стьюдента

В уравнениях (1) и (2) обращают на себя внимание знаки констант при независимых переменных, особенно при факторах A и H_{100} . Фитомасса стволов повышается с увеличением запаса, что вполне логично и особых разъяснений не требует. Масса одного кубического метра древесины в абсолютно сухом состоянии увеличивается с повышением возраста деревьев и уменьшается с улучшением лесорастительных условий (класса бонитета). Этот известный в исследованиях фитомассы факт объясняется возрастной и экологической изменчивостью плотности древесины [Нагимов, 2000; Lebedev, Kuzmichev, 2022]. Плотность древесины при прочих равных

условиях увеличивается с повышением возраста древостоев и уменьшается с улучшением лесорастительных условий.

В повыделенной базе лесоустроительных данных для древостоев представлены не все таксационные показатели, являющиеся определяющими факторами в уравнениях (1)–(4). В частности, в ней отсутствуют такие показатели, как высота древостоя в возрасте 100 лет (H_{100}) и средняя площадь питания деревьев (S_p). Следует отметить, что последний показатель в уравнениях множественной регрессии опосредует влияние густоты древостоев на варьирование фитомассы [Нагимов, 2000]. В связи с вышеизложенным в базе данных для каждого выдела были определены эти два показателя на основе приведенных ниже методических решений.

Показатель H_{100} устанавливался на основе бонитетной шкалы М.М. Орлова с учетом достигнутой древостоем высоты в конкретном возрасте. При этом предполагалась параллельность изменения во времени средних высот древостоев кривым высот бонитетной шкалы [Нагимов, 2000].

Средняя площадь питания деревьев в лесотаксационном выделе определялась по формуле:

$$S_p = \frac{10000}{N}, \quad (5)$$

где S_p – средняя площадь питания деревьев, m^2 ; N – количество деревьев всех элементов леса на 1 га, шт./га.

Количество деревьев (N) вычислялось по следующему алгоритму. На первом этапе для каждого элемента леса, входящего в состав насаждения выдела, определялась площадь поперечного сечения среднего дерева (g_m) через его средний диаметр (d_m) по формуле:

$$g_m = \frac{\pi d_m^2}{4}, \quad (6)$$

где g_m – площадь поперечного сечения среднего дерева, m^2 ; d_m – диаметр среднего дерева, м.

На втором этапе на основе применяемой в регионе стандартной таблицы [Верхунов и др., 1991] для каждого элемента леса лесотаксационного выдела определялась сумма площадей сечений ($\sum G$) на 1 га и с учетом этого показателя – количество деревьев. Причем вначале по данным указанной таблицы для всех пород, встречающихся в повыдельной базе данных, с применением соответствующих статистических процедур были получены уравнения зависимости $\sum G$ от высоты (H). Затем на основе этих уравнений с учетом средней высоты элементов леса вычислялись их суммы площадей

сечений. Этот показатель каждого элемента леса приводился в соответствие с его коэффициентом в формуле состава и умножался на относительную полноту насаждения. По полученному таким образом значению суммы площадей сечения элемента леса ($\sum G_i$) определялось количество деревьев на 1 га в соответствующем выделе:

$$N_i = \frac{\sum G_i}{g_m}, \quad (7)$$

где N_i – количество деревьев i -го элемента леса, шт./га; $\sum G_i$ – сумма площадей поперечных сечений элемента леса, $m^2/га$; g_m – площадь поперечного сечения среднего дерева, m^2 .

На заключительном этапе по каждому лесотаксационному выделу суммированием количества деревьев всех элементов леса определялось их общее количество ($N = \sum N_i$). Затем по формуле (5) вычислялась средняя площадь питания деревьев.

Определенные по вышеизложенной методике средняя высота древостоя в 100-летнем возрасте и средняя площадь питания деревьев по каждому выделу заносились в электронную базу лесоустроительных данных в качестве дополнительных показателей.

Фитомасса стволов, крон и хвои определялась только для древостоеев сосны по лесотаксационным выделам городских лесов. В расчет включались все выделы, в насаждениях которых имелся сосновый древостой с любым участием в составе (от 1 единицы до 10). Общее количество таких выделов составило 9245 шт. Все расчетные работы проводились в пакете МО Excel.

Результаты исследования. Насаждения городских лесов, находящихся в различном подчинении, несмотря на близкие таксационные показатели (табл. 1), отличаются по степени техногенных нагрузок, экологической и рекреационной роли [Метелев, 2020]. Поэтому оценка запасов фитомассы и углерода в сосновых древостоях проводилась отдельно с учетом подчиненности лесов.

Для древостоя сосны каждого лесотаксационного выдела по значениям его соответствующих средних таксационных показателей на основе уравнений (1)-(4) вычислялись запасы следующих фракций надземной фитомассы в абсолютно сухом состоянии: стволов в коре, древесины стволов, крон в целом и хвои. Полученные результаты свидетельствуют, что в городских лесах муниципального подчинения общая надземная фитомасса древостоеев сосны в абсолютно сухом состоянии колеблется от 45,9 (в 30-летних насаж-

дениях четвертого класса бонитета) до 268,6 т/га (в 100-летних насаждениях первого класса бонитета). Этот показатель в лесах федерального подчинения варьирует от 35,7 (в 30-летних насаждениях пятого класса бонитета) до 277,9 т/га (в 95-летних насаждениях Ia класса бонитета), а в лесах областного подчинения – от 87,3 (в 30-летних насаждениях четвертого класса бонитета) до 310,9 т/га (в 125-летних насаждениях первого класса бонитета). Амплитуда колебания фитомассы объясняется варьированием условий местопроизрастания, возраста и густоты древостоев. В зависимости от этих факторов наблюдается закономерное изменение как абсолютных значений надземной фитомассы, а, следовательно, и их структурных частей, так и соотношений последних между собой.

В среднем фитомасса соснового древостоя на 1 га городских лесов муниципального подчинения оказалась равной 114,7 т/га, областного – 117,2 т/га, федерального – 123,4 т/га (табл. 2). Эти различия обусловлены особенностями таксационной структуры древостоев городских лесов разного подчинения.

Таблица 2

Запасы надземной фитомассы сосновых древостоев на 1 га по фракциям

Aboveground phytomass stocks of pine stands by fractions per unit area

Подчиненность лесов	Запасы надземной фитомассы на 1 га по фракциям, т/га						
	Всего	ствол			крона		
		итого	древесина	кора	итого	хвоя	ветви
муниципальная	114,7 ±2,12	93,5 ±2,01	87,3 ±1,87	6,2 ±0,19	21,2 ±0,23	4,3 ±0,02	16,9 ±0,21
областная	117,2± 0,89	96,1 ±0,85	89,8 ±0,72	6,3 ±0,30	21,1 ±0,09	4,3 ±0,01	16,8 ±0,09
федеральная	123,4 ±0,68	101,2 ±0,64	94,3 ±0,60	6,9 ±0,04	22,2 ±0,07	4,6 ±0,01	17,6 ±0,07

Суммированием полученных по выделам данных определены запасы фракций фитомассы на исследуемых территориях (табл. 3). Представленные в табл. 3 материалы свидетельствуют, что общий запас надземной фитомассы древостоев сосны в абсолютно сухом состоянии на исследуемой территории составляет 4426,1 тыс. т. В общей надземной фитомассе доля стволов (82%) значительно превышает долю крон (18%).

Принимая во внимание средний возраст и производительность исследуемых сосняков, можно констатировать, что такое соотношение вполне соответствует имеющимся в специальной литературе данным [Нагимов, 2000]. Удельный вес коры в фитомассе стволов (6,6–6,8%) и хвои в фитомассе крон (20,3–20,6%) в исследуемых сосняках также близок к литературным данным. Это свидетельствует о корректности примененных в работе методических решений и полученных результатов.

Насаждения городских лесов различного подчинения (городского, областного и федерального) близки по структуре надземной фитомассы сосновых древостоев. Данное обстоятельство вполне объяснимо. В наших предыдущих работах было показано, что различия между насаждениями городских лесов разного подчинения по таксационным показателям, являющимся определяющими факторами в моделях фитомассы, не столь значительны [Шевелина и др., 2015; Шевелина и др., 2016].

Таблица 3

Запасы надземной фитомассы сосновых древостоев по фракциям

Aboveground phytomass stocks of pine stands by fractions

Подчиненность лесов	Запасы надземной фитомассы по фракциям (в числителе – тыс.т., в знаменателе – %)						
	общая	ствол			крона		
		итого	древесина	кора	итого	хвоя	ветви
муниципальная	217,0 100,0	176,8 81,5	165,1 93,4	11,7 6,6	40,2 18,5	8,2 20,4	32,0 79,6
областная	1190,9 100,0	976,1 82,0	911,9 93,4	64,2 6,6	214,8 18,0	43,7 20,3	171,1 79,7
федеральная	3018,2 100,0	2475,8 82,0	2306,7 93,2	169,1 6,8	542,4 18,0	111,7 20,6	430,7 79,4
Итого	4426,1 100,0	3628,7 82,0	3383,7 93,2	245,0 6,8	797,4 18,0	163,6 20,5	633,8 79,5

В настоящее время при определении запасов углерода используются коэффициенты, показывающие его содержание в тех или иных фракциях фитомассы в абсолютно сухом состоянии. В нашей работе использовались коэффициенты, предложенные К.С. Бобковой и В.В. Тужилкиной [Bobkova, Tuzhilkina, 2001]: для древесины стволов – 47,89, коры стволов – 48,57, хвои – 46,27 и ветвей – 47,18%.

Результаты соответствующих расчетов показали, что в границах муниципального образования «город Екатеринбург» в надземной фитомассе древостоев сосны содержится 2114,2 тыс. т углерода (табл. 4). Основные запасы углерода сосредоточены в стволах деревьев (1739,5 тыс. т или 82,3% от общего количества). В среднем на 1 га исследуемых насаждений запас углерода в надземной фитомассе соснового элемента леса составляет 57,9 т/га. Минимальное значение этого показателя (54,8 т/га) характерно для городских лесов областного подчинения, а максимальное (58,9 т/га) – городских лесов федерального подчинения.

Таблица 4

Запасы депонированного углерода во фракциях надземной фитомассы сосновых древостоев

Deposited carbon stocks in fractions of aboveground phytomass of pine stands

Подчиненность лесов	Запасы депонированного углерода во фракциях фитомассы, тыс.т						
	итого	ствол	в т.ч.		крона	в т.ч.	
			древесина	кора		хвоя	ветви
муниципальная	103,7	84,8	79,1	5,7	18,9	3,8	15,1
областная (лесопарки)	568,8	467,9	436,7	31,2	100,9	20,2	80,7
федеральная	1441,7	1186,8	1104,7	82,1	254,9	51,7	203,2
Итого	2114,2	1739,5	1620,5	119,0	374,7	75,7	299,0

Данные исследования необходимо рассматривать как первый этап работ по оценке общих запасов углерода и его динамики в исследуемых экосистемах. Дополнение полученных нами материалов соответствующими данными по другим древесным породам и годичной продукции позволит оценить действительный бюджет углерода в защитном лесном поясе г. Екатеринбурга.

Заключение. Полученные результаты исследований свидетельствуют о возможности корректной оценки фитомассы лесов и запаса углерода в них на основе многофакторных моделей фракций фитомассы древостоев и скорректированных повыделочных баз лесоустроительных данных. Корректировка баз заключается в расширении их показателями, являющимися определяющими факторами в моделях, но отсутствующими в таксационной характеристику выделов.

Полученные впервые для городских лесов муниципального образования «город Екатеринбург» сведения о запасах надземной фитомассы сосновых древостоев являются отправным моментом для оценки экологического потенциала зеленого пояса города и бюджета углерода в нем. Предложенная и использованная нами методика по оценке запасов фракций надземной фитомассы древостоев может быть успешно применена в отношении других пород, произрастающих на исследуемой территории.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Алексеев В.А., Бердси Р.А.* Углерод в экосистемах лесов и болот России. Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачева РАН, 1994. 224 с.
- Вараксин Г.С., Поляков В.И., Люминарская М.А.* Биологическая продуктивность сосны обыкновенной в Средней Сибири // Лесоведение. 2008. № 3. С. 14–19.
- Верхунов П.М., Попова А.В., Черных В.Л., Мамаев И.В.* Лесотаксационный справочник для лесов Урала. М.: ЦБНТИ лесхоз, 1991. Ч. I. 239 с.
- Метелев Д.В.* Структура и динамика городских лесов муниципального образования «город Екатеринбург» и совершенствование организации и ведения хозяйства в них: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Екатеринбург: УГЛТУ, 2020. 20 с.
- Нагимов З.Я.* Закономерности роста и формирования надземной фитомассы сосновых древостоев: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Екатеринбург: УГЛТУ, 2000. 40 с.
- Нагимов З.Я., Шевелина И.В., Сальникова И.С., Метелев Д.В.* Разработка нормативов по оценке объемов порубочных остатков, оставляемых в процессе самовольных рубок // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2019. Вып. 226. С. 33–46. DOI: 10.21266/2079-4304.2019.226.33-46
- Трофимова И.Л.* Надземная фитомасса и ее годичная продукция в спелых сосновых насаждениях Среднего Урала: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Екатеринбург: УГЛТУ, 2015. 24 с.
- Трофимова И.Л., Кощеева У.П., Нагимов З.Я.* Надземная фитомасса сосновых насаждений в различных типах леса в условиях Среднего Урала // Аграрный вестник Урала. 2012. Вып. 8 (100). С. 55–58.
- Усольцев В.А.* Депонирование углерода лесами Уральского региона России (по состоянию Государственного учета лесного фонда на 2007 год). Екатеринбург: УГЛТУ, 2018. 265 с.
- Усольцев В.А., Нагимов З.Я., Деменев В.В., Шарафутдинов Р.Р.* Распределение массы ветвей по их толщинам в сосновках Среднего Урала // ИВУЗ. Лесной журнал. 1991. № 1. С. 7–12.

Усольцев В.А., Нагимов З.Я., Деменев В.В., Мельникова И.В. Методы и таблицы оценки надземной фитомассы деревьев // Леса Урала и хозяйство в них. 1993. Вып. 16. С. 90–110.

Усольцев В.А., Мельникова И.В., Тепикин С.В., Нагимов З.Я. Ход роста надземной фитомассы сосняков и ельников Среднего Урала // Леса Урала и хозяйство в них. 1994. Вып. 17. С. 155–169.

Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Сухих В.И. Влияние возрастного критерия лесных насаждений на точность региональных оценок запасов и депонирования углерода в фитомассе лесов // Экология. 1999. № 4. С. 243–250.

Шевелина И.В., Нагимов З.Я., Метелев Д.В. Характеристика лесного фонда зеленой зоны в пределах муниципального образования «г. Екатеринбург» // Современные проблемы науки и образования. 2015. №1-1. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=18547> (дата обращения: 29.10.2024).

Шевелина И.В., Метелев Д.В., Нагимов З.Я. Динамика лесоводственно-таксационных показателей насаждений лесопарков города Екатеринбурга // Успехи современного естествознания. 2016. № 6. С. 125–131.

Щепащенко Д.Г. Биологическая продуктивность и бюджет углерода лиственничных лесов Северо-Востока России: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М.: МГУЛ, 2005. 47 с.

Bobkova K.S., Tuzhilkina V.V. Carbon concentrations and caloric value of organic matter in Northern forest ecosystems // Russian journal of Ecology. 2001. Vol. 32, no. 1. P. 63–65. DOI:10.1023/A:1009582318434

Kurbanov E.A., Post W.M. Changes in area and carbon in forests of the Middle Zavolgie: a regional case study of Russian forests // Climatic Change. 2002. Vol. 55, no. 1-2. P. 157–171. DOI: 10.1023/A:1020275713889

Lebedev A., Kuzmichev V. Changes of tree stem biomass in European for-ests since 1950 // Journal of Forest Science. 2022. Vol. 68, iss. 3. P. 107–155. DOI:10.17221/135/2021-JFS.

Shvidenko A.Z., Schepashchenko D.G., Vaganov E.A., Nilsson S. Net primary production of forest ecosystems of Russia: a new estimate // Doklady Earth Sciences. 2008. Vol. 421, no. 2. P. 1009–1012. DOI: 10.1134/S1028334X08060330

Zamolodchikov D.G., Korovin G.N., Utkin A.I., Chestnykh O.V. Dynamics of carbon pools and fluxes in Russia's forest lands // Russian Journal of Ecology. 2005. Vol. 36, no. 5. P. 291–301. DOI: 10.1007/s11184-005-0076-0

References

Alekseev V.A., Berdsi R.A. Carbon in ecosystems of forests and swamps of Russia. Krasnoyarsk: V.N. Sukachev Forest Institute of the Russian Academy of Sciences, 1994. 224 p. (In Russ.)

Bobkova K.S., Tuzhilkina V.V. Carbon concentration and caloric content of organic matter in northern forest ecosystems. Russian journal of Ecology, 2001, vol. 32, no. 1, pp. 63–65. DOI:10.1023/A:1009582318434

Kurbanov E.A., Post V.M. Changes in area and carbon in the forests of the Middle Volga region: a regional case study of Russian forests. *Climate change*, 2002, vol. 55, no. 1-2, pp. 157–171. DOI:10.1023/A:1020275713889

Lebedev A., Kuzmichev V. Changes of tree stem biomass in European forests since 1950. *Journal of Forest Science*, 2022, vol. 68, iss. 3, pp. 107–155. DOI: 10.17221/135/2021-JFS

Metelev D.V. Struktura i dinamika gorodskih lesov municipal'nogo obrazovaniya «gorod Ekaterinburg» i sovershenstvovanie organizatsii i vedeniya hozyajstva v nih: author's abstract. Dis. ... Candidate of Agricultural Sciences. Yekaterinburg: USFEU, 2020. 20 p. (In Russ.)

Nagimov Z.Ya. Zakonomernosti rosta i formirovaniya nadzemnoj fitomassy sosnovykh drevostoev: author's abstract. Dis. ... Doctor of Agricultural Sciences. Yekaterinburg: USFEU, 2000. 40 p. (In Russ.)

Nagimov Z.Ya., Shevelina I.V., Salnikova I.S., Metelev D.V. Development of standards of assessment of volume of logging residues produced in the process of illegal logging. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2019, iss. 226, pp. 33–46. DOI: 10.21266/2079-4304.2019.226.33-46 (In Russ.)

Shchepashchenko D. G. Biologicheskaya produktivnost' i byudzhet ugleroda listvenichnyh lesov Severo-Vostoka Rossii: author's abstract. Dis. ... Doctor of Biological Sciences. Moscow: MSUF, 2005. 47 p. (In Russ.)

Shevelina I.V., Metelev D.V., Nagimov Z.Ya. Dynamics of silvicultural and taxation parameters of the stands in woodland parks in the city of Yekaterinburg. *Uspekhi sovremennoego estestvoznaniya*, 2016, no. 6, pp. 125–131. (In Russ.)

Shevelina I.V., Nagimov Z.I., Metelev D.V. Characteristic of the forest fund of the urban forest zone of municipal unit «city of Yekaterinburg». *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2015, no. 1-1. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=18547> (accessed October 29, 2024). (In Russ.)

Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G., Vaganov E.A., Nilsson S. Clean primary production of Russian forest ecosystems: new assessment. *Earth Sciences reports*, 2008, vol. 421, no. 2, pp. 1009–1012. DOI: 10.1134/S1028334X08060330

Trofimova I.L. Nadzemnaya fitomassa i ee godichnaya produkciya v spelyh sosnykah Srednego Urala: author's abstract. Dis. ... Candidate of Agricultural Sciences. Yekaterinburg: USFEU, 2015. 24 p. (In Russ.)

Trofimova I.L., Koscheeva U.P., Nagimov Z.Ya. Aboveground phytomass of pine plantations in various types of forest in the conditions of the Middle Urals. *Agrarian Bulletin of the Urals*, 2012, iss. 8 (100), pp. 55–58. (In Russ.)

Usoltsev V.A., Melnikova I.V., Tepikin S.V., Nagimov Z.Ya. The course of growth of aboveground phytomass of pine forests and spruce forests of the Middle Urals. *Lesa Urala i hozyajstvo v nih*, 1994, iss. 17, pp. 155–169. (In Russ.)

Usoltsev V.A., Nagimov Z.Ya., Dementyev V.V., Melnikova I.V. Methods and tables for estimating the aboveground phytomass of trees. *Lesa Urala i hozyajstvo v nih*, 1993, vol. 16, pp. 90–110. (In Russ.)

Usoltsev V.A. Carbon sequestration by forests of the Ural region of Russia (on the base of Forest State Inventory data 2007). Yekaterinburg: Ural State Forestry Engineering University, 2018. 265 p. (In Russ.)

Usoltsev V.A., Nagimov Z.Ya., Dementiev V.V., Sharafutdinov R.R. Distribution of the mass of branches by their thicknesses in the pine forests of the Middle Urals. IVUZ. Lesnoy zhurnal, 1991, no. 1, pp. 7–12. (In Russ.)

Utkin A.I., Zamolodchikov D.G., Sukhoi V.I. Influence of the age criterion of forest plantations on the accuracy of regional assessments of carbon stocks and deposition in forest phytomass. Russian journal of Ecology, 1999, no. 4, pp. 243–250. (In Russ.)

Varaksin G.S., Polyakov V.I., Luminarskaya M.A. Biologicheskaya produktivnost' sosny obyknovennoj v Srednej Sibiri. Lesovedenie, 2008, no. 3, pp. 14–19. (In Russ.)

Verkhunov P.M., Popova A.V., Chernykh V.L., Mamaev I.V. Lesotaksaci-onnyj spravochnik dlya lesov Urala. M.: CBNTI leskhoz, 1991, Ch. I. 239 p. (In Russ.)

Zamolodchikov D.G., Korovin G.N., Utkin A.I., Chestnykh O.V. Dynamics of carbon reserves and fluxes on Russian forest lands. Russian Journal of Ecology, 2005, vol. 36, no. 5, pp. 291–301. DOI:10.1007/s11184- 005-0076-0

Материал поступил в редакцию 20.12.2023

Шевелина И.В., Нагимов З.Я., Сальникова И.С., Нагимов В.З. Оценка запасов надземной фитомассы и углерод депонирующей способности сосновых древостоев в городских лесах г. Екатеринбурга // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 252. С. 229–243. DOI:10.21266/2079-4304.2025.252.229-243

В ходе проведенных исследований модернизированы повидельные лесотаксационные базы данных всех категорий лесных насаждений муниципального образования «город Екатеринбург» – городских лесов федерального, областного (лесопарков) и городского подчинения. База включает в общей сложности 22098 выделов, в том числе 9245 выделов, в составе насаждений которых в том или ином объеме присутствует сосна. Для всех этих выделов на основе многофакторных математических моделей рассчитаны запасы надземной фитомассы сосновых древостоев по фракциям «ствол», «крона» и «хвоя». В качестве независимых переменных в моделях фитомассы стволов использованы показатель качества условий произрастания (средняя высота в 100-летнем возрасте), возраст и запас древостоев, а в моделях фитомассы крон – первые два фактора и средняя площадь питания деревьев (густота древостоев). Установлено, что общий запас надземной фитомассы сосновых древостоев на территории муниципального образования «город Екатеринбург» в абсолютно сухом состоянии составляет 4426,1 тыс. т. В среднем фитомасса соснового древостоя на 1 га городских лесов муниципального подчинения оказалась

равной 114,7 т/га, областного – 117,2 т/га, федерального – 123,4 т/га. Эти незначительные различия обусловлены особенностями таксационной структуры древостоев городских лесов разного подчинения. Выявлено, что общий объем депонированного углерода в надземной фитомассе сосновых древостоев муниципального образования составляет 2114,2 тыс. т. В этом объеме 1739,5 тыс. т (82,3%) углерода аккумулировано в стволовой части древостоев, 374,7 тыс. т (17,7%) – в кроновой. В среднем на 1 га исследуемых насаждений запас углерода в надземной фитомассе соснового элемента леса составляет 57,9 т/га. Минимальное значение этого показателя (54,8 т/га) характерно для городских лесов областного подчинения, а максимальное (58,9 т/га) – городских лесов федерального подчинения.

Ключевые слова: городские леса, сосновые древостои, надземная фитомасса, депонирование углерода, многофакторные уравнения.

Shevelina I.V., Nagimov Z.Ya., Salnikova I.S., Nagimov V.Z. Assessment of reserves of aboveground phytomass and carbon depositing capacity of pine stands in urban forests of Yekaterinburg. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 252, pp. 229–243 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.229-243

In the course of the conducted studies, the forest databases at stand level for all categories of forest stands of the city of Yekaterinburg, namely, the federal, regional and municipal subdivision were modernized. The database includes a total of 22,098 forest units, including 9,245 forest units with some proportion of pine in their stands. The aboveground phytomass stocks of pine stands by the following fractions: tree stems, crowns and needles were calculated for all these forest stands on the basis of multifactor mathematical models. The tree stem models used the quality of growing conditions (mean height at 100 years), age and stock of tree stands as independent variables; and the crown tree models use the first two factors and mean area of tree feeding (density of tree). It was established that the total stock of aboveground phytomass of pine stands in absolutely dry condition on the territory of the municipal formation ‘Yekaterinburg city’ is 4,426.1 thousand tons. The pine stand phytomass per hectare in municipal urban forests averaged 114.7 t/ha, compared to 117.2 t/ha in regional subordinated forests and 123.4 t/ha in federal subordinated forests. These insignificant differences are explained by the peculiarities of the taxation structure of stands in urban forests under different subordinations. It is revealed that the total amount of carbon deposited in the aboveground phytomass of pine stands in the municipality is 2,114.2 thousand tons. 1,739.5 thousand tons of carbon (82.3% of the total) were accumulated in tree stems and 374.7 thousand tones (17.7%) in crowns. The mean carbon stock in aboveground phytomass of pine elements of stands per hectare is 57.9 t/ha. The minimum value of this indicator (54.8 t/ha) is typical for urban forests of regional subordination, and the maximum (58.9 t/ha) is for urban forests of federal subordination.

Keywords: urban forests, pine stands, aboveground phytomass, carbon deposition, multifactorial equations.

ШЕВЕЛИНА Ирина Владимировна – заведующий кафедрой лесной таксации и лесоустройства Уральского государственного лесотехнического университета, доцент, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 4131-5616. ORCID: 0000-0001-8352-558X.

620100, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: shevelinaiv@m.usfeu.ru.

SHEVELINA Irina V. – PhD (Agriculture), Head of the Department of Forest Taxation and Forest Management, Ural State Forestry Engineering University, Associate Professor. SPIN-code: 4131-5616. ORCID: 0000-0001-8352-558X.

620100. Sibirskiy trakt str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: shevelinaiv@m.usfeu.ru.

НАГИМОВ Зуфар Ягфарович – директор Института леса и природопользования, профессор кафедры лесной таксации и лесоустройства Уральского государственного лесотехнического университета, доктор сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 6427-3102. ORCID: 000-0002-6853-2375.

620100, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: nagimovzy@m.usfeu.ru.

NAGIMOV Zufar Ya. – DSc (Agriculture), Director of the Institute of Forest and Nature Management, Professor of the Department of Forest Taxation and Forest Management, Ural State Forestry Engineering University. SPIN-code: 6427-3102. ORCID: 000-0002-6853-2375.

620100. Sibirskiy trakt str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: nagimovzy@m.usfeu.ru.

САЛЬНИКОВА Ирина Сергеевна – доцент кафедры лесной таксации и лесоустройства Уральского государственного лесотехнического университета, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 7287-4298. ORCID: 0000-0002-6236-1536.

620100, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: salnikovais@m.usfeu.ru.

SALNIKOVA Irina S. – PhD (Agriculture), Associate Professor of the Department of Forest Taxation and Forest Management, Ural State Forestry Engineering University. SPIN-code: 7287-4298. ORCID: 0000-0002-6236-1536.

620100. Sibirskiy trakt str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: salnikovais@m.usfeu.ru.

НАГИМОВ Валерий Зуфарович – доцент кафедры лесной таксации и лесоустройства Уральского государственного лесотехнического университета, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 6667-6570. ORCID: 0000-0002-0586-3919.

620100, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: nagimov-v@mail.ru.

NAGIMOV Valeriy Z. – PhD (Agriculture), Associate Professor of the Department of Forest Taxation and Forest Management, Ural State Forestry Engineering University. SPIN-code: 6667-6570. ORCID: 0000-0002-0586-3919.

620100. Sibirskiy trakt str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: nagimov-v@mail.ru.

В.Т. Ярмишко, О.В. Игнатьева

**РЕАКЦИИ СТАРОВОЗРАСТНЫХ СОСЕН (*PINUS SYLVESTRIS L.*)
НА ИЗМЕНЕНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
НА КОЛЬСКОМ СЕВЕРЕ**

Введение. Угрозы, создаваемые интенсивной хозяйственной деятельностью человека и глобальным изменением климата, привели к горячим дискуссиям о состоянии и росте лесов на Кольском Севере в течение последних трех десятилетий. Несмотря на огромный вклад исследовательских ресурсов, на эти глобальные вопросы не было найдено четких ответов, хотя наши знания о воздействии природных и антропогенных факторов существенно возросли. Тем не менее, многие вопросы, связанные с современным состоянием лесов, их устойчивостью все еще остаются открытыми.

Всестороннее изучение особенностей роста и развития основных лесообразующих пород является актуальным в настоящее время не только с точки зрения оценки биологической продуктивности лесных экосистем, но и как фактической основы для оценки эффектов популяционных взаимоотношений, в частности, выяснения причин индивидуальной изменчивости и устойчивости древесных видов под влиянием природных и антропогенных факторов [Шиятов, 1986; Ярмишко, Игнатьева, 2021; Евдокимов, Ярмишко, 2023; Fritts, 1966; Hustich, 1978; Forest condition..., 2000]. Одной из важных современных проблем является анализ динамических процессов, наблюдающихся в лесных сообществах в условиях изменяющейся окружающей среды на Кольском Севере.

Современный лесной покров во многих районах Кольского Севера представляет собой огромную сукцессионную систему, подавляющее большинство процессов в которой инициировано хозяйственной деятельностью человека. Начавшееся еще в довоенное время прошлого века интенсивное строительство жилых и промышленных объектов потребовало огромного количества древесных ресурсов. Объем их определялся исключительно потребностью хозяйств в лесоматериалах и техническими возможностями лесозаготовительных предприятий. Площадь лесов, нарушенных рубками, в частности, наиболее разрушительными сплошными

рубками, во много раз превышала площадь лесов, пострадавших от воздействия другого мощного антропогенного фактора на Кольском полуострове – промышленного атмосферного загрязнения [Цветков, 2002; Ярмишко и др., 2009].

Характерной особенностью атмосферного загрязнения является быстрое распространение его на большие расстояния с образованием обширных полей загрязнения воздушной, водной и почвенной среды. К воздействию этого фактора растения эволюционно не приспособлены. Токсические вещества, нарушая физиологические процессы, оказывают на растения не только прямое отрицательное воздействие, но и сужают пределы толерантности к естественным факторам среды [Ярмишко и др., 2009; Лянгузова, 2010; Ярмишко, Игнатьева, 2021].

Цель настоящих исследований состояла в оценке реакций старовозрастных деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на изменение характеристик физической и ценотической среды на вырубках. Они были оставлены на вырубках во время лесозаготовок для обсеменения нарушенных территорий. Вековые сосны использовались в качестве модельных деревьев среди сохранившихся перестойных древостоев. Важной также была оценка реакций вековых сосен на хроническое загрязнение SO_2 и соединениями тяжелых металлов (Cu, Ni, Co). Основным интегральным количественным показателем состояния сосны обыкновенной в рассматриваемых условиях Кольского Севера был выбран радиальный прирост (РП) древесины.

Материалы и методика исследования. Исследования на Кольском Севере проводятся нами с 1981 г. преимущественно во вторичных лишайниковых и зеленомошно-лишайниковых сосновых лесах. Принадлежность сообществ к одному типу устанавливалась по расположению их в ландшафте, характеру почвообразующих пород и типу почв.

Сосновые леса распространены в районах исследований в средних частях северных и восточных склонов холмов, реже на относительно ровных участках моренных равнин, сложенных песчаными ледниково-водно-ледниковыми отложениями. Для сообществ этой группы характерны Al-Fe-гумусовые подзолистые почвы с толщиной подстилки до 5 см и содержанием гумуса в иллювиальном горизонте до 3%.

В центральной части Кольского полуострова древесный ярус сосновых лесов достаточно сильно разрушен рубками и пожарами, давность которых оценивается в 70–90 лет. На нарушенных территориях в настоящее время наблюдается интенсивное формирование молодых древостоев, среди кото-

рых сохраняются вековые (VII–XVII классов возраста) сосны (*Pinus sylvestris*), оставленные в качестве деревьев-семенников (25–30 шт./га) или недорубов. Предполагалось, что по оценке жизненного состояния надземных органов и РП древесины вековых сосен можно судить об их реакциях на изменение окружающей среды под воздействием природных и антропогенных факторов на протяжении не одной сотни лет.

Древесный ярус сосновых лесов (III–IV классов возраста), где оставлены семенные деревья лучшего качества и встречаются недорубы, образован сосновой обыкновенной (*Pinus sylvestris*) с небольшим участием (до 10%) березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.), иногда с единичной примесью ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.). Древостои изученных северо-таежных сосняков отличаются разреженностью, низкой сомкнутостью крон, низкими таксационными характеристиками.

В формирующихся на вырубках вторичных сосновых лесах основу травяно-кустарничкового яруса формируют *Vaccinium myrtillus* L., *V. vitis-idaea* L., *Empetrum hermafroditum* Hagerup; общее покрытие яруса составляет в среднем около 30%. В напочвенном покрове лишайниковых и зеленомошно-лишайниковых сосняков в разных соотношениях представлены виды родов *Cladonia* и *Cladina*, *Pleurozium schreberi* (Willd. ex Brid.) Mitt.

Основным источником промышленного загрязнения в районе исследований является комбинат «Северонikel» (г. Мончегорск, 67°55' с. ш. 32°48' в. д.), который начал свою деятельность в 1939 г. [Позняков, 1999]. Максимальные выбросы, составляющие в среднем 230 тыс. т SO₂ и 15 тыс. т в год мелкодисперсной полиметаллической пыли, содержащей смесь сульфидов и оксидов тяжелых металлов (Ni, Cu и Co), наблюдались в период с 1973 по 1992 гг. [Кольская..., 2024].

Методика подбора, закладки ППП и детального анализа древесной растительности описана нами в более ранних работах [Ярмишко, 1997; Методы..., 2002]. В каждом районе исследований подбирались по 10–12 модельных деревьев сосны обыкновенной в возрасте 140–350 лет (высотой от 14 до 18 м и диаметром от 16 до 80 и более см).

Для определения интенсивности прироста древесины сосны обыкновенной у моделей отбирались керны буравом Прессслера на высоте 1,3 м от корневой шейки. Измерение ширины годичных колец древесины выполнялось на дендрометре [Ярмишко, 1983].

Оценку жизненного состояния исследуемых деревьев проводили по методике, подробно изложенной в ряде работ [Методы..., 2002; Ярмишко, Игнатьева, 2021; Евдокимов, Ярмишко, 2023].

Результаты исследования. Сосновые леса на Кольском Севере достаточно активно осваиваются человеком с давних пор. Особенно интенсивные лесозаготовки были развернуты в середине прошлого столетия. Многолетние наблюдения за ходом естественного возобновления и формирования древостоев в тех лишайниковых и зеленомошно-лишайниковых сосняках, где антропогенное воздействие на лесные фитоценозы оставалось сравнительно небольшим или вовсе отсутствовало, позволили нам составить обобщенную картину восстановления нарушенных сосновых лесов [Ярмишко, 1997; Ярмишко и др., 2009; Ярмишко, Игнатьева, 2021].

Важнейшими в настоящей работе являются данные о радиальном росте одиночных вековых сосен (XV–XVII классов возраста), оставленных в свое время на вырубках для обсеменения нарушенных территорий (рис. 1).



Рис. 1. Сосна обыкновенная в возрасте 340 лет, оставленная на зеленомошно-лишайниковой вырубке в качестве семенника для обеспечения последующего возобновления (Ковдорский район, Мурманская обл.)

Fig. 1. Scots pine at the age of 340 years, left on a mossy lichen felling as a seed source to ensure subsequent renewal (Kovdorsky district, Murmansk region)

Эти старовозрастные сосны (до 25 шт./га) не имели механических повреждений во время рубок, а также пожарных шрамов на стволах. Их кроны высоко подняты и хорошо развиты, имеют здоровый внешний вид, продолжительность жизни хвои на деревьях достигает 5,5–6 лет без при-

знаков повреждений насекомыми-вредителями и токсическими веществами (хлорозы или некрозы). Керны древесины, взятые с целью определения возраста деревьев и погодичного РП древесины, свидетельствовали об отсутствии гнили внутри стволов.

Отобранные и обработанные керны старовозрастных деревьев мы размечали по годичным кольцам на четыре возрастных периода, соответствующих разной интенсивности РП. Первый, так называемый период формирования молодых древостоев сосны обыкновенной, после, очевидно, тотальных пожаров (в то время сплошные рубки в рассматриваемых районах не применялись), продолжался около 60 лет (с 1703 по 1764 гг.). Из рис. 2 видно, что в молодом возрасте интенсивность ежегодного РП достигала 3–3,5 мм/год и имела тенденцию к существенному снижению (до 1–0,5 мм/год). Снижение интенсивности РП древесины мы связываем с усилением конкурентных взаимоотношений в формирующемся сообществе на вырубке. Схожие реакции РП сосны обыкновенной можно наблюдать в настоящее время в формирующихся средневозрастных молодняках сосны обыкновенной [Ярмишко, Игнатьева, 2021].

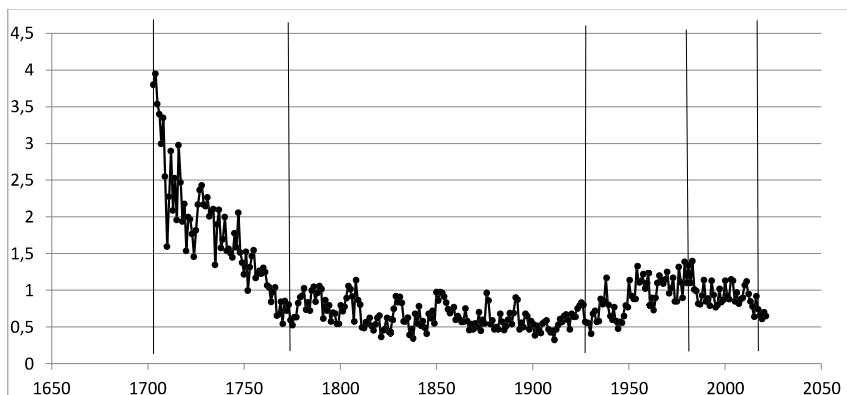


Рис. 2. Динамика радиального прироста сосны обыкновенной XVII класса возраста, произрастающей среди формирующегося вторичного 70-летнего сосновника зеленомошно-лишайникового в Ковдорском р-не (Мурманская обл.).

Условные обозначения: по оси ординат – прирост древесины в мм; по оси абсцисс – годы

Fig. 2. Dynamics of radial growth of scots pine of the XVII age class, growing among the emerging secondary 70-year-old green moss-lichen pine forest in Kovdorsky district (Murmansk region). Symbols: on the ordinate axis – wood growth in mm; on the abscissa axis – years

Второй период, длившийся около 170 лет, характеризовался относительно стабильным РП, составляющим в среднем 0,6–0,7 мм/год. В рассматриваемый период роста и развития сосны установилась, на наш взгляд, стабильная фитоценотическая среда без реальных внешних нарушений (пожаров, рубок, природных погодных катализмов и т. п.). Просматривающиеся флуктуации РП сосны происходили, по нашему мнению, на фоне изменяющейся окружающей среды под влиянием природных погодных условий в регионе (рис. 2). При этом выявлена определенная цикличность интенсивных (выше средних на 50%) и низкой интенсивности (менее 45–50% от среднего значения) РП. Чередование РП высокой и низкой интенсивности в целом можно подвести к соответствуанию 11-летним солнечным циклам Швабе-Вольфа [Витинский и др., 1986], что особенно характерно для северных широт [Матвеев, Румянцев, 2013].

Выделенный третий период (рис. 2) обращает на себя внимание интенсификацией РП перестойных сосен в 50-х гг. прошлого века. Он варьировал в это время в пределах от 1 до 1,3 мм/год, что было почти в 2 раза выше, чем в предшествующее длительное и относительно стабильное время роста и развития древостоеv. Архивные документы лесохозяйственных и лесоустроительных предприятий свидетельствовали о том, что в 1940-х гг. в рассматриваемых районах исследований начались массовые заготовки ценнейшей древесины сосны обыкновенной [Цветков, Семенов, 1985]. Естественно, что после сплошной вырубки древостоя и разрушения напочвенного покрова конкуренция среди сохранившихся растений радикально ослабевала. Из рис. 2 видно, что оставшиеся старовозрастные деревья-семенники на вырубках положительно реагировали на это нарушение увеличением ежегодного прироста древесины в 1,3–1,5 раза (до 1–1,1 мм/год). Этот показатель практически не менялся в течение 50 лет (рис. 2). Однако в последнее время РП вековых сосен начал проявлять тенденцию к снижению, что прямо связано, на наш взгляд, с усиливающейся конкуренцией со стороны интенсивно развивающегося молодого сообщества сосны обыкновенной (рис. 2).

Для сравнительного анализа динамики РП более молодых древостоеv сосны обыкновенной (VII–VIII классов возраста) мы подобрали в Ковдорском районе модельные деревья в спелых лишайниковых сосняках с давностью последнего пожара 130 лет (рис. 3). Из рис. 4 видно, что в начале формирования древостоя на нарушенной территории флуктуации РП древесины были достаточно выражены (значения прироста варьировали в пределах от 3,18 до 1 мм/год) и подчинялись в основном изменениям погодных условий в вегетационный период. Нельзя исключать влияние конкурентных взаимоотношений растений в формирующемся молодом сообществе за свет и минеральное питание. Ежегодный РП сосны в рассматриваемый период (более 50 лет) достигал в среднем 1,9 мм и имел выраженную тенденцию к снижению (рис. 4).



Рис. 3. Сосняк зеленомошно-лишайниковый VII класса возраста в Ковдорском районе (Мурманская обл.)

Fig. 3. Green moss-lichen pine forest of the VII age class in Kovdorsky district (Murmansk region)

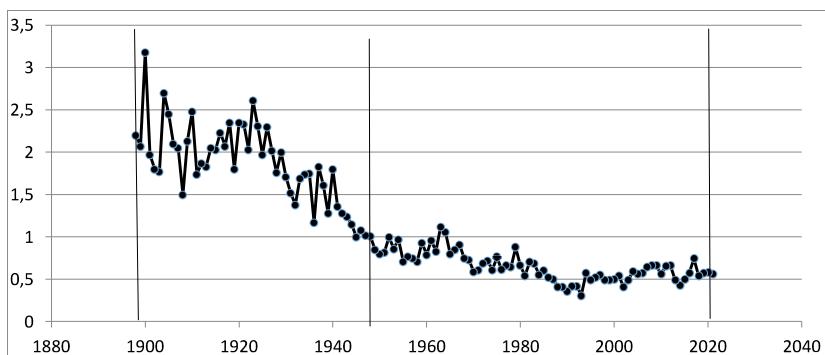


Рис. 4. Динамика радиального прироста сосны обыкновенной в сосняке лишайниковом VII класса возраста в Ковдорском районе (Мурманская обл.). Условные обозначения: по оси ординат – прирост древесины в мм; по оси абсцисс – годы

Fig. 4. Dynamics of radial growth of scots pine in lichen pine forest of the VII age class in Kovdorsky district (Murmansk region).

Symbols: on the ordinate axis – wood growth in mm; on the abscissa axis – years

Следующий период роста и развития сосняка лишайникового, длившийся более 70 лет, характеризовался относительной стабильностью конкурентных взаимоотношений в сообществе, хотя прирост древесины был почти в 3 раза ниже, чем в молодом возрасте (рис. 4). Судя по динамике РП, на рассматрива-

емом участке резких нарушений (пожары, рубки) в состоянии окружающей среды в исследуемый период не было зафиксировано, что отличается от РП вековых сосен-семенников, которые испытывали на себе резкое снижение конкурентных взаимоотношений после вырубки основного древостоя (рис. 2), а также давление со стороны формирующегося молодого вторичного леса.

В программу наших исследований входило всестороннее изучение состояния молодых сосновок зеленомошно-лишайниковых в районе Чунозерской усадьбы Лапландского биосферного заповедника, которые были уже в 1980-х гг. подвержены воздействию промышленных атмосферных выбросов комбината «Североникель». Необходимо отметить, что в это время наблюдений фиксировались максимальные количества выбросов токсических веществ (SO_2 и тяжелых металлов) и этот район относился к зоне среднего аэробиогенного загрязнения [Ярмишко, 1997]. Молодые сообщества сосны обыкновенной (II–III класса возраста) имели весьма угнетенный вид: ежегодный РП составлял в среднем 0,7 мм, хвоя была поражена хлорозами и некрозами, продолжительность ее жизни на деревьях не превышала 4 лет, напочвенный покров был крайне угнетен, эпифитные и напочвенные лишайники были почти полностью уничтожены. Среди формирующихся молодняков сосны обыкновенной на месте сплошной вырубки, судя по обгорелым пням и корневым лапам деревьев, пройденной достаточно сильным низовым пожаром, располагались вековые сосны, оставленные в качестве семенников, часть из которых уже были сухими (рис. 5).

Судя по тому, как на стволах сосен облетела кора, и пожарным шрамам, отмирание их произошло примерно 45–50 лет назад. Другая часть вековых деревьев находилась в очень ослабленном состоянии, с редкой кроной, поврежденной хвоей и с обгорелыми скелетными корнями.

Датировка полученных кернов древесины с уже засохших особей сосны с таковыми, отобранными у сохранившихся еще живых сосен, позволила нам установить время отмирания модельных деревьев на рассматриваемой территории. Анализ кернов древесины сосны обыкновенной показал следующее. В начале формирования молодых сосен на вырубке, где конкурентные взаимоотношения между растениями были существенно снижены, РП варьировал в пределах от 1,7 до 2,1 мм/год (среднее значение 1,9 мм/год) и имел отчетливую тенденцию к снижению (по мере усиления конкуренции со стороны развивающегося молодняка). В дальнейшем с 1836 по 1926 гг. РП относительно стабилизировался, хотя его интенсивность была почти в 2 раза ниже по сравнению с предыдущим периодом (рис. 6). Он также имел выраженную тенденцию к снижению. С 1930 по 1960 гг. наблюдалась (рис. 6) некоторая стабилизация РП, хотя он имел достаточно низкие значения (0,53 мм/год).



Рис. 5. Усохшие под воздействием аэroteхногенного загрязнения вековые сосны среди молодняка IV класса возраста в районе Чунозерской усадьбы Лапландского биосферного заповедника

Fig. 5. Century-old pine trees shrunk under the influence of aerotechnogenic pollution among young animals of the IV age class in the area of the Chunozersk estate of the Lapland Biosphere Reserve

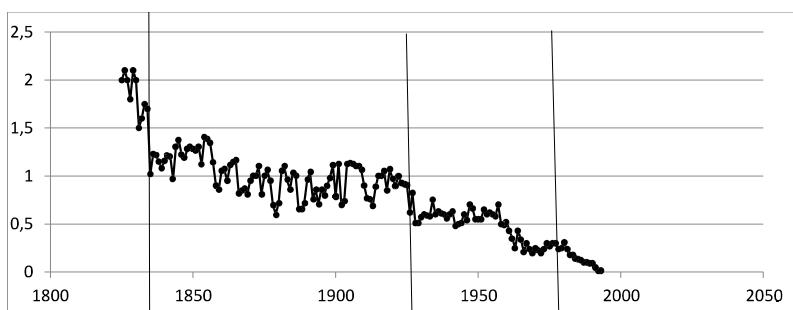


Рис. 6. Динамика радиального прироста древесины сосны обыкновенной X класса возраста, оставленной в свое время для обсеменения нарушенной территории, произраставшей среди формирующегося молодого сосновника в районе среднего уровня аэroteхногенного загрязнения и засохшей в начале 1990-х гг. Условные обозначения: по оси ординат – прирост древесины в мм; по оси абсцисс – годы

Fig. 6. Dynamics of radial growth of ordinary pine wood of the X age class, left at one time for seeding the disturbed territory, growing among the emerging young pine trees in the area of the average level of aerotechnogenic pollution and dried up in the early 1990s. Symbols: on the ordinate axis – wood growth in mm; on the abscissa axis – years

В период с 1960 по 1972 гг. наблюдалось дальнейшее, достаточно резкое снижение интенсивности РП у старовозрастных сосен; он не превышал 0,2–0,3 мм/год. Объяснить это можно синергическим воздействием конкуренции интенсивно развивающегося сообщества сосны, сильной ослабленностью перестойных сосен, естественными возрастными причинами и, возможно, лишь частичным увеличением техногенной нагрузки. Однако в течение непродолжительного времени (с 1973 по 1980 гг.) интенсивность РП увеличилась на 10–12% в сравнении с предыдущим периодом роста (рис. 6). Это связано, на наш взгляд, с накоплением в лесном сообществе диоксидов серы и смеси сульфидов и оксидов тяжелых металлов (Ni, Cu и Co), создающих мелиорирующий эффект на маломощных бедных северо-таежных почвах. С начала 1980-х гг. наблюдалось достаточно интенсивное снижение РП сосны (с 0,18 до 0,02–0,01 мм/год) и его прекращение в 1993 году (рис. 6). Причинами отмирания вековых сосен в рассматриваемом районе можно назвать ослабленность деревьев, естественные возрастные причины и техногенное загрязнение, интенсивность которого достигала в это время максимальных значений.

В непосредственной близости к комбинату «Северонikel» (8–10 км), в импактной зоне, к моменту начала наших исследований живые старовозрастные сосны не встречались.

Заключение. Исследованиями установлено, что вековые сосны-семенники в молодом возрасте достаточно четко реагировали повышенными значениями РП, подобно современным молодым древостоям. Затем наблюдался заметный спад интенсивности РП, что связано, прежде всего, с усилением конкурентных взаимоотношений в формирующемся сообществе, и относительная его стабилизация, начиная с 60–70-летнего возраста.

Следующий период роста сосны обыкновенной, длившийся сотни лет, характеризовался относительно стабильным РП древесины. В это время сформировалась, на наш взгляд, благоприятная фитоценотическая среда в рассматриваемых сообществах без внешних нарушающих факторов.

Анализ кернов древесины показывает, что перестойные сосны в возрасте 250–270 лет достаточно активно реагировали на вырубку основного древостоя повышением интенсивности РП в 1,5–2 раза в сравнении с предыдущим, почти 200-летним периодом роста. Установившийся уровень интенсивности РП существенно не менялся на протяжении почти 50 лет. Однако в последние годы старовозрастные сосны отреагировали на усиление конкуренции интенсивно развивающегося молодого сообщества сосны обыкновенной снижением интенсивности РП.

Подобные результаты реакций РП сосны обыкновенной VII-VIII классов возраста были получены в древостоях, не нарушенных внешним воздействием и имеющих здоровый внешний вид.

В обследованных лесных сообществах, подверженных воздействию промышленного атмосферного загрязнения двуокисью серы в сочетании с тяжелыми металлами (Ni, Cu, Co и др.) большинство вековых сосен в импактной зоне засохли еще в 60–70-х гг. прошлого столетия. В буферной зоне, где фиксировались средние уровни загрязнения, среди молодняков сосны обыкновенной встречаются отдельные вековые сосны в весьма угнетенном состоянии. Многие особи засохли в 90-е годы прошлого столетия, не выдержав столь резко выраженного изменения окружающей среды в результате накопления в сообществе токсикантов.

В заключение можно отметить, что вековые сосны (*Pinus sylvestris*) в условиях Кольского Севера достаточно выраженно реагируют на изменения окружающей среды повышением или снижением интенсивности радиального прироста древесины. Для оценки реакций отдельных старовозрастных деревьев и древостоев сосны обыкновенной на глобальные изменения климата в регионе требуются более длительные комплексные исследования с использованием современного научного оборудования.

Сведения о финансировании исследования. Работа выполнена в рамках государственного задания по плановой теме «История создания, состояние, потенциал развития живых коллекций Ботанического сада Петра Великого БИН РАН». Регистрационный номер – 124020100075-2.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Витинский Ю.И., Копецкий М., Куклин Г.В. Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. М.: Наука, 1986. 295 с.

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

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

Лянгузова И.В. Толерантность компонентов лесных экосистем Севера России к аэробиогенному загрязнению: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. СПб.: Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, 2010. 43 с.

Матвеев С.М., Румянцев Д.Е. Дендрохронология: пособие для студентов ВУЗов. Воронеж: ВГЛТА, 2013. 139 с.

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

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

Цветков В.Ф., Семенов Б.А. Сосняки Крайнего Севера. М.: Агропромиздат, 1985. 116 с.

Цветков В.Ф. Сосняки Кольской лесорастительной области и ведение хозяйства в них. Архангельск: Изд-во Арх. гос. тех. ун-та, 2002. 380 с.

Шиятов С.Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале. М.: Наука, 1986. 136 с.

Ярмишко В.Т. Прибор для измерения годичных колец деревьев // Ботанический журнал. 1983. Т. 68, № 10. С. 1428–1430.

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

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

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

Forest Condition in a Changing Environment. The Finnish Case. Ed. by Eino Mälkönen. Kluwer Acad. Publ., 2000. 380 p.

Fritts H.C. Growth rings of trees: their correlation with climate // Science. 1966. Vol. 154. P. 973–979.

Hustich I. The growth of Scots pine in northern Lapland, 1928–1977 // Ann. Bot. Fenn. 1978. Vol. 15. P. 241–252.

References

Evdokimov A.S., Yarmishko V.T. The structure of the tree layer of forest communities in the central part of the Kola Peninsula, formed with a decrease in aerotechnogenic emissions. *Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Ecology and life safety*, 2023, vol. 31, no. 1, pp. 115–126. DOI: 10.22363/2313-2310-31-1-116-126. (In Russ.)

Forest Condition in a Changing Environment. The Finnish Case. Ed. by Eino Mälkönen. Kluwer Acad. Publ., 2000. 380 p.

Fritts H.C. Growth rings of trees: their correlation with climate. *Science*, 1966, vol. 154, pp. 973–979.

Hustich I. The growth of Scots pine in northern Lapland, 1928–1977. *Ann. Bot. Fenn.*, 1978, vol. 15, pp. 241–252.

Kola MMC: official website. URL: <http://www.kolagmk.ru/> (assessed December 15, 2023). (In Russ.)

Lyanguzova I.V. Tolerance of components of forest ecosystems of the North Russia's attitude to aerotechnogenic pollution: author's abstract. Dis. ... Doctor of Biological sciences. St. Petersburg: Komarov Botanical Institute RAS, 2010. 43 p. (In Russ.)

Matveev S.M., Rumyantsev D.E. Dendrochronology: textbook for university students. Voronezh: Voronezh State Forest Technical Academy, 2013. 139 p. (In Russ.)

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

Poznyakov V.Ya. Severonikel. Moscow: GUB «Ore and metals», 1999. 432 p. (In Russ.)

Shiyatov S.G. Dendrochronology of the upper boundary of the forest in the Urals. M.: Nauka, 1986. 136 p. (In Russ.)

Tsvetkov V.F., Semenov B.A. The pine forests of the Far North. M.: Agropromizdat, 1985. 116 p. (In Russ.)

Tsvetkov V.F. Pine forests of the Kola Forest area and management farms in them. Arkhangelsk: Publishing House of the Architecture State Technical University, 2002. 380 p. (In Russ.)

Vitinskij Yu.I., Kopetskiy M., Kuklin G.V. The statistics of Sun spot-forming activity. M.: Nauka, 1986. 295 p. (In Russ.)

Yarmishko V.T. A device for measuring the annual rings of trees. *Bot. zhurn.*, 1983, vol. 68, no. 10, pp. 1428–1430. (In Russ.)

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

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

Yarmishko V.T., Ignatyeva O.V. *Pinus sylvestris* L. communities in the technogenic environment in the European North of Russia: structure, growth characteristics and condition. *Siberian Forest Journal*, 2021, no. 3, pp. 44–55. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 30.01.2024

Ярмишко В.Т., Игнатьева О.В. Реакции старовозрастных сосен (*Pinus sylvestris* L.) на изменение окружающей среды на Кольском Севере // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2025. Вып. 252. С. 244–259. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.244-259

Исследовались реакции сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на изменения окружающей среды после внешних нарушений (рубки, пожары, аэробиотехногенное загрязнение) на Кольском Севере. Установлено, что вековые сосны-семенники в молодом возрасте достаточно четко реагировали на снижение конкуренции после внешних воздействий усилением радиального прироста древесины (РП). Затем наблюдался заметный спад интенсивности РП, что связано, прежде всего, с обострением конкурентных взаимоотношений в формирующемся молодом сообществе. Следующий период роста и развития сосны обыкновенной, длившийся более 170 лет, характеризовался относительной стабильностью фитоценотической среды, что предопределяло устойчивость РП. Затем имело место внешнее нарушение годами сложившегося сообщества в результате вырубки древостоя. Оставшиеся для обсеменения вырубки сосны в возрасте 250–270 лет достаточно активно реагировали повышением интенсивности РП в 1,5–2 раза в сравнении с предыдущим, многолетним периодом роста. Установившаяся интенсивность РП существенно не менялась на протяжении почти 50 лет. Однако в последние годы старовозрастные сосны отреагировали на усиление конкуренции интенсивно развивающегося молодого сообщества сосны обыкновенной снижением РП. Во время относительной стабилизации в сообществах наблюдались периоды депрессий и экспрессий РП, связанные с изменением погодных условий. В обследованных лесных сообществах, подверженных воздействию промышленного атмосферного загрязнения двуокисью серы в сочетании с тяжелыми металлами (Ni, Cu, Co и др.), большинство вековых сосен в зоне интенсивного загрязнения засохли в 60–70-х гг. прошлого века. В районах, где фиксировались средние уровни промышленного загрязнения, среди молодняков сосны обыкновенной встречаются отдельные вековые сосны в угнетенном состоянии. Многие из них засохли в 90-е годы прошлого столетия, не выдержав столь резко выраженного изменения окружающей среды. В заключение следует подчеркнуть, что вековые сосны (*Pinus sylvestris*) в условиях Кольского Севера достаточно живо реагируют на изменения окружающей среды повышением или снижением интенсивности РП древесины.

Ключевые слова: вырубки, сосна обыкновенная, радиальный прирост, конкуренция, загрязнение, Кольский Север.

Yarmishko V.T., Ignatyeva O.V. Reactions of old-growth pines (*Pinus sylvestris* L.) to environmental changes in the Kola North. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 252, pp. 244–259 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.244-259

The reactions of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) to environmental changes after external disturbances (logging, fires, aerobiotchnogenic pollution) in the Kola North were studied. It was found that century-old pine trees-seed sources at a young age reacted quite clearly to a decrease in competition after external influences by

increasing radial growth of wood (RP). Then there was a noticeable decrease in the intensity of RP, which is primarily due to the aggravation of competitive relationships in the emerging young community. The next period of growth and development of Scots pine, lasting more than 170 years, was characterized by the relative stability of the phytocenotic environment, which predetermined the stability of the RP. Then there was an external violation of the established community for years as a result of cutting down the stand. The remaining for felling seeds pines aged 250–270 years reacted quite actively by increasing the intensity of RP by 1.5–2 times compared to the previous, long-term growth period. The established intensity of RP has not changed significantly for almost 50 years. However, in recent years overgrown pines have reacted to increased competition from the intensively developing young community of Scots pine by reducing RP. During the relative stabilization, periods of depression and RP expression associated with changes in weather conditions were observed in communities. In the surveyed forest communities exposed to industrial atmospheric pollution with sulfur dioxide in combination with heavy metals (Ni, Cu, Co, etc.), most of the century-old pines in the zone of intense pollution withered in 60-70s in the last century. In areas where average levels of industrial pollution were recorded, individual century-old pines in a depressed state are found among the young of Scots pine. Many of them dried up in the 90s of the last century, unable to withstand such a pronounced change in the environment. In conclusion, it should be emphasized that century-old pines (*Pinus sylvestris*) in conditions of Kola North they react quite vividly to environmental changes by increasing or decreasing the intensity of the RP of wood.

Keywords: logging, Scots pine, radial growth, competition, pollution, Kola North.

ЯРМИШКО Василий Трофимович – заведующий отделом «Ботанический сад Петра Великого» Ботанического института имени В.Л. Комарова РАН, профессор Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор биологических наук. SPIN-код: 4483-9930. ORCID: 0000-0001-6893-4748.

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

YARMISHKO Vasily T. – DSc (Biological), Head of the Department «Peter the Great Botanical Garden» of the V.L. Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences, Professor, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 4483-9930. ORCID: 0000-0001-6893-4748.

194021. Institutsky per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: vasiliiyarmishko@yandex.ru

ИГНАТЬЕВА Оксана Васильевна – заведующий кафедрой ботаники и дендрологии Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат биологических наук, доцент.

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

IGNATYEVA Oksana V. – PhD (Biological), Head of the Department of Botany and Dendrology of St.Petersburg State Forest Technical University, Associate Professor.

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

И.Ю. Исаков, К.А. Шестибратов

**ФЕНОТИПИЧЕСКАЯ ПЛАСТИЧНОСТЬ
И СЕЛЕКЦИОННО-РЕПРОДУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ
БИОРЕСУРСНОЙ КОЛЛЕКЦИИ РОДА *BETULA L.*
В ВОРОНЕЖСКОЙ ОБЛАСТИ**

Введение. Создание биоресурсных коллекций является необходимым условием сохранения и рационального использования лесных генетических ресурсов, а также относится к одному из целевых индикаторов и показателей «Федеральной Научно-Технической Программы развития генетических технологий на 2019–2027 годы». В результате реализации «Программы...» предполагается функционирование биоресурсных центров, обеспечивающих формирование, хранение и предоставление образцов коллекций в соответствии с мировыми стандартами, а также создание биоинформационных и генетических баз данных, обеспечивающих снижение технологической зависимости Российской Федерации¹. Актуальными проблемами для хода реализации «Программы...» являются: низкий съем древесины с единицы площади эксплуатационных лесов; недостаточная эффективность лесовосстановления, охраны и защиты лесов, а также низкая актуальность сведений о лесных ресурсах. В то же время наиболее перспективным направлением научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по лесной тематике, приоритетных для России, в настоящий момент является «Создание объектов лесного семеноводства взамен устаревших ...»².

В период 2007–2016 гг. глобальные выбросы CO₂ в результате изменения растительного покрова (в первую очередь обезлесения) составили примерно 12% глобальных выбросов. За тот же период наземная растительность утилизировала около 28% парниковых газов, главным образом в лесах [Seddon et al., 2019]. Биоразнообразие вносит существенный

¹ Федеральная научно-техническая программа развития генетических технологий на 2019-2027 годы. Утверждена Постановлением Правительства РФ от 22 апреля 2019 г. №479.

² Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года. Утверждена Постановлением Правительства РФ от 20 сентября 2018 г. №1989-р.

вклад в национальные экономики стран, а с точки зрения сохранения биоразнообразия реинтродукция хозяйственно ценных видов была бы лучшим и наиболее экономичным решением этой проблемы [Harrison et al., 2022].

Сохранение генотипов *ex situ* может играть особую роль там, где местные виды находятся под угрозой исчезновения из-за промышленного загрязнения или изменения климата, и иметь несколько методов: создание испытательных культур, архивов клонов (клоновые репозитарии), лесосеменных плантаций, коллекций в ботанических садах. Создание объектов *ex situ* позволит человечеству сохранить биоразнообразие на планете посредством поддержания банков генов, включающих: а) хранение семян через банки семян; б) коллекции *in vitro* через банки культуры тканей; в) хранение пыльцы через банки пыльцы; г) криосохранение через криогенные банки; д) полевые генные банки и т. д. [Bilal et al., 2022] Таким образом, географически различные условия, вероятно, будут адекватны для подходящих адаптированных генотипов. Кроме того, концепция происхождения формирует важную связь между сохранением лесных деревьев *in situ* и *ex situ* [Brown, Hardner, 2000].

Существующие традиционные программы селекции ограничены для древесных растений более продолжительным репродуктивным циклом, длительным ювенильным периодом (до 20 лет), низкой плодовитостью, высокими уровнями гетерозиготности, различными уровнями полидности, полизибрионией, внутривидовой и межвидовой несовместимостью, инбридинговой депрессией и точным установлением границы между фенотипической экспрессией и воздействием окружающей среды. Эффективная селекция зависит от понимания факторов, определяющих реакцию на отбор, как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе [Burdon, 2004]. В конечном счете генетическая информация, заложенная в генотипе, через программу индивидуального развития реализуется в фенотипе дерева. Именно фенотип является конечным продуктом для потребителей. Кроме того, целостный фенотип сегодня рассматривается в качестве основного субстрата естественного отбора, а эпигенетическая теория эволюции постулирует первичность фенотипических изменений [Попов и др., 2020], в отличие от синтетической теории эволюции, у которой материалом для эволюции служит наследственная изменчивость организмов, т. е. мутации и комбинации генов [Дарвин, 1939; Huxley, 1942].

Лесные генетические ресурсы относятся к возобновляемым природным ресурсам, что позволяет применять в том числе и разные генетико-

селекционные технологии и получать, в зависимости от типа технологии, различные комбинации хозяйствственно важных признаков. Эти признаки относятся к количественным, имеющим свою специфику, а именно: проявляются в результате взаимодействия многих генов (аддитивное проявление); находятся в одних группах сцепления с негативными признаками; находятся под сильным влиянием внешних, экологических факторов [Фольконер, 1985]. Чтобы использовать ценные генотипы деревьев, их нужно выделить из нативных популяций древесных пород, а это невозможно без тщательного изучения исходного материала [Адлер, Вахитов, 1985]. Поэтому при составлении селекционных программ для видов-лесообразователей, в том числе и для берёзы, необходимо учитывать эту специфику, как и необходимые характеристики вида для вовлечения в селекционный процесс [Исаков, Исаков, 2015], и перспективность использования ДНК-маркеров для оценки биоразнообразия у видов деревьев [Gillet, 1999]. Установлено, что у берёзы повислой два гена — PHYC и FRS10 — отвечают за реакцию берез на свет, несут в себе мутации, коррелирующие с долготой и широтой произрастания, а также с температурным режимом. Мутации гена PHYC также связаны с количеством и периодичностью осадков. А два других гена — KAK и MED5A — отвечают за количество воспроизводимой берёзами древесины [Salojärvi et al., 2017].

Береза повислая является модельной системой для адаптации северных деревьев к изменению климата благодаря достижениям в геномике березы. Проведены исследования по ее устойчивости к патогенным насекомым, азотному обмену, эффективности фотосинтеза и фенологии, а также её высокой генетической изменчивости [Heimonen et al., 2016; Silfver et al., 2020; Tenkanen et al., 2020].

Полигоном для реального решения таких задач иявляется создание и исследование объектов Единого Генетико-Селекционного Комплекса, к которым относится изучаемый объект – опытные культуры берёзы.

Цель работы – изучить некоторые селекционные количественные и качественные характеристики семенного потомства F_1 на созданном объекте биоресурсной коллекции *ex situ* видов и селекционных форм берёзы.

Задачи исследования:

- создать биоресурсную коллекцию берёзы через проведение гибридизации и самоопыления в нативных популяциях местных и интродуцированных видов берёз, получить семенное потомство F_1 ;

- определить изменчивость количественных признаков у селекционных форм F₁ видов берёз через фенотипическую пластичность роста в высоту берёзы повислой, б. пушистой, б. далекарлийской, б. каменной и б. вишнёвой, полученных при свободном опылении;
- дать характеристику лабораторной всхожести семян местных видов берёз, берёзы повислой и берёзы пушистой, при разных способах опыления.

Материалы и методика исследования. Объектом для исследования служили опытные культуры селекционных форм, видов и гибридов берёзы. Местонахождение – Воронежский государственный природный биосферный заповедник имени В.М. Пескова, Рамонский район Воронежской области. Географические координаты - 51°58'02.53" с.ш. 39°26'02.95" в.д. В качестве исходных были использованы деревья из автохтонных популяций берёзы повислой (обозначение в дальнейшем – С – суходол) и берёзы пушистой (болото – Б). Самоопыление проводилось в 1981 г. на деревьях берёзы, произрастающих на территории Усманского бора, по общепринятой методике [Пятницкий, 1961]. Ход цветения определялся по мере распускания женских серёжек. За две недели до цветения на ветви ставились пергаментные изоляторы с предварительно пропарафиненными краями. Попадание чужеродной пыльцы избегалось путём расположения в горловине изолятора ваты и её жёсткой фиксации. Тогда же была проведена меж- и внутривидовая гибридизация берёз. Полученные семена летом 1982 г. были высеваны в посевном отделении Ступинского стационара ЦНИИЛГиС. В возрасте 2-х лет сеянцы были пересажены на лесокультурную площадь в 298 квартале ВГБЗ по схеме 3 х 1 м. Высаживали максимальное количество полученных в результате гибридизации и самоопыления жизнеспособных сеянцев. Возраст опытных культур в настоящее время – 41 год. Количество – 1570³ деревьев. Этот объект является первичным, родоначальным для других объектов (F₂) в Семилукском лесопитомнике и в районе села Князево. Высота деревьев определялась высотомером Suunto PM-5/1520 PC в соответствии с прилагаемой инструкцией. Данные обрабатывались в программе Statistica 12 с определением основных статистических параметров и достоверности значений при $p < 0,05$. Созревшие семена были собраны и пророщены в чашках Петри на фильтровальной бумаге при комнатной температуре. Балльная оценка всхожести семян проводилась по ГОСТ 13056.6-97 с небольшой нашей модификацией. Баллы всхожести определялись так: если на 15 день опыта (по методике) всхожесть

³ данные на момент посадки.

семян составила 80-100%, она оценивалась на 5 баллов, 60-79% – 4 балла, 40-59% – 3 балла, 20-39% – 2 балла, до 19% – 1 балл. Тестились семена от самоопыления и свободного опыления, собранные на том же дереве. В первом случае в качестве отцовских растений (опылителей) использовались следующие виды: берёза бумажная (*Betula papyrifera* Marshall), берёза маньчжурская (*Betula mandshurica* (Regel) Nakai), берёза бело-китайская (*Betula albosinensis* Burkill), берёза вишневая (*Betula lenta* L.), береза железная (*Betula ermanii* Cham.). Пыльца б. бумажной и б. вишнёвой заготовлена с деревьев, растущих в Ботаническом саду имени Б.М. Козо-Полянского Воронежского государственного университета. Кроме того, испытывалось семенное потомство от свободного опыления трёх далекарлийских (разрезнолистных) берёз.

В состав коллекции F_1 входят семена берёзы, имеющие следующее генетическое происхождение: 27 семей берёзы повислой и 21 семья б. пушистой, полученные при разных способах опыления (самоопыление и свободное опыление); внутривидовые гибриды (б. повислая \times б. пушистая – 3 семьи, обратное скрещивание – 5 семей); межвидовые и межсекционные гибриды на основе местных видов берёз – б. повислой – 14 семей; б. пушистой – 24 семьи. Испытывались также следующие формы берёз: карельская берёза и гибриды с её участием – 27 семей; далекарлийская берёза – 3 семьи; б. вишнёвая – 3 семьи; б. каменная – 1 семья. В коллекции представлено также формовое разнообразие берёз, например, чернокорая, карликовая и т. д. Считается, что берёза далекарлийская является формой берёзы повислой *Betula pendula f. dalecarlica* (L.f.) Regel [Qu et al., 2020]). Решением Научно-технического совета ВГЛТУ от 26 декабря 2019 г. все они на базе Центра коллективного пользования научным оборудованием «БиоЛестех» входят в состав Биоресурсной Коллекции (БК) ВГЛТУ. Такие БК являются не только стратегическим резервом элитных генотипов лесного генофонда, но и базой для эффективного выращивания посадочного материала ценных генотипов и создания лесных культур целевого назначения. Перспективные генотипы созданных и выращенных растений берёзы клонированы и используются в научных, образовательных целях сотрудников ВГЛТУ и в качестве показательных объектов ЕГСК [Биоресурсная..., 2019] и других исследовательских организаций, включены в коллекцию *in vitro* клонов ценных генотипов лиственных древесных растений в качестве объектов Научно-технологической инфраструктуры Российской Федерации [Коллекция..., 1991]. На рис. 1 показана схема расположения объекта исследования.



Рис. 1. Схема расположения биоресурсной коллекции березы F₁, 298 квартал Воронежского государственного природного биосферного заповедника им. В.М. Пескова, границы обозначены зеленым цветом

Fig. 1. The location of the bioresource collection of birch F₁, 298 block of the Voronezh State Natural Biosphere Reserve named after V.M. Peskov, the boundaries are marked in green

Результаты исследования и обсуждение. В ходе работы были определены статистически достоверные различия между вышеуказанными группами берёз (рис. 2).



Рис. 2. Количество достоверных различий ($p < 0,05$) между видами и формами берёз F₁ по росту в высоту в возрасте 10 лет

Fig. 2. The number of significant differences ($p < 0.05$) between species and forms of birch F₁ in height at the age of 10 years

На рис. 2 видно, что минимальными и максимальными значениями этого показателя характеризовались интродуцированные виды берёз (б. каменная и б. вишнёвая, 0 и 32 соответственно). Далекарлийская берёза и местные виды имели промежуточные значения.

Для наглядности были взяты контрастные по среднесемейному показателю роста в высоту семьи местных видов берёз и аналогичные показатели других видов (форм) берёз (табл. 1).

Таблица 1

Основные статистические характеристики фенотипов местных и интродуцированных видов и форм берёз

The main statistical characteristics of the phenotypes of local and introduced birch species and forms

Вид (форма), семья	Количество семей, п деревьев в семье, п	Основные статистические характеристики				
		Рост в высоту $M \pm m_x$, м	Дисперсия σ^2	Коэффициент вариации C_v , %	min	max
Берёза повислая / С-1	<u>13</u> 8	$5,2 \pm 0,33$	0,86	18	3,8	6,9
С-54	8	$1,3 \pm 0,44$	1,53	70	0,4	3,6
Б. пушистая / Б-5	<u>16</u> 8	$2,3 \pm 0,37$	1,12	46	1,2	3,6
Б-18	10	$5,7 \pm 0,34$	1,17	19	3,9	7,1
Б. каменная	<u>1</u> 3	$1,2 \pm 0,30$	0,28	44	0,8	1,8
Б. вишнёвая 1	<u>3</u> 8	$1,5 \pm 0,17$	0,23	33	0,8	2,4
Б. вишнёвая 3	8	$0,9 \pm 0,2$	0,31	59	0,3	2,0
Б. вишнёвая 4	6	$1,1 \pm 0,24$	0,35	55	0,4	1,7
Далекарлийская берёза Б	<u>3</u> 31	$5,1 \pm 0,24$	1,77	26	2,0	8,0
Далекарлийская берёза Х	31	$6,1 \pm 0,2$	1,2	18	3,9	8,2
Далекарлийская берёза СХИ	29	$4,7 \pm 0,33$	3,1	37	1,0	7,9

Значения коэффициента вариации были от 18% (семья С-1) до 70% (семья С-54). По эмпирической шкале уровней изменчивости морфометрических признаков, предложенной [Мамаев, 1972] для древесных растений, среднему

уровню изменчивости (13–20%) соответствовал рост семей С-1, Б-18 и потомства далекарлийской берёзы Х. Повышенный уровень (21–30%) показала семья далекарлийской берёзы Б. Высокий уровень изменчивости признака (31–40%) наблюдался у семей берёзы вишнёвой 1 и далекарлийской берёзы СХИ. Семьи с очень высоким уровнем изменчивости (свыше 40%) – С-54, Б-5, б. каменной, б. вишнёвой 3 и 4. На рис. 3 показана изменчивость роста в высоту семей местных и интродуцированных берёз.

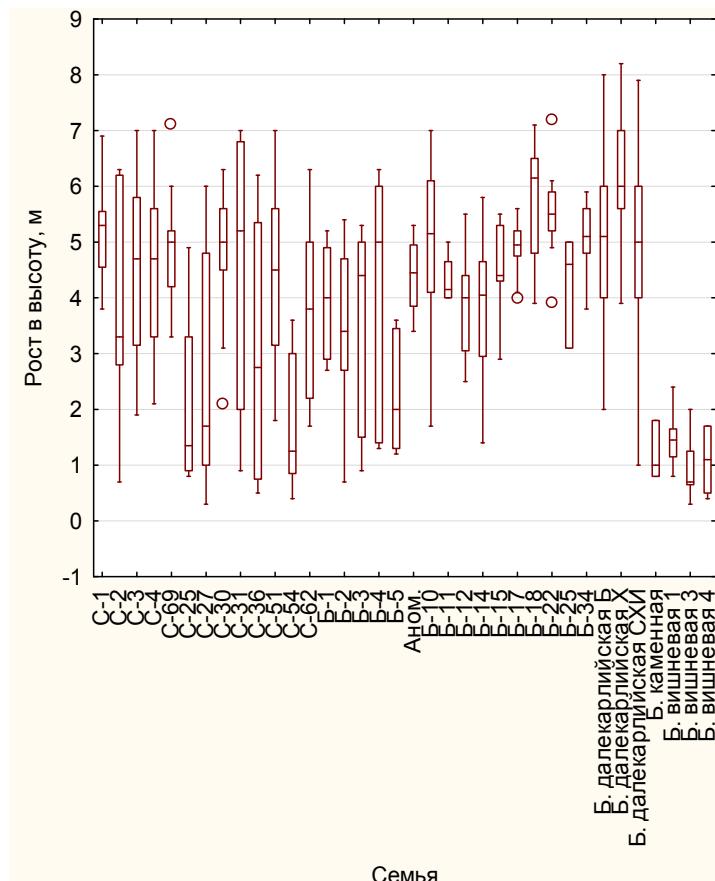


Рис. 3. Изменчивость роста в высоту семей местных и интродуцированных видов и форм берёзы, биоресурсная коллекция F_1 , возраст 10 лет

Fig. 3. Family height growth variability of local and introduced birch species and forms, bio-resource collection F_1 , age 10 years

Рост местных видов берёз. Б. повислая, представленная совокупностью семей С-1 – С-69, проявляла гораздо большую вариабельность по признаку роста в высоту при свободном опылении в возрасте 10 лет по сравнению с б. пушистой. Так, максимальные значения (7 м) наблюдались у семей С-3, С-4, С-31 и С-51. Минимальные значения (менее 1 м) – у С-2, С-25, С-27, С-31, С-36 и С-54. Среднесемейные по этому признаку значения составили: С-1 – 5,2 м; С-2 – 4,0 м; С-3 – 4,6 м; С-4 – 4,6 м; С-25 – 1,3 м; С-27 – 1,8 м; С-30 – 5,0 м; С-31 – 5,1 м; С-36 – 2,8 м; С-51 – 4,5 м; С-54 – 1,3 м; С-62 – 3,9 м; С-69 – 5,0 м. Среднее значение роста в высоту берёзы повислой семенного происхождения – 3,8 м. Статистически достоверные различия выявлены у контрастных по росту семей С-1 и С-54: $t_{\phi} = 5,2 - 1,3 > t_{0,05} = 2,14$.

Б. пушистая, представленная совокупностью семей Б-1 – Б-34 и Аномальной формой, имела наименьшие значения признака рост в высоту 0,7 и 0,9 м (семьи Б-2 и Б-3), максимальные 7,0 и 7,1 м (семьи Б-10 и Б-18). Средние значения признака составили: Б-1 – 4,0 м; Б-2 – 3,4 м; Б-3 – 4,4 м; Б-4 – 5,0 м; Б-5 – 2,3 м; Аном. – 5,5 м; Б-10 – 5,2 м; Б-11 – 4,2 м; Б-12 – 4,0 м; Б-14 – 4,1 м; Б-15 – 4,4 м; Б-17 – 4,9 м; Б-18 – 6,1 м; Б-22 – 5,5 м; Б-25 – 4,6 м; Б-34 – 5,1 м. Среднее значение роста в высоту у берёзы пушистой составило 4,3 м. Ранее [Исаков, 2015] был определён индекс самофертильности у изучаемых семей берёз. Нужно отметить, что при свободном опылении минимальными значениями высоты характеризуются высокосамофертильные формы берёзы повислой С-54 и б. пушистой Б-12. Статистически достоверные различия выявлены между средними значениями роста семей Б-5 и Б-18: $t_{\phi} = 6,1 - 2,3 > t_{0,05} = 2,12$.

Рост интродуцированных берёз. Отдельные деревья всех трёх форм далекарийской берёзы превышали по росту в высоту все вовлечённые в эксперимент виды берёз, и местные, и интродуцированные – соответственно, 8 м, 8,2 м и 7,9 м. Результаты различий по средним высотам статистически достоверны с другими интродуцированными видами – берёзой каменной и берёзой вишневой: $t_{\phi} = 4,7 - 1,2 > t_{0,05} = 2,04$ и $t_{\phi} = 4,7 - 0,9 > t_{0,05} = 2,0$ соответственно.

Два интродуцированных вида, б. вишнёвая (представленная тремя семьями) и б. каменная (представленная одной семьёй), показали значительное отставание в росте, а максимальное значение не превышало 2,5 м (б. вишнёвая 1).

На рис. 4 и 5 показана всхожесть семян, полученных у местных видов берёз при свободном опылении (а) и самоопылении (б).

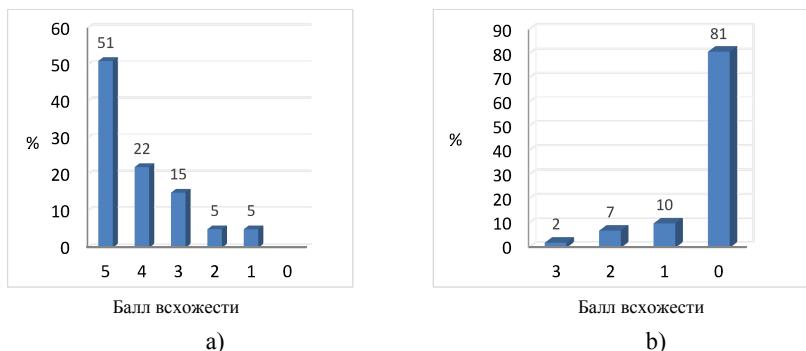


Рис. 4. Всхожесть семян у деревьев березы повислой при свободном опылении (а) и при самоопылении (б)

Fig. 4. Seed germination in silver birch trees with open pollination (a) and self-pollination (b)

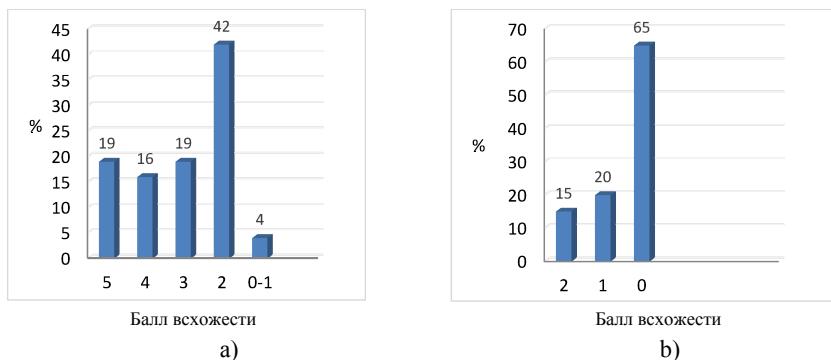


Рис. 5. Всхожесть семян у деревьев березы пушистой при свободном опылении (а) и при самоопылении (б)

Fig. 5. Seed germination in downy birch trees with open pollination (a) and self-pollination (b)

Проведенные исследования по изучению выполненности семян березы не дают однозначных результатов и не позволяют проводить тестирование на самофертильность по отношению процента пустых семян к выполненным (при проведении самоопыления). Поэтому уровень самофертильности был определен по индексу самофертильности роста у семей, полученных при разных способах опыления, полагая при этом, что у потомства самофертильных деревьев при самоопылении их рост и развитие будут превосходить таковой у потомства, полученного при свободном опылении.

Берёза повислая. Семена, полученные при свободном опылении, взошли почти у всех деревьев. При балльной оценке всхожести структура выборки выглядит следующим образом (рис. 4а). У 51% материнских деревьев семена имели высший балл, всхожесть семян 22% деревьев оценивалась как хорошая, у 15% деревьев семена имели удовлетворительную всхожесть, крайне низкую всхожесть (1–2 балла) имели семена 10% деревьев, не образовалось семян у одного дерева (№ 45), что составляет 2% от выборки.

При самоопылении (рис. 4б) семена были получены только у 75% материнских деревьев, но их структура по всхожести сильно отличалась от таковой при свободном опылении: 81% материнских деревьев имели нулевой балл всхожести семян, единичные всходы у семян 17% растений, и только семена одного дерева (№ 42) характеризовались хорошей всхожестью. Соответственно 25% деревьев реагировали на самоопыление полным отсутствием семян.

Береза пушистая. При свободном опылении (рис. 5а) жизнеспособные семена образовали все отобранные деревья (36 экземпляров). 19% деревьев показали отличную всхожесть семян, у 20% она была хорошей, у 19% – удовлетворительной, у 42% деревьев отмечена плохая всхожесть, и только одно дерево (4% выборки) характеризовалось нулевой всхожестью.

Деревья б. пушистой реагировали на самоопыление следующим образом (рис. 5б): семена образовались у 79% деревьев из выборки. У этих деревьев нулевая всхожесть наблюдалась у 65%, всхожесть остальных 35% составила 1–2 балла.

Заключение. Создана биоресурсная коллекция местных и интродуцированных видов берёз. Изученная совокупность местных и интродуцированных берёз по росту в высоту показала межвидовую, внутривидовую и внутрисемейную специфичность по этому признаку. При сравнении среднесемейных значений роста семенного потомства от свободного опыления видно, что по количеству высокорослых деревьев (7 м) б. повислая имеет больше семей, чем б. пушистая, 4 и 2 соответственно. Установлены семьи полиплоидных видов лесных древесных растений (б. пушистая, самостерильные, Б-18 и Б-10), имеющие по исследованным количественным признакам приоритетный селекционный потенциал перед диплоидными (б. повислая). Таким образом, для селекции берёзы в Воронежской области можно привлекать не только традиционный вид – диплоидную берёзу повислую, но и отдельные перспективные семьи полиплоидного вида – берёзы пушистой.

Максимальные значения этого признака у интродуцированных берёз наблюдались у далекарлийской березы, минимальные – у берёзы вишнёвой

и каменной. У последних видов количество посемейных достоверных различий имело максимальное (32) и минимальное значения (0), что может служить косвенным подтверждением бесперспективности для целей интродукции.

При тестировании деревьев на отношение к инбридингу дифференциация нативных популяций наблюдается уже при всхожести семян. Дальнейшие исследования роста этих деревьев показали, что при свободном опылении преимущества в росте имеют самостерильные формы и б. повислой, и б. пушистой.

Данные по оценке всхожести семян позволяют говорить о различиях у видов и форм берёз по способности образовывать жизнеспособные семена при разных способах опыления. У берёзы повислой и б. пушистой количество не завязавшихся семян при проведении однократного инбридинга примерно одинаково – 25% и 21% соответственно.

Подтверждено избирательное негативное влияние инбридинга (инбридинговая депрессия) на определённые группы деревьев на количественные признаки репродуктивных структур – степень всхожести семян – и вегетативных структур – рост штамба в высоту.

Сведения о финансировании исследования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-64-00036.

Благодарности. Авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Адлер Э.Н., Вахитов В.А. Пути генетического улучшения лесных древесных растений. М.: Наука, 1985. 240 с.

Биоресурсная коллекция *ex situ* селекционных форм, гибридов берёзы ВГЛТУ: каталог. URL: https://vgltu.ru/files/nauka/BIOLesteh/kollekciya_gibridov_i_form_roda_betula.pdf?ysclid=lg20xfe52c14377019

Дарвин Ч. Действие перекрёстного опыления и самоопыления в растительном мире. М.-Л.: ОГИЗ – Сельхозгиз, 1939. 340 с.

Исаков И.Ю., Исаков Ю.Н. Инбридинг и гибридизация в роде Береза. Генезис и значение. Lambert Academic Publishing, 2015. 107 с.

Коллекция *in vitro* клонов ценных генотипов лиственных древесных растений // Научно-технологическая инфраструктура Российской Федерации. URL: <http://ckrp-rf.ru/usu/569228/> (дата обращения: 15.01.2024).

Мамаев С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных пород. М.: Наука, 1972. 283 с.

- Попов Е.Б., Драгавцев В.А., Малецкий С.И. Три кита эконики: Истоки и перспективы нового направления в общей биологии. СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2020. 132 с.
- Пятницкий С.С. Практикум по лесной селекции. М.: Сельхозиздат, 1961. 265 с.
- Фольконер Д.С. Введение в генетику количественных признаков / под ред. Л.А. Животовского. М.: Агропромиздат, 1985. 486 с.
- Bilal T., Ayoob B., Behar B., Rafeeq J., Mehraj B., Farooq S., Mushtaq I. Exploration and conservation of forest genetic resources // Journal of Plant Development Sciences. 2022. Vol. 14, no. 4. P. 387–393.
- Brown A.H.D., Hardner C. Sampling the gene pools of forest trees for *ex situ* conservation // Forest Conservation Genetics: Principles and Practice. Melbourne Editors, 2000. P. 185–196.
- Burdon R.D. Genetics and genetic resources: Quantitative genetic principles. // Encyclopedia of Forest Sciences. Academic Press, 2004. P. 182–187.
- Chang S., Mahon E.L., MacKay H.A., Rottmann W.H., Strauss S.H., Pijut P.M., Powell W.A., Coffey V., Lu Haiwei, Mansfield S.D., Jones T.J. Genetic engineering of trees: progress and new horizons. In Vitro Cellular Developmental Biology // Plant. 2018. Vol. 54. P. 341–376.
- Gillet E.M. DNA markers – concepts and characteristics // Which DNA Marker for Which Purpose? Institute fur Forstgenetik und Forstpflanzenzuchtung, Universitat Gottingen, 1999. P. 1–8.
- Harrison R.D., Shono K., Gitz V., Meybeck A., Hofer T., Wertz-Kanounnikoff S. Mainstreaming biodiversity in forestry // FAO Forestry Paper. Rome, FAO and Bogor, Indonesia, CIFOR, 2022. No. 188. 175 p.
- Heimonen K., Valtonen A., Kontunen-Soppela S., Keski-Saari S., Rousi M., Oksanen E., Roininen H. Susceptibility of silver birch (*Betula pendula*) to herbivorous insects is associated with size and phenology of birch—implications for climate warming // Scan. J. For. Res. 2016. Vol. 32. P. 95–104.
- Huxley J. Evolution: The Modern synthesis. London: Georg Allen & Unwin Ltd., 1942. 645 p.
- Oksanen E. Birch as a Model Species for the Acclimation and Adaptation of Northern Forest Ecosystem to Changing Environment // Front. For. Glob. Change. 2021. Vol. 4. P. 1–7.
- Qu Chang, Bian Xiuyan, Han Rui, Jiang Jing, Yu Qibin, Liu Guifeng Expression of *BpPIN* is associated with IAA levels and the formation of lobed leaves in *Betula pendula* ‘Dalecarlica’ // J. For. Res. 2020. Vol. 31. P. 87–97.
- Salojärvi J., Smolander O.P., Nieminen K., Rajaraman S., Safronov O., Safdari P., Lamminmäki A., Immanen J., Lan Tianying, Tanskanen J., Rastas P., Amiryousefi A., Jayaprakash B., Kammonen J. I., Hagqvist R., Eswaran G., Ahonen V. H., Serra J. A., Asiegbu F. O., Dios Barajas-Lopez J. de, Blande D., Blokhina O., Blomster T., Broholm S., Brosché M., Fuqiang Cui, Dardick C., Ehonen S. E., Elomaa P., Escamez S.,

Fagerstedt K. V., Fujii Hiroaki, Gauthier A., Gollan P. J., Halimaa P., Heino P.I., Himanen K., Hollender C., Kangasjärvi S., Kauppinen L., Kelleher C. T., Kontunen-Soppela S., Koskinen J. P., Kovalchuk A., Kärenlampi S. O., Kärkönen A. K., Lim Kean-Jin, Leppälä J., Macpherson L., Mikola J., Mouhu K., Mähönen A. P., Niinemets Ü., Oksanen E., Overmyer K., Palva E. T., Pazouki L., Pennanen V., Puhakainen T., Poczai P., Possen B. J. H. M., Punkkinen M., Rahikainen M. M., Rousi M., Ruonala R., Shoot C. van der, Shapiguzov A., Sierla M., Sipilä T. P., Sutela S., Teeri T. H., Tervahauta A. I., Vaattovaara A., Vahala J., Vetchinnikova L., Welling A., Wrzaczek M., Xu Enjun, Paulin L. G., Schulman A. H., Lascoux M., Albert V. A., Auvinen P., Helariutta Y., Kangasjärvi J. Genome sequencing and population genomic analyses provide insights into the adaptive landscape of silver birch // Nature Genetics. 2017. Vol. 49. P. 904–912.

Seddon N., Turner B., Berry P., Chausson A., Girardin C.A.J. Grounding nature-based climate solutions in sound biodiversity science // Nature Climate Change. 2019. Vol. 9, no 2. P. 84–87.

Silfver T., Heiskanen L., Aurela M., Myller K., Karhu K., Meyer N., Tuovinen J.-P., Oksanen E., Rousi M., Mikola J. Insect herbivory control of Subarctic ecosystem CO₂ exchange in present and future climates // Nature Commun. 2020. Vol. 11. Art. no. 2529.

Tenkanen A., Keski-Saari S., Salojärvi J., Oksanen E., Keinänen M., Kontunen-Soppela S. Differences in growth and gas exchange between southern and northern provenances of silver birch (*Betula pendula*) in northern Europe // Tree Phys. 2020. Vol. 40, no 2. P. 198–214.

References

Adler E.N., Vahitov V.A. Puti geneticheskogo uluchsheniya lesnyh drevesnyh rasteniy. Moscow: Nauka, 1985. 240 p. (In Russ.)

Bilal T., Ayoob B., Behar B., Rafeeq J., Mehraj B., Farooq S., Mushtaq I. Exploration and conservation of forest genetic resources. *Journal of Plant Development Sciences*, 2022, vol. 14, no. 4, pp. 387–393.

Bioresursnaya kollektiya *ex situ* selektsionnyh form, gibridov breezy: katalog. VGLTU, 2019. URL: https://vgltu.ru/files/nauka/BIOLesth/ kollekciya_gibridov_i_form_roda_betula.pdf?ysclid=lg20xfe52c14377019 (In Russ.)

Brown A.H.D., Hardner C. Sampling the gene pools of forest trees for *ex situ* conservation. *Forest Conservation Genetics: Principles and Practice*. Melbourne Editors, 2000, pp. 185–196.

Burdon R.D. Genetics and genetic resources: Quantitative genetic principles. *Encyclopedia of Forest Sciences*. Academic Press, 2004, pp. 182–187.

Chang S., Mahon E.L., MacKay H.A., Rottmann W.H., Strauss S.H., Pijut P.M., Powell W.A., Coffey V., Lu Haiwei, Mansfield S.D., Jones T.J. Genetic engineering of trees: progress and new horizons. In *Vitro Cellular Developmental Biology. Plant*, 2018, vol. 54, pp. 341–376.

- Darvin Ch. Deystvie perekrestnogo opyleniya i samoopyleniya v rastitel'nom mire. Moskva-Leningrad: OGIZ – Sel'hozgiz, 1939. 340 p. (In Russ.)
- Folkoner D.S. Vvedeniye v genetiku kolichestvennyh priznakov / pod. red. L.A. Zhivotovskogo. Moskva: Agropromizdat, 1985. 486 p. (In Russ.)
- Gillet E. M., 1999. DNA markers – concepts and characteristics. *Which DNA Marker for Which Purpose?* Institute fur Forstgenetik und Forstpflanzenzuchtung, Universitat Gottingen, 1999, pp. 1–8.
- Harrison R.D., Shono K., Gitz V., Meybeck A., Hofer T., Wertz-Kanounnikoff S. Mainstreaming biodiversity in forestry. *FAO Forestry Paper*, Rome, FAO and Bogor, Indonesia, CIFOR, 2022, no. 188, 175 p.
- Heimonen K., Valtonen A., Kontunen-Soppela S., Keski-Saari S., Rousi M., Oksanen E., Roininen H. Susceptibility of silver birch (*Betula pendula*) to herbivorous insects is associated with size and phenology of birch— implications for climate warming. *Scan. J. For. Res.*, 2016, vol. 32, no. 2, pp. 95–104.
- Huxley J. Evolution: The Modern synthesis. London: Georg Allen & Unwin Ltd., 1942. 645 p.
- Isakov I., Isakov Yu. Inbriding i gibridizatsiya v rode Bereza. Genezis i znachenije. Lambert Academic Publishing, 2015. 107 p. (In Russ.)
- Kollektsiya in vitro klonov tsennyyh genotipov listvennyh drevesnyh rasteniy. *Nauchno-technologicheskaya infrastruktura Rossiyskoy Federatsii*. URL: <http://ckp-rf.ru/usu/569228/> (assessed January 15, 2024). (In Russ.)
- Mamaev S. A. Formy vnutrividovoy izmenchivosti drevesnyh porod. Moscow: Nauka, 1972. 283 p. (In Russ.)
- Oksanen E. Birch as a Model Species for the Acclimation and Adaptation of Northern Forest Ecosystem to Changing Environment. *Front. For. Glob. Change*, 2021, vol. 4, pp. 1–7.
- Popov E. B., Dragavtsev V. A., Maletskiy S. I. Tri kita ekoniki: Istoki i perspektivi novogo napravleniya v obschey biologii. St. Petersburg: Izdatelsko-poligraficheskaya assotsiatsiya vysshih uchebnyh zavedeniy, 2020. 132 p. (In Russ.)
- Pyatnitskiy S.S. Praktikum po lesnoy selektsii. Moscow: Sel'hozizdat, 1961. 265 p. (In Russ.)
- Qu Chang, Bian Xiuyan, Han Rui, Jiang Jing, Yu Qibin, Liu Guifeng Expression of *BpPIN* is associated with IAA levels and the formation of lobed leaves in *Betula pendula* ‘Dalecarlica’. *J. For. Res.*, 2020, vol. 31, no. 1, pp. 87–97.
- Salojärvi J., Smolander O.P., Nieminen K., Rajaraman S., Safronov O., Safdari P., Lamminmäki A., Immanen J., Lan Tianying, Tanskanen J., Rastas P., Amiryousefi A., Jayaprakash B., Kammonen J. I., Hagqvist R., Eswaran G., Ahonen V. H., Serra J. A., Asiegbu F. O., Dios Barajas-Lopez J. de, Blande D., Blokhina O., Blomster T., Broholm S., Brosché M., Fuqiang Cui, Dardick C., Ehonen S. E., Elomaa P., Escamez S., Fagerstedt K. V., Fujii Hiroaki, Gauthier A., Gollan P. J., Halimaa P., Heino P. I., Himanen K., Hollender C., Kangasjärvi S., Kauppinen L., Kelleher C. T., Kontunen-

Soppela S., Koskinen J. P., Kovalchuk A., Kärenlampi S. O., Kärkönen A. K., Lim Kean-Jin, Leppälä J., Macpherson L., Mikola J., Mouhu K., Mähönen A. P., Niinemets Ü., Oksanen E., Overmyer K., Palva E. T., Pazouki L., Pennanen V., Puhakainen T., Poczai P., Possen B. J. H. M., Punkkinen M., Rahikainen M. M., Rousi M., Ruonala R., Schoot C. van der, Shapiguzov A., Sierla M., Sipilä T. P., Sutela S., Teeri T. H., Tervahauta A. I., Vaattovaara A., Vahala J., Vetchinnikova L., Welling A., Wrzaczek M., Xu Enjun, Paulin L. G., Schulman A. H., Lascoux M., Albert V. A., Auvinen P., Helariutta Y., Kangasjärvi J. Genome sequencing and population genomic analyses provide insights into the adaptive landscape of silver birch. *Nature Genetics*, 2017, vol. 49, no. 6, pp. 904–912.

Seddon N., Turner B., Berry P., Chausson A., Girardin C.A.J. Grounding nature-based climate solutions in sound biodiversity science. *Nature Climate Change*, 2019, vol. 9, no. 2, pp. 84–87.

Silfver T., Heiskanen L., Aurela M., Myller K., Karhu K., Meyer N., Tuovinen J.-P., Oksanen E., Rousi M., Mikola J. Insect herbivory control of Subarctic ecosystem CO₂ exchange in present and future climates. *Nature Commun.*, 2020, vol. 11, art. no. 2529.

Tenkanen A., Keski-Saari S., Salojärvi J., Oksanen E., Keinänen M., Kontunen-Soppela S. Differences in growth and gas exchange between southern and northern provenances of silver birch (*Betula pendula*) in northern Europe. *Tree Phys.*, 2020, vol. 40, no. 2, pp. 198–214.

Материал поступил в редакцию 30.01.2024

Исаков И.Ю., Шестибратов К.А. Фенотипическая пластичность и селекционно-репродуктивные особенности биоресурсной коллекции рода *Betula* L. в Воронежской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 252. С. 260–277. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.260-277

В статье приводятся теоретические и практические данные по созданию, составу и некоторым параметрам продуктивности и воспроизводства биоресурсной коллекции быстрорастущих древесных растений на примере рода *Betula* L. Изучен рост в высоту у 10-летних деревьев, выращенных из семян свободного опыления берёзы повислой (13 семей), б. пушистой (16 семей), далекарлийской берёзы (3 семьи), б. каменной (1 семья), б. вишнёвой (3 семьи). Выявлены количественные признаки вегетативной сферы деревьев – рост в высоту и генеративной – прорастание семян у разных селекционных категорий берёз. Максимальное значение (7 м) по этому показателю б. повислой наблюдалось у семей С-3, С-4, С-31 и С-51 (высокосамостерильная). У б. пушистой наивысшее значение 7,1 м выявлено у высокосамостерильной формы Б-18. Установлено, что для самостерильных форм обоих местных видов берёз перспективным селекционным направлением является получение семян и

воспроизведение при естественном способе размножения. Среди интродуцированных в Воронежскую область наиболее перспективной является далекарлийская берёза, у которой даже среднесемейные значения роста в высоту превышали аналогичный показатель у местных видов, а отдельные деревья всех трёх семей были лидерами по этому признаку среди всех изученных видов. Другие виды берёзы, интродуцированные в Воронежскую область, б. каменная и б. вишнёвая, по этому признаку показали низкие значения и являются бесперспективными для целей интродукции в Воронежскую область. Определена всхожесть семян местных видов берёз, полученных при разных способах опыления. Выявлена тенденция к асимметричности распределения показателей баллов всхожести при самоопылении (минимальные значения) и свободном опылении (максимальные значения) у диплоидного вида (берёзы повислой) и относительной симметричности у тетраплоидного (полиплоидного) вида (б. пушистой).

Ключевые слова: фенотип, биоресурсная коллекция, род Берёза, генофонд, гибриды, самоопыление, свободное опыление.

Isakov I.Yu., Shestibratov K.A. Phenotypic plasticity and breeding reproductive features in the bioresource collection of the genus *Betula* L. in the Voronezh region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 252, pp. 260–277 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.260-277

The article provides theoretical and practical data on the creation, composition and some parameters of productivity and reproduction of a bioresource collection of fast-growing woody plants using the example of the genus *Betula* L. The height growth of 10-year-old trees grown from seeds of open pollination of silver birch (13 families), downy b. (16 families), silver birch «Dalecarlica» (3 families), *B. ermanii* (1 family), *B. lenta* (3 families) was studied. Quantitative signs of the vegetative sphere of trees – height growth and generative – seed germination in different breeding categories of birch trees were revealed. The maximum value (7 m) for this indicator was observed in families C-3, C-4, C-31 and C-51 (highly self-sterile). In *B. pubescens*, the highest value of 7.1 m was found in the highly self-sterile form B-18. It has been established that for self-sterile forms of both local birch species, a promising breeding direction is the production of seeds and reproduction with a natural method of reproduction. Among those introduced to the Voronezh Region, the Dalecarlian birch is the most promising, in which even the average family height values exceeded the same indicator for local species, and individual trees of all three families were leaders in this respect among all studied species. Other birch species introduced to the Voronezh Region, *B. ermanii* and *B. lenta*, showed low values for this feature and are unpromising for the purposes of introduction in the Voronezh region. The germination of seeds of local birch species obtained by different pollination methods has been determined. A tendency to asymmetry in the distribution

of germination scores during self-pollination (minimum values) and open pollination (maximum values) in a diploid species (silver birch) and relative symmetry in a tetraploid (polyploid) species (downy birch) was revealed.

Keywords: phenotype, bioresource collection, Birch genus, gene pool, hybrids, self-pollination, open pollination.

ИСАКОВ Игорь Юрьевич – доцент кафедры лесной генетики, биотехнологии и физиологии растений Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 1242-6288. ORCID ID: 0000-0003-2927-3275. Web of Science Researcher ID: AAH-5614-2020. Scopus Author ID: 57213354445.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: labgen@vglta.vrn.ru

ISAKOV Igor Yu. – PhD (Agricultural), Associate Professor of the Department of Forest Genetics, Biotechnology and Plant Physiology, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov. SPIN-code: 1242-6288. ORCID ID: 0000-0003-2927-3275. Web of Science Researcher ID: AAH-5614-2020. Scopus Author ID: 57213354445.

394087. Timiryazeva str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: labgen@vglta.vrn.ru

ШЕСТИБРАТОВ Константин Александрович – руководитель группы лесной биотехнологии филиала ГНЦ ИБХ РАН, кандидат биологических наук. SPIN-код: 2166-1664. ORCID ID: 0000-0002-1996-6433. Web of Science Researcher ID: J-5288-2018.

142290, пр. Науки 6, г. Пущино, Московская область, Россия. E-mail: schestibratov.k@yandex.ru

SHESTIBRATOV Konstantin A. – PhD (Biological), Head of Forest Biotechnology Group, Branch of the Shemyakin-Ovchinnikov Institute of Bioorganic Chemistry of the Russian Academy of Sciences. SPIN-code: 2166-1664. ORCID ID: 0000-0002-1996-6433. Web of Science Researcher ID: J-5288-2018.

142290. Nauki av. 6. Pushchino. Moscow region. Russia. E-mail: schestibratov.k@yandex.ru

2. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ЛЕСОЗАГОТОВОВОК

УДК 532.5

А.А. Куликов, И.В. Иванова, И.Н. Дюкова

ЭНЕРГИЯ ДАВЛЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЖИДКОЙ ЧАСТИЦЫ

Введение. В настоящее время в лесной и деревообрабатывающей промышленности внедрение объемного гидропривода способствует комплексной механизации лесозаготовительных производств, повышению уровня автоматизации производства, созданию многофункциональных машин и установок, исключению при выполнении некоторых трудоемких и опасных с точки зрения охраны труда производственных операций, повышению выработки на одного рабочего, снижению себестоимости лесопродукции. Особо нужно подчеркнуть, что приводами оснащено большинство вновь создаваемых и наиболее перспективных лесозаготовительных, трелевочных с захватом, сучкорезных и других лесных машин, сортировочно-сплоточных агрегатов, полуавтоматических линий для раскрыжевки хлыстов и бревен большой длины, деревообрабатывающих станков с программным управлением и др.

Гидропривод имеет преимущества по сравнению с другими типами приводов там, где требуется создание значительной мощности, быстродействие, позиционная точность рабочих органов, компактность, малая масса, высокая надежность работы и разветвленность привода. В гидроприводе жидкость является энергоносителем, благодаря рабочей жидкости устанавливается связь между насосом и гидродвигателями. Кроме того, рабочая жидкость обеспечивает охлаждение пар трения и отвод от них тепла и продуктов износа, а также смазку подвижных частей элементов гидропривода. При эксплуатации гидроприводов нужно создавать такие условия, при которых рабочая жидкость как можно дольше сохраняла бы свои первоначальные физические свойства.

Уточнение физической модели процессов энергетического взаимодействия частиц в потоке жидкости или газа позволяет повысить точность и наглядность математического описания многих процессов, например, та-

ких, которые встречаются в гидроприводах различных устройств, применяемых в лесной отрасли. Детализация математической модели позволяет на предпроектной стадии определять более точные расчётно-конструктивные характеристики проектируемого оборудования.

Суммарная энергия любого тела, как известно, в общем случае может состоять из внутренней, кинетической и потенциальной энергий. Факт наличия у тела энергии можно установить экспериментальным путём. Например, тело, подвешенное на нити, обладает потенциальной энергией в поле гравитационных сил. Чтобы в этом убедиться, достаточно создать соответствующие условия – перерезать нить. Тело начнёт движение, а результатирующая гравитационных сил, приложенных к телу со стороны окружающей среды, будет совершать положительную механическую работу. В результате кинетическая энергия тела будет возрастать. При этом внутренняя энергия может оставаться постоянной. Возможность совершения механической работы с участием тела после создания определённых условий, не связанных с подводом энергии, доказывает тот факт, что тело обладает тем или иным видом энергии.

Цель исследования – установить и доказать наличие дополнительного вида энергии, которым обладает элементарная индивидуальная частица жидкости, находящаяся под давлением.

Материалы и методика исследования. Известно [Сивухин, 2005], что убыль потенциальной энергии тела в поле гравитационных сил, при его перемещении из одного положения в пространстве в другое, измеряется той работой, которую совершают при этом действующие на тело гравитационные силы:

$$\Pi_1 - \Pi_2 = A_{\text{тр}}, \quad (1)$$

где Π_1 и Π_2 – потенциальная энергия тела в начальном и конечном положении соответственно, Дж; $A_{\text{тр}}$ – работа гравитационных сил, Дж.

Выберем в качестве тела элементарную индивидуальную частицу (ЭИЧ) в объёме жидкости и рассмотрим подробнее отдельные виды её суммарной энергии. Для этого выберем в пространстве, занятом жидкостью, произвольную точку. Вокруг этой точки выделим элементарный индивидуальный объем $d\omega$, м³, площадь поверхности которого $d\sigma$, м², а масса dm , кг.

Термодинамическими параметрами, которые характеризуют состояние жидкости в элементарном индивидуальном объёме $d\omega$ являются: p – абсолютное давление, Па; v – удельный объём, м³/кг; T – абсолютная темпера-

тура, К. Известно, что все указанные термодинамические параметры состояния, а также удельная внутренняя энергия u , Дж/кг, определяются в такой системе координат, в которой ЭИЧ, как целое, покоится. При этом абсолютное давление p равно гидростатическому давлению в той точке жидкости, в которой находится ЭИЧ. Само гидростатическое давление равно, как известно, модулю нормальных напряжений в данной точке покоящейся жидкости [Лойцянский, 1970]. Рассматриваемая жидкость может быть несжимаемой или сжимаемой (газ).

С помощью мысленного эксперимента убедимся в том, что ЭИЧ, находящаяся внутри жидкости под давлением p , обладает, помимо внутренней, кинетической и потенциальной (в поле гравитационных сил) энергий, ещё одним дополнительным видом энергии. Разместим в объёме жидкости вертикальный отводной канал с подвижным поршнем таким образом, чтобы небольшая часть жидкости, включающая ЭИЧ, оказалась в отводном канале непосредственно под поршнем. С помощью некоторого устройства создадим возможность для того, чтобы внешнее давление над поршнем в отводном канале могло плавно уменьшаться. После этого начнём достаточно медленно снижать внешнее давление над поршнем от начального значения, равного гидростатическому давлению в точке, где вначале находилась рассматриваемая ЭИЧ. В результате этого поршень и находящаяся под ним жидкость начнут подниматься по отводному каналу вертикально вверх. В результате такого подъёма главный вектор поверхностных сил, действующих на поверхность $d\sigma$ со стороны остальной жидкости, будет совершать положительную работу, так как известно, что в неподвижной жидкости он по модулю равен силе тяжести ЭИЧ, но направлен в противоположную сторону [Лойцянский, 1970].

Процесс подъёма ЭИЧ может проходить достаточно медленно, в результате чего у ЭИЧ будет изменяться только потенциальная энергия в поле силы тяжести, а ни кинетическая, ни внутренняя энергии изменяться не будут. Последнее объясняется тем, что расширение ЭИЧ, в случае сжимаемой жидкости, имеющей, например, свойства идеального газа, вызванное снижением абсолютного давления p при подъёме, в медленном процессе может быть практически изотермическим. В таком постоянстве внутренней энергии просматривается аналогия с телом, падающим в поле гравитационных сил. После перезания нити, на которой подвешено тело, самоизвестно совершается работа гравитационными силами, действующими на тело со стороны окружающей среды, в результате чего возрастает кинетическая энергия тела, а внутренняя остаётся постоянной.

Убыль энергии, связанной с давлением, которой обладает ЭИЧ в объёме жидкости, определяется величиной работы, совершённой силами, действующими на ЭИЧ со стороны окружающей среды. Величина этой работы зависит от высоты подъёма ЭИЧ в отводном канале. Высота подъёма, в частности, будет тем больше, чем глубже расположена ЭИЧ в слое жидкости. Например, чем глубже ЭИЧ расположена в покоящейся жидкости, то есть чем больше гидростатическое давление, которое равно абсолютному давлению p этой ЭИЧ, тем большая работа может быть совершена при её подъёме, а значит, тем большей энергией ЭИЧ изначально обладает.

Этот вид энергии, которым обладает любая индивидуальная частица внутри жидкости, зависящий от абсолютного давления p , может быть назван баропотенциальной энергией.

По определению убыль баропотенциальной энергии при перемещении индивидуальной жидкой частицы из одного положения в жидкости в другое измеряется той работой, которую совершают при этом поверхностные силы, действующие со стороны окружающей жидкости на поверхность индивидуальной жидкой частицы.

Применяя это определение к ЭИЧ, рассмотренной в мысленном эксперименте, подтверждающем существование баропотенциальной энергии, можем записать:

$$dE_{p1} - dE_{p2} = dL_{\Sigma}, \quad (2)$$

где dE_{p1} и dE_{p2} – значения баропотенциальной энергии ЭИЧ в начале и в конце подъёма по отводному каналу, Дж; dL_{Σ} – суммарная работа, совершённая в ходе подъёма поверхностными силами, действующими на поверхность $d\sigma$ ЭИЧ со стороны остальной жидкости, Дж.

В общем случае работа сжимаемой жидкости dL_{Σ} состоит из двух частей – из положительной работы $dL_{\text{под}}$ главного вектора поверхностных сил при подъёме ЭИЧ по отводному каналу на высоту h , м, и из отрицательной работы dL_{pac} , совершаемой поверхностными силами при увеличении объёма $d\omega$ ЭИЧ, вызванном снижением её абсолютного давления p в ходе подъёма.

В результате этого выражение (2), после введения удельных величин, записывается в виде:

$$e_{p1} \cdot dm - e_{p2} \cdot dm = l_{\Sigma} \cdot dm = (l_{\text{под}} - l_{\text{pac}}) \cdot dm, \quad (3)$$

где e_{p1} и e_{p2} – значения удельной баропотенциальной энергии ЭИЧ в начале и в конце подъёма по отводному каналу на высоту h соответственно, Дж/кг;

l_{Σ} – суммарная удельная работа, совершённая поверхностными силами, действующими на поверхность $d\sigma$ ЭИЧ в ходе подъёма на высоту h , Дж/кг; $l_{\text{под}}$ – положительная удельная работа главного вектора поверхностных сил при подъёме ЭИЧ по отводному каналу на высоту h , Дж/кг; $(-l_{\text{pac}})$ – отрицательная удельная работа, совершаемая поверхностными силами при увеличении объёма $d\omega$ ЭИЧ, вызванном снижением давления в ходе подъёма, Дж/кг.

После деления (3) на dm получаем:

$$e_{p1} - e_{p2} = l_{\text{под}} - l_{\text{pac}}. \quad (4)$$

Примечание. Знак минус у величины l_{pac} в (4) обусловлен тем, что при расширении объёма $d\omega$ поверхностными силами, действующими на поверхность $d\sigma$ ЭИЧ, совершается отрицательная работа, так как перемещение границы поверхности $d\sigma$ при расширении направлено противоположно напряжениям, характеризующим плотность распределения поверхностных сил, которые приложены к точкам этой поверхности.

Величина l_{pac} в (4) рассчитывается по известной формуле [Кириллин и др., 2008; Куликов, 2015]:

$$l_{\text{pac}} = \int_{v_1}^{v_2} p(v) dv, \quad (5)$$

где v_1 и v_2 – значения удельных объёмов жидкости в ЭИЧ в начале и конце процесса подъёма, м³/кг; $p(v)$ – зависимость p от v в ходе подъёма, Па.

Построим внутри отводного канала вертикальную ось z с началом отсчёта в точке, где первоначально находилась ЭИЧ. Очевидно, что в этом случае величины v и p будут непрерывными функциями от z $v = v(z)$ и $p = p(z)$. В начале процесса подъёма $z = 0$, а в конце $z = h$. Соответственно, $v_1 = v(0)$ и $v_2 = v(h)$. В результате из (5) получаем:

$$l_{\text{pac}} = \int_{v(0)}^{v(h)} p(v) dv = \int_0^h p(z) \cdot v(z)'_z \cdot dz, \quad (6)$$

где $v(z)'_z$ – производная от $v(z)$ по z , м²/кг.

Величина $l_{\text{под}}$ в (4) равна отношению:

$$l_{\text{под}} = \frac{dL_{\text{под}}}{dm}. \quad (7)$$

При подъёме ЭИЧ по вертикальному отводному каналу вдоль оси z направление её перемещения и направление действующего на неё главного

вектора поверхностных сил совпадают. Соответственно, элементарная работа $dL_{\text{под}}$ при подъёме ЭИЧ на высоту h вычисляется по формуле:

$$dL_{\text{под}} = |d\vec{P}| \cdot h, \quad (8)$$

где $|d\vec{P}|$ – модуль главного вектора поверхностных сил, действующих со стороны остальной жидкости на поверхность ds ЭИЧ, Н.

Известно [Лойцянский, 1970], что модуль главного вектора поверхностных сил, приложенных к индивидуальной частице покоящейся жидкости, равен модулю действующей на неё силы тяжести:

$$|d\vec{P}| = |d\vec{F}_t| = g \cdot dm, \quad (9)$$

где $|d\vec{F}_t|$ – модуль силы тяжести ЭИЧ, Н; g – модуль вектора ускорения свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$.

Из (7), с учётом (8) и (9), получаем:

$$l_{\text{под}} = gh. \quad (10)$$

Из основного уравнения гидростатики [Лойцянский, 1970] для рассматриваемого случая получаем:

$$v \cdot dp = v(z) \cdot dp(z) = v(z) \cdot p(z)'_z \cdot dz = -gdz, \quad (11)$$

где $p(z)'_z$ – производная от $p(z)$ по z , Па/м.

После интегрирования (11) в пределах от 0 до h получаем:

$$gh = - \int_0^h v(z) \cdot p(z)'_z \cdot dz. \quad (12)$$

Подставляя (12) в (7), получаем:

$$l_{\text{под}} = - \int_0^h v(z) \cdot p(z)'_z \cdot dz. \quad (13)$$

Подставляя (6) и (13) в (4), получаем:

$$\begin{aligned} e_p(h) - e_p(0) &= \int_0^h v(z) \cdot p(z)'_z \cdot dz + \int_0^h p(z) \cdot v(z)'_z \cdot dz = \\ &= \int_0^h [v(z) \cdot p(z)]'_z \cdot dz = p(h) \cdot v(h) - p(0) \cdot v(0), \end{aligned} \quad (14)$$

где $e_p(0)$ – значение удельной баропотенциальной энергии в начале процесса (при $z = 0$), $e_p(0) = e_{p1}$, Дж/кг; $e_p(h)$ – значение удельной баропотенциальной энергии в конце процесса (при $z = h$), $e_p(h) = e_{p2}$, Дж/кг.

Из (14) следует, что удельная баропотенциальная энергия жидкости с точностью до константы равна произведению абсолютного давления p на удельный объём v :

$$e_p = p \cdot v + C, \quad (15)$$

где C – неизвестная константа, Дж/кг.

Полагая из очевидных соображений, что при p , равном нулю, значение e_p также будет равно нулю, из (15) получаем:

$$C = 0. \quad (16)$$

В результате окончательная формула для вычисления удельной баропотенциальной энергии жидкости имеет вид:

$$e_p = p \cdot v. \quad (17)$$

Отметим, что и в частном случае несжимаемой жидкости формула (17) для баропотенциальной энергии сохранится, так как l_{pac} в (4) будет равна нулю, а после интегрирования (13) при $v = \text{const}$ получаем (14).

Результаты исследований. В соответствии с (17) величина e_p однозначно определяется двумя термодинамическими параметрами состояния. Из этого следует, что удельная баропотенциальная энергия e_p является функцией состояния, как, например, и удельная внутренняя энергия.

Выходы. В результате приходим к следующему выводу. Удельная энталпия жидкости или газа, которая по определению равна сумме удельной внутренней энергии и произведения $(p \cdot v)$, представляет по физическому смыслу сумму двух видов энергии – внутренней и баропотенциальной. Помимо этих двух, термодинамическая система, например, индивидуальная частица в объёме жидкости, может обладать ещё двумя видами энергии – кинетической и потенциальной.

После введения баропотенциальной энергии удобную и наглядную форму приобретает формулировка первого закона термодинамики для открытых термодинамических систем.

Рассмотрим это на примере паровой турбины, работающей в стационарном режиме. На вход турбины поступает перегретый пар с параметрами $p_{\text{вх}}$, $T_{\text{вх}}$, $v_{\text{вх}}$. Для наглядности будем считать, что выходит из турбины тоже перегретый пар с параметрами $p_{\text{вых}}$, $T_{\text{вых}}$, $v_{\text{вых}}$. Первый закон термодинамики для рассматриваемого примера, при условии, что эффектами, связанными с трением, можно пренебречь, формулируется следующим образом. В стационарном режиме внутренняя энергия всей паротурбинной

установки не изменяется. Следовательно, суммарное количество поступившей в установку энергии из окружающей среды за некоторый интервал времени должно быть равно суммарному количеству энергии, переданному из неё в окружающую среду за то же время. На входе и выходе турбины с рабочим телом переносится четыре вида энергии: внутренняя $U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}}$; кинетическая $K_{\text{вх}}$ и $K_{\text{вых}}$; потенциальная $\Pi_{\text{вх}}$ и $\Pi_{\text{вых}}$; баропотенциальная $E_p \text{вх}$ и $E_p \text{вых}$, Дж. В окружающую среду от турбины передаётся техническая работа L_t , Дж.

Таким образом, первый закон термодинамики для открытой термодинамической системы – паровой турбины – записывается в виде равенства:

$$U_{\text{вх}} + K_{\text{вх}} + \Pi_{\text{вх}} + E_p \text{вх} = U_{\text{вых}} + K_{\text{вых}} + \Pi_{\text{вых}} + E_p \text{вых} + L_t. \quad (18)$$

После деления обоих частей равенства (18) на массу рабочего тела, прошедшего через установку за указанное время, из (18) получаем:

$$l_t = (u_{\text{вх}} - u_{\text{вых}}) + (k_{\text{вх}} - k_{\text{вых}}) + (\pi_{\text{вх}} - \pi_{\text{вых}}) + (e_p \text{вх} - e_p \text{вых}). \quad (19)$$

где $u_{\text{вх}}$, $u_{\text{вых}}$, $k_{\text{вх}}$, $k_{\text{вых}}$, $\pi_{\text{вх}}$, $\pi_{\text{вых}}$, $e_p \text{вх}$, $e_p \text{вых}$ – значения удельных энергий рабочего тела на входе и выходе – внутренней, кинетической, потенциальной, баропотенциальной соответственно, Дж/кг; l_t – удельная техническая работа турбины, Дж/кг.

При применении традиционных допущений о малости отличий на входе и выходе кинетической и потенциальной энергий рабочего тела из (19) получаем известную формулу:

$$l_t = (u_{\text{вх}} + p_{\text{вх}} v_{\text{вх}}) - (u_{\text{вых}} + p_{\text{вых}} v_{\text{вых}}) = h_{\text{вх}} - h_{\text{вых}}, \quad (20)$$

где $h_{\text{вх}}$ и $h_{\text{вых}}$ – значения удельной энтальпии рабочего тела на входе и выходе паровой турбины соответственно, Дж/кг.

Традиционно физический смысл произведения $(p \cdot v)$ связывают с такими понятиями, как «работа проталкивания» или работа, производимая силами давления [Прандтль, 2000; Ландау, 2001; Кириллин и др., 2008]. Такой акцент на понятии «работа» при интерпретации величины $(p \cdot v)$ несколько затеняет её энергетическое содержание, так как любая работа – это всегда характеристика процесса, а удельная энергия – это характеристика состояния.

Более строгое физическое описание процесса энергообмена между частицами, находящимися в потоке жидкости или газа, позволяет в перспективе составлять наглядные энергетические балансы вместо традиционных тепловых балансов для различного оборудования, в том числе применяемого в лесном хозяйстве и при переработке древесины.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндин А.Е.* Техническая термодинамика для вузов. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Изд. дом МЭИ, 2008. 496 с.
- Куликов А.А.* Техническая термодинамика. Часть 1. Общие принципы. СПб.: СПбГЛТУ, 2015. 104 с.
- Ландау Л.Д.* Теоретическая физика. В 10 т. Т.6. Гидродинамика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 736 с.
- Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1970. 904 с.
- Прандтль Л.* Гидроаэромеханика. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотичная динамика», 2000. 576 с.
- Сивухин Д.В.* Общий курс физики. В 5 т. Т. 1. Механика. М.: МФТИ, 2005. 560 с.

References

- Kirillin V.A., Sychev V.V., Sheindlin A.E.* Technical thermodynamics for universities. 5th ed., reprint. and additional. M.: Publishing house of MEI, 2008. 496 p. (In Russ.)
- Kulikov A.A.* Technical thermodynamics. Part 1. General principles. St. Petersburg: SPbGLTU, 2015. 104 p. (In Russ.)
- Landau L.D.* Theoretical physics. In 10 vols. Vol. 6. Hydrodynamics. M.: FIZMATLIT, 2001. 736 p. (In Russ.)
- Loitsyansky L.G.* Mechanics of liquid and gas. M.: Nauka, 1970. 904 p. (In Russ.)
- Prandtl L.* Hydroaeromechanics. Izhevsk: SIC «Regular and chaotic dynamics», 2000. 576 p. (In Russ.)
- Sivukhin D.V.* General course of physics. In 5 vols. Vol.1. Mechanics. M.: MIPT, 2005. 560 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 10.10.2024

Куликов А.А., Иванова И.В., Дюкова И.Н. Энергия давления индивидуальной жидкой частицы // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 252. С. 278–288. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.278-288

Проанализированы виды энергий, которыми обладает элементарная индивидуальная частица (ЭИЧ) в объёме жидкости, находящаяся под давлением p . Установлено, что помимо внутренней, кинетической и потенциальной (в поле гравитационных сил) энергий, ЭИЧ обладает ещё одним дополнительным видом энергии. Причем, чем глубже ЭИЧ расположена в покоящейся жидкости, то есть чем больше гидростатическое давление, которое равно абсолютному давлению p этой ЭИЧ, тем большая работа может быть совершена при её подъёме, а значит, тем большей энергией ЭИЧ изначально обладает. Этот вид энергии, которым обладает любая индивидуальная частица внутри жидкости, зависящий от абсолютного давления p , назван баропотенциальной энергией. Введение понятия

баропотенциальной энергии позволяет корректно и в удобной форме сформулировать первый закон термодинамики для открытых термодинамических систем.

Ключевые слова: энергия, элементарная индивидуальная частица, гидростатическое давление, баропотенциальная энергия, открытая термодинамическая система, первый закон термодинамики.

Kulikov A.A., Ivanova I.V., Dyukova I.N. The pressure energy of an individual liquid particle. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 252, pp. 278–288 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.278-288

The types of energies possessed by an elementary individual particle (EIP) in a volume of liquid under pressure are analyzed. It has been established that in addition to internal, kinetic and potential energy (in the field of gravitational forces), EIP has another additional type of energy. Moreover, the deeper the EIP is located in a resting liquid, that is, the greater the hydrostatic pressure, which is equal to the absolute pressure p of this EIP, the more work can be done when it rises, which means the more energy the EIP initially possesses. This type of energy possessed by any individual particle inside a liquid, depending on the absolute pressure p , is called baropotential energy. The introduction of the concept of baropotential energy makes it possible to formulate the first law of thermodynamics for open thermodynamic systems correctly and in a convenient form.

Ключевые слова: energy, elementary individual particle, hydrostatic pressure, baropotential energy, open thermodynamic system, the first law of thermodynamics.

КУЛИКОВ Александр Александрович – заведующий кафедрой промышленной энергетики Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук, доцент. ORCID: 0009-0009-6113-7397. SPIN-код: 7746-2999. AuthorID: 967857.

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

KULIKOV Aleksandr A. – PhD (Technical), Associate Professor, Head of the Department of Industrial Energy, St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0009-0009-6113-7397. SPIN-code: 7746-2999. Author ID: 967857.

194021. Institutsky per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: alalkulikov@mail.ru

ИВАНОВА Ирина Викторовна – доцент кафедры промышленной энергетики Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук, доцент. ORCID: 0009-0009-4068-6741. SPIN-код: 9424-7866. AuthorID: 955471.

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

IVANOVA Irena V. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Industrial Energy, St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0009-0009-4068-6741. SPIN-code: 9424-7866. Author ID: 955471.

194021. Institutsky per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: irenalta@mail.ru

ДЮКОВА Ирина Николаевна – старший преподаватель кафедры промышленной энергетики Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. ORCID: 0009-0007-3367-4916. SPIN-код: 1314-2594. AuthorID: 961143.

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

DYUKOVA Irina N. – Senior Lecturer of the Department of Industrial Energy, St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0009-0007-3367-4916. SPIN-code: 1314-2594. Author ID: 961143.

194021. Institutsky per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: i.n.dyukova@mail.ru

**Е.М. Царев, К.П. Рукомойников, И.С. Анисимов, Н.С. Анисимов,
И.Н. Багаутдинов, В.Е. Макаров**

СМЕННЫЕ МОДУЛЬНЫЕ РАБОЧИЕ ОРГАНЫ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Введение. С незапамятных времен и по сей день лесное хозяйство является одной из важнейших отраслей российской экономики [Оноприенко и др., 2017; Берлизев, Яценко, 2021]. Ее цели:

1. зондирование и таксация лесов: специалисты лесного хозяйства проводят исследования и собирают данные о лесных экосистемах, включая информацию о породах деревьев, возрасте, состоянии и других факторах, влияющих на рост и благосостояние лесов;
2. репродукция лесов: лесоводы работают над обеспечением устойчивого роста лесов путем посадки новых деревьев и создания благоприятных лесных условий для роста и развития;
3. профилактика и защита от пожаров, вредителей и болезней: работники лесного хозяйства отслеживают признаки возникновения пожаров, нашествия насекомых и вспышки болезней, принимают соответствующие меры для их предотвращения или контроля этих угроз;
4. регулирование лесопользования: органы управления лесами способствуют устойчивому лесопользованию и защите окружающей среды;
5. наблюдение и надзор за эксплуатацией лесных ресурсов: работники сферы лесного хозяйства следят за заготовкой древесины и прочей древесной и недревесной продукции без вреда к окружающей среде и без их истощаемости согласно Лесному кодексу Российской Федерации.

Основной и важнейшей задачей лесного хозяйства является организация рационального использования и сохранения лесов. В этом прослеживается тесная связь с лесной промышленностью [Медведев, Зырянов, 2022].

Лесозаготовительная промышленность – ключевой сектор лесного хозяйства, занимающийся заготовкой, вывозкой древесины, а также первичной и частичной переработкой круглого леса и утилизацией отходов.

Современная лесозаготовительная отрасль постоянно развивается. В настоящее время при заготовке и переработке древесины используют модульные объекты (машины), представляющие собой машины-конструкторы, служащие основой для другой техники. Чаще всего основой является трактор, к которому блочно крепят дополнительные технологические модули [Радванский, 2019].

Общая компоновка лесозаготовительных машин (ЛЗМ) базируется на принципах модульного построения, а именно на принципе двухмодульного проектирования [Валяжонков и др., 2012; Ворков, 2012; Демидов, 2016; Быковский и др., 2021]. Лесозаготовительная машина (ЛЗМ) состоит из тягача (энергетического модуля) и навесного оборудования (технологического модуля) [Валяжонков и др., 2012; Демидов, 2016]. Навесное оборудование современных лесозаготовительных машин включает манипуляторное оборудование (сам манипулятор) и рабочий орган для выполнения заданных операций. В зависимости от выполняемых операций различают следующие виды рабочих органов лесозаготовительных машин [Кондратюк, 2012]:

1. у форвардеров – клещевой захват;
2. у харвестеров – валочно-сучкорезно-раскряжевочная головка;
3. у сучкорезных машин – сучкорезная головка;
4. у валочно-пакетирующих машин – валочная головка.

Успех на рынке лесозаготовительных компаний определяется:

- использованием надежных и эффективных машин и оборудования [Памфилов и др., 2021]. Это относится как к энергетическому, так и к технологическому модулям;
- во-вторых, расширением ассортимента используемых технологических модулей.

Например, для защиты лесов от пожаров привлекаются специальные пожарные вспомогательные машины (колесных трех- и четырехосные гусеничные вездеходы, тракторы, траншеекопатели и фрезерные полосопрокладыватели). Вместо них возможно в этот период использовать для тушения пожаров саму лесозаготовительную технику со сменными технологическими модулями [Martin-Fernandez et al., 2002; Mitsopoulos et al., 2015; Smith et al., 2016; Lepoglavec et al., 2017; Viegas et al., 2022]. Этого можно достичь путем создания новых конструкций сменных рабочих органов лесозаготовительных машин, модульно устанавливаемых на них. Они смогут осуществлять такие операции, как возведение защитных полос или рвов вдоль пути распространения огня для его предотвращения. Данные меры создают противопожарные барьеры, позволяющие сдержать расширение очага пожара, и предотвращают его распространение на другие участки леса на ранних стадиях возгорания. Также они могут использоваться для возведения противопожарных опушек и создания временных или постоянных пожарных водоемов.

Известно техническое решение, включающее в себя раму, в нижней передней части которой установлены фрезы-рыхлители. За фрезами-рыхлителями жестко и параллельно между собой смонтированы два лемеха, формируя лоток для грунта. Следом установлен метатель. Для заглубления рыхлителя и лемеха в грунт служит гидроцилиндр, шарнирно установленный в передней верхней части рамы [Царев и др., 2022].

Другое инженерное решение заключается в следующем. Рама – это основа для установки на нее модулей, в ее задней части установлен рабочий орган. Это маховик, оснащенный фрезами-метателями и гидромотором, соединенный с рамой [Царев и др., 2023а].

Известно противопожарное устройство, состоящее из рамы и навесного оборудования. Это барабан фрезерного типа с ножами Г-образной формы, редуктор с приводным валом, гидравлические моторы с предохранительными устройствами, фрезы-метатели с направляющими кожухами. Опорная лыжа регулирует в вертикальной плоскости заглубление фрез-метателей в грунт [Малюков и др., 2018].

Рассмотренные выше решения достаточно просты и эффективны в работе. Эффективность проявляется в срезании и удалении корневой системы древесно-кустарниковой растительности и травяной дернины. Однако все они обладают общим существенным недостатком. Они являются прицепными и не могут устанавливаться на серийные лесозаготовительные машины типа харвестера и для работы требуют привлечения специальных пожарных машин.

Актуальность темы. Создание новых модульных рабочих органов с целью расширения технологических возможностей лесозаготовительных машин является приоритетным направлением в лесной отрасли. Это приводит к снижению стоимости работ при тушении пожаров путем сокращения использования дополнительных единиц специальных пожарных машин.

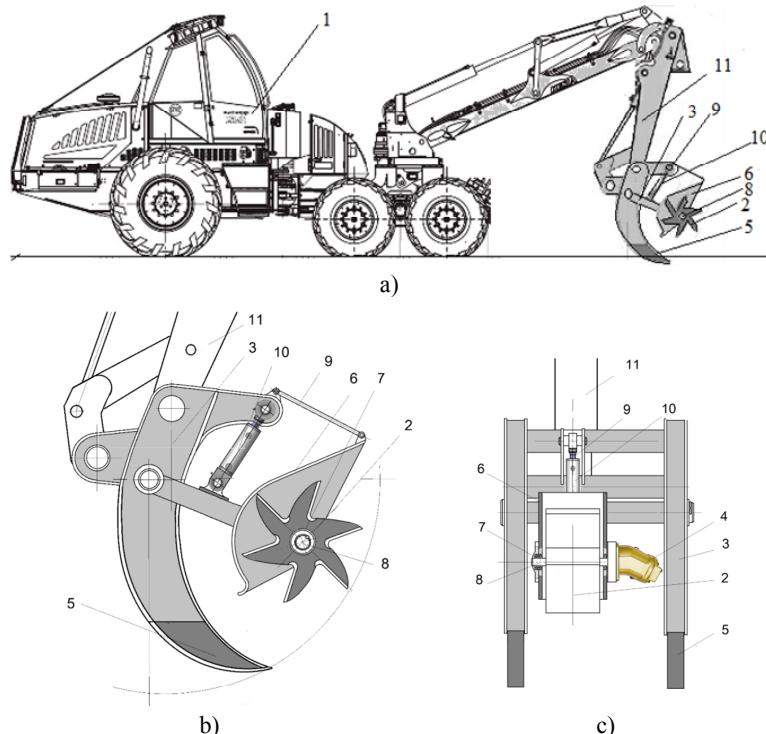
Целью исследований является разработка сменных модульных рабочих органов для лесозаготовительной машины для предупреждения и тушения лесных пожаров путем создания противопожарных барьеров, возведения противопожарных опушек и создания временных или постоянных пожарных водоемов.

Материалы и методы исследования. При работе над данной темой авторы использовали метод литературно-патентного поиска. Его результатом стали сменные модульные рабочие органы, расширяющие функциональные возможности лесозаготовительных и лесохозяйственных машин. Также авторы формировали информацию на основе поиска объектов исследования, в данном случае машин и устройств для предупреждения и тушения пожаров, проводили морфологический анализ структуры объектов исследования и синтез его элементов. На основе этого выявлялись их преимущества, а также основные недостатки. В дальнейшем намечаются перспективные направления научно-исследовательской деятельности в этой области с сохранением преимуществ рассмотренных объектов и устранением их недостатков.

Результаты исследования. Разработаны и предложены на рассмотрение сменные модульные рабочие органы к лесозаготовительным и лесохо-

зяйственным машинам для борьбы с лесными пожарами, а также для профилактики пожаров путем создания противопожарных барьеров, возведения противопожарных опушек и создания временных или постоянных пожарных водоемов [Щарев и др., 2023б].

Лесозаготовительная машина включает в себя энергетический модуль (силовую установку) 1 и технологический модуль (рис. 1а).



Rис. 1. Лесозаготовительная машина:

а – общий вид; б – сменный модульный рабочий орган для лесозаготовительной машины (вид сбоку); в – то же (вид слева):
 1 – силовая установка, 2 – рабочий орган, 3 – П-образная рама, 4 – гидромотор, 5 – упоры, 6 – направляющий кожух, 7 – подшипники, 8 – вал, 9 – тяга, 10 – гидроцилиндр рабочего органа, 11 – манипулятор

Fig. 1. Forestry machine: a – general view; b – replaceable modular working element for a logging machine (side view); c – the same (left view):
 1 – power unit, 2 – working body, 3 – U-shaped frame, 4 – hydraulic motor, 5 – stops, 6 – guide casing, 7 – bearings, 8 – shaft, 9 – rod, 10 – hydraulic cylinder of the working body, 11 – manipulator

Технологический модуль представлен манипулятором 11 и рабочим органом 2, предназначенным для тушения лесных пожаров путем создания противопожарных барьера, возведения противопожарных опушек и создания временных или постоянных пожарных водоемов.

Внутри рамы П-образной формы 3 установлен рабочий орган 2 (рис. 1б, с). Через гидравлический мотор 4 рабочий орган 2 соединен с силовой установкой 1. В нижней части рамы 3 установлены упоры 5. Рабочий орган 2 закрыт кожухом 6, выполняющим роль направляющей. Кожух 6 установлен на валу 8 в подшипниковых узлах 7. Верхняя часть кожуха 6 соединена с корпусом рамы 3 за счет тяги 9. Изменение положения в вертикальной плоскости рабочего органа 2 осуществляется гидроцилиндром 10. При помощи гидроманипулятора 11 и энергетического модуля 1 П-образная рама 3 меняет свое положение как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях.

Работа лесозаготовительной машины производится в описанной далее последовательности. Упоры 5 заглубляются в грунт за счет манипулятора 11. Для касания рабочим органом 2 грунта наклоняют П-образную раму 3. Внедрение рабочего органа 2 в грунт осуществляется совместной работой гидромотора 4 и гидроцилиндра 10. Происходит одновременное отделение слоя грунта и выброс его за пределы устройства. Дальность вылета грунта регулируется положением направляющего кожуха 6 посредством тяги 9. За счет поворота манипулятора 11 относительно оси машины можно производить и круговую обработку, но после обработки участка перед собой. После завершения работ на отведенном участке лесозаготовительная машина переходит на другой отведенный участок. Цикл повторяется.

Для гусеничных лесохозяйственных тракторов ЛХТ-100, предназначенных для лесовосстановительных мероприятий в лесополосах, возможны следующие конструктивные решения. С их помощью в основном выполняют такие работы, как: трелевка леса, защита леса от болезней, вредителей, транспортировка грузов на бездорожье, посадка и посев, уход за различными лесными культурами, фрезерная и плужная обработка земли, полосная расчистка территории от вырубок.

На базе трелевочных тракторов Беларус ТТР-401М осуществляют сбор и трелевку заготовленной древесины на выборочных рубках, рубках ухода и для складирования сортиментов в штабеля. Для колесных лесохозяйственных тракторов типа Беларус Л82.2 (используемых на работах по уходу за насаждениями и лесовозобновлению) предлагаются прицепные сменные рабочие органы для борьбы с лесными пожарами.

Энергетический модуль со сменным рабочим органом представлен на рис. 2.

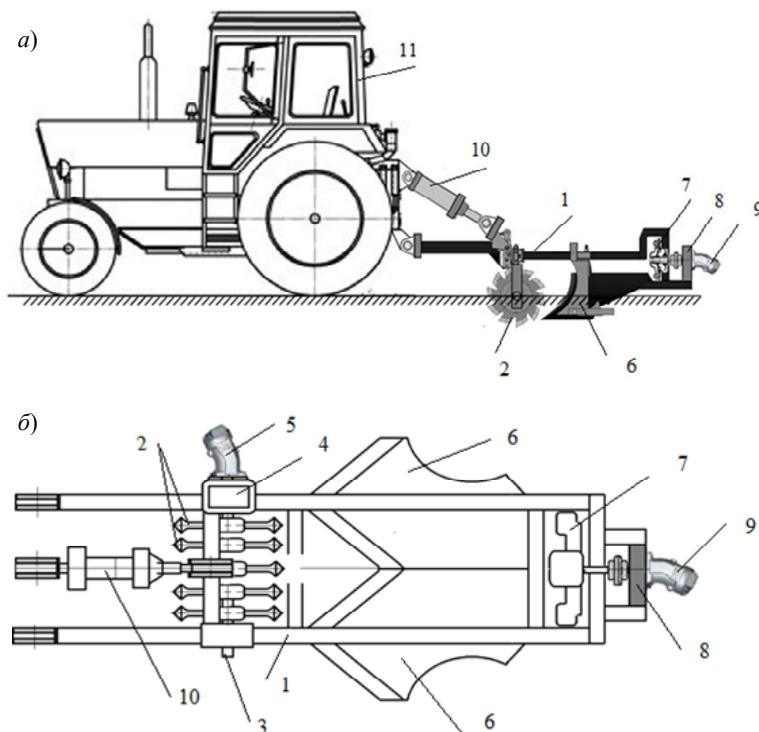


Рис. 2. Лесохозяйственный трактор со сменным рабочим органом:
а) Лесохозяйственный трактор; б) Сменный рабочий орган с фрезами-рыхлителями и метателем

1 – рама, 2 – рыхлители, 3 – вал, 4, 8 – редукторы, 5, 9 – гидромоторы, 6 – лемехи, 7 – метатель, 10 – гидроцилиндр; 11 – базовый трактор

Fig. 2. Forestry tractor with replaceable working element:
a) Forestry tractor; b) Replaceable working body with cutters-rippers and thrower
1 – frame, 2 – rippers, 3 – shaft, 4, 8 – gearboxes, 5, 9 – hydraulic motors, 6 – shares,
7 – thrower, 10 – hydraulic cylinder; 11 – base tractor

Сменный модуль рабочего органа (рис. 2,б) включает в себя раму 1. В нижней части рамы 1 на валу 3 установлены фрезы-рыхлители 2. Гидромотор 5 вращает фрезы-рыхлители 2 через редуктор 4. Параллельно друг другу и с жесткой фиксацией между собой за фрезами-рыхлителями 2 смонтированы два лемеха 6. За ними установлен метатель 7, вращающийся от гидромотора 9 через редуктор 8. Для заглубления фрез 2

с лемехами 6 в грунт на требуемую глубину служит гидроцилиндр 10. Гидроцилиндр 10 связывает модуль рабочего органа с энергетическим модулем 11.

Рассмотрим работу лесохозяйственной машины. Трактор 11 выходит на позицию. Заглубление фрез-рыхлителей 2 и лемехов 6 в грунт на требуемую глубину осуществляется опусканием рамы 1 за счет гидроцилиндра 10. Лесохозяйственный трактор начинает движение. Фрезы-рыхлители 2 перерезают корни кустарников и разрыхляют травянистую дернину. Лемехи 6 по образованному лотку для грунта формируют слой разрыхленной почвы. Выброс его в сторону огня или в сторону формирования минерализованной полосы осуществляется метателем 7.

Рассмотрим следующую конструкцию сменного модульного рабочего органа для лесохозяйственных тракторов.

Общий вид лесохозяйственного трактора со сменным рабочим органом для тушения пожаров и возведения насыпей представлен на рис. 3.

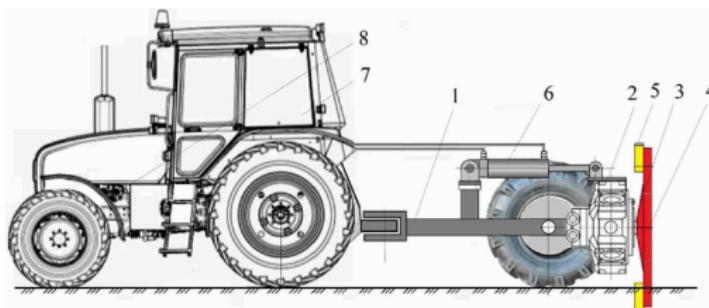


Рис. 3. Общий вид лесохозяйственного трактора со сменным рабочим органом:

- 1 – рама, 2 – гидромотор, 3 – вал, 4 – маховик, 5 – фрезы-метатели,
- 6 – гидроцилиндр, 7 – базовый трактор, 8 – насос

Fig. 3. General view of a forestry tractor with replaceable working body:

- 1 – frame, 2 – hydraulic motor, 3 – shaft, 4 – flywheel, 5 – cutters-throwers,
- 6 – hydraulic cylinder, 7 – base tractor, 8 – pump

В задней части рамы 1 (рис. 4) шарнирно установлен высокомоментный гидравлический мотор 2, на валу 3 которого установлен маховик 4, снабженный метательными фрезами 5. Для вертикального изменения положения маховика 4 служит гидроцилиндр 6, соединенный с рамой и корпусом гидромотора 2.

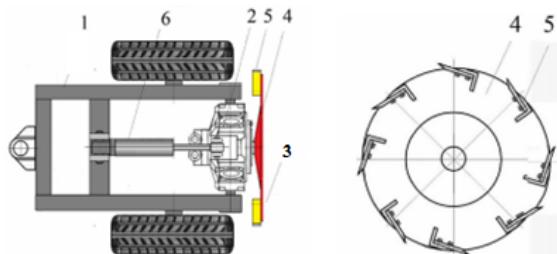


Рис. 5. Модульный рабочий орган лесохозяйственного трактора:

1 – рама, 2 – гидромотор, 3 – вал, 4 – маховик,
5 – фрезы-метатели, 6 – гидроцилиндр

Fig. 5. Modular working body of a forestry tractor:

1 – frame, 2 – hydraulic motor, 3 – shaft, 4 – flywheel,
5 – cutters-throwers, 6 – hydraulic cylinder

Принцип работы отражен на рис. 6.

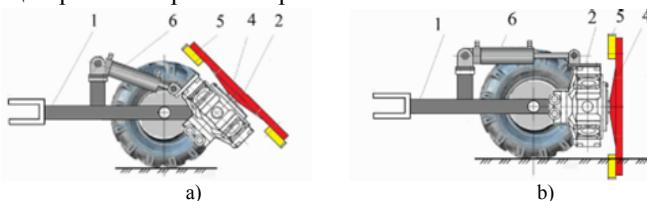


Рис. 6. Работа лесохозяйственного трактора:

а – исходное положение, б – рабочее положение

1 – рама, 2 – гидромотор, 4 – маховик,
5 – фрезы-метатели, 6 – гидроцилиндр

Fig. 6. Operation of forestry tractor:

a – initial position, b – working position

1 – frame, 2 – hydraulic motor, 4 – flywheel,
5 – cutters-throwers, 6 – hydraulic cylinder

За счет давления насоса 8 при запуске гидропривода трактора 1 от гидромотора 2 раскручивается маховик 4. Тем самым маховик накапливает энергию (рис. 6а). За счет гидроцилиндра 6 маховик 4 устанавливается вертикально. Фрезы-метатели 5 заглубляются в грунт. За счет поступательного движения трактора 7 и накопленной энергии маховиком 4 выбрасывается достаточный объем грунта, подаваемый в очаг пожара (рис. 6б).

Выводы. Лесозаготовительная отрасль делает мощный скачок в последнее время. Благодаря этому спецтехника для лесозаготовок все больше и больше развивается и совершенствуется. Разрабатываемые сменные модульные рабочие органы, как и новая техника, позволяют значительно облегчить труд рабочих, а также сэкономить время и деньги при выполнении новых операций.

В ходе работы по предотвращению и тушению низовых пожаров сменные модульные рабочие органы улучшают технологические возможности серийных лесозаготовительных машин, таких как харвестеры, трелевочные тракторы и лесохозяйственные тракторы.

Рассмотренные конструкции по природе своей универсальны. Одновременно они и грунтотематели, и полосопрокладыватели. Их производительность, как основной показатель любой машины, может варьироваться за счет скорости энергетического модуля.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Берлизев Р.Н., Яценко А.А. Факторы, определяющие перспективы развития отрасли лесного хозяйства России в современных условиях развития экономики // Экономика и бизнес: теория и практика. 2021. № 3-1 (73). С. 52–55.

Быковский М.А., Елисеев П.С., Голубев М.И. Модернизация многофункциональной лесозаготовительной машины // Лесной вестник. 2021. Т. 25, № 2. С. 116–119.

Валяжонков В.Д., Васякин Е.А., Иващенко В.Н. Общая компоновка лесосечных машин последних поколений // Вестник КрасГАУ. 2012. № 3 (66). С. 160–164.

Ворков А.А. Направление модернизации технологического оборудования лесозаготовительных машин // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2012. № 32. С. 9–13.

Демидов С.А. История создания и общая компоновка лесосечных машин последних поколений // Наука сегодня: фундаментальные и прикладные исследования: матер. межд. науч.-практ. конф. 2016. С. 26–29.

Кондратюк Д.В. Парк лесосечных машин и особенности их эксплуатации // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2012. № 32. С. 17–22.

Маликов С.В., Ступников Д.С., Шанин И.И. Обзор современных конструкций лесопожарных грунтотематов // Воронежский научно-технический вестник. 2018. Т. 3, № 3 (25). С. 37–50.

Медведев С.О., Зырянов М.А. К вопросу о роли лесного хозяйства в экономике лесной отрасли // Актуальные вопросы лесного хозяйства: материалы VI межд. молод. науч.-практ. конф. СПб., 2022. С. 33–36.

Оноприенко Ю.Г., Диулина И.Е., Бондарева В.В. Перспективные пути развития лесного хозяйства как отрасли российской экономики // Новая наука как ре-

зультат инновационного развития общества: сборник статей Межд. науч.-практ. конф. 2017. С. 32–34.

Памфилов Е.А., Капустин В.В., Пилюшина Г.А., Шевелева Е.Б. Повышение работоспособности рабочих органов и трибосистем технологического оборудования харвестеров // ИВУЗ. Лесной журнал. 2021. № 6. С. 135–149. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-135-149

Радванский И.А. Оценка современного состояния лесной отрасли Российской Федерации // Академическая публицистика. 2019. № 6. С. 147–154.

Царев Е.М., Анисимов С.Е., Рукомойников К.П., Волдаев М.Н., Попов Н.И., Анисимов Н.С., Анисимов И.С. Патент №2770406 РФ МПК A62 C3/02. Пожарный грунтомёт / заявитель и патентообладатель Поволжский государственный технологический университет. Заявл. 12.10.2021, опубл. 15.04.2022, бюлл. №11.

Царев Е.М., Анисимов С.Е., Рукомойников К.П., Порубов А.В. Патент №2787340 РФ МПК A62 C3/02. Пожарный грунтомет / заявитель и патентообладатель Поволжский государственный технологический университет. Заявл. 05.07.2022, опубл. 09.01.2023а, бюлл. №1.

Царев Е.М., Анисимов С.Е., Рукомойников К.П., Волдаев М.Н., Попов Н.И., Анисимов Н.С., Анисимов И.С., Ожиганов В.Н. Патент № 2774545 РФ МПК A62 C27/00. Пожарный грунтомет / заявитель и патентообладатель Поволжский государственный технологический университет. Заявл. 05.07.2022, опубл. 09.01.2023б, бюлл. №1.

Lepoglavec K., Žaček J., Nevečerel H., Seletković A., Pandur Z., Bačić M. Surface Accessibility with Spatial Analysis During Fire Extinguishing Procedures: Example on the Island of Vis // South-East European forestry. 2017. Vol. 8, iss. 2. P. 107–115.

Martin-Fernandez S., Martinez-Falero E., Perez-Gonzalez J.M. Optimization of the resources management in fighting wildfires // Environmental Management. 2002. T. 30, no. 3. P. 0352–0364.

Mitsopoulos I., Raftoyannis Y., Bakaloudis D. Climate change, Wildfires and Fir Forests in Greece: Perceptions of Forest Managers // South-East European forestry. 2015. Vol. 6, iss. 2. P. 143–157.

Smith J., Barfed L., Daschu S.M., Harris F.C. Highly parallel implementation of forest fire propagation models on the GPU // International Conference on High Performance Computing and Simulation. 2016. P. 917–924.

Viegas C., Chehreh B., Andrade J., Lourenço J. Tethered UAV with combined multi-rotor and water jet propulsion for forest fire fighting // Journal of Intelligent and Robotic Systems. 2022. T. 104, no. 2. P. 1–13.

References

Berlizev R.N., Yatsenko A.A. Factors that determine the prospects for the development of the forestry industry in Russia in modern conditions of economic development. *Economics and business: theory and practice*, 2021, no. 3-1 (73), pp. 52–55. (In Russ.)

- Bykovskiy M.A., Eliseev P.S., Golubev M.I. Modernization of a multifunctional forestry machine. *Lesnoy Vestnik*, 2021, T. 25, no. 2, pp. 116–119. (In Russ.)
- Demidov S.A. History of creation and general layout of cutting machines of the latest generations. *Science today: fundamental and applied research*: mater. of the intern. sci.-pract. conf. 2016, pp. 26–29. (In Russ.)
- Kondratyuk D.V. Park of logging machines and features of their operation. *Current problems of the forestry complex*, 2012, no. 32, pp. 17–22. (In Russ.)
- Lepoglavec K., Žaček J., Nevečerel H., Seletković A., Pandur Z., Bačić M. Surface Accessibility with Spatial Analysis During Fire Extinguishing Procedures: Example on the Island of Vis. *South-East European forestry*, 2017, vol. 8, iss. 2, pp. 107–115.
- Malyukov S.V., Stupnikov D.S., Shanin I.I. Review of modern designs of forest fire ground throwers. *Voronezh Scientific and Technical Bulletin*, 2018, T. 3, no. 3 (25), pp. 37–50. (In Russ.)
- Martin-Fernandez S., Martinez-Falero E., Perez-Gonzalez J.M. Optimization of the resource management in fighting wildfires. *Environmental Management*, 2002, T. 30, no. 3, pp. 0352–0364.
- Medvedev S.O., Zyryanov M.A. On the issue of the role of forestry in the economy of the forest industry. *Current issues of forestry*: mater. of the VI intern. youth sci.-pract. conf. St. Petersburg, 2022, pp. 33–36. (In Russ.)
- Mitsopoulos I., Raftoyannis Y., Bakaloudis D. Climate change, Wildfires and Fir Forests in Greece: Perceptions of Forest Managers. *South-East European forestry*, 2015, vol. 6, iss. 2, pp. 143–157.
- Onoprienko Yu.G., Diulina I.E., Bondareva V.V. Promising ways of development of forestry as a branch of the Russian economy. *New science as a result of innovative development of society*: collection of articles of the Intern. sci.-pract. conf. 2017, pp. 32–34. (In Russ.)
- Pamfilov E.A., Kapustin V.V., Pilyushina G.A., Sheveleva E.B. Improving the performance of working bodies and tribosystems of harvester technological equipment. *IVUZ. Forestry journal*, 2021, no. 6, pp. 135–149. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-135-149. (In Russ.)
- Radyanskiy I.A. Assessment of the current state of the forest industry of the Russian Federation. *Academic journalism*, 2019, no. 6, pp. 147–154. (In Russ.)
- Smith J., Barfed L., Dasclu S.M., Harris F.C. Highly parallel implementation of forest fire propagation models on the GPU. *International Conference on High Performance Computing and Simulation*, 2016, pp. 917–924.
- Tsarev E.M., Anisimov S.E., Rukomoinikov K.P., Voldaev M.N., Popov N.I., Anisimov N.S., Anisimov I.S. Patent No. 2770406 Russian Federation, IPC A62 C3/02. Fire ground thrower / applicant and patent holder Volga State University of Technology. Appl. 10/12/2021, publ. 04/15/2022, bull. no. 11. (In Russ.)
- Tsarev E.M., Anisimov S.E., Rukomoinikov K.P., Porubov A.V. Patent No. 2787340 Russian Federation, IPC A62 C3/02. Fire ground thrower / applicant and

patent holder Volga State Technological University. Appl. 07/05/2022, publ. 01/09/2023a, bull. no. 1. (In Russ.)

Tsarev E.M., Anisimov S.E., Rukomoinikov K.P., Voldaev M.N., Popov N.I., Anisimov N.S., Anisimov I.S., Ozhiganov V.N. Patent No. 2774545 Russian Federation, IPC A62 C27/00. Fire ground thrower / applicant and patent holder Volga State Technological University. Appl. 07/05/2022, publ. 01/09/2023b, bull. no. 1. (In Russ.)

Valyazhonkov V.D., Vasyakin E.A., Ivashchenko V.N. General layout of cutting machines of the latest generations. *Bulletin of KrasGAU*, 2012, no. 3 (66), pp. 160–164. (In Russ.)

Viegas C., Chehreh B., Andrade J., Lourenço J. Tethered UAV with combined multi-rotor and water jet propulsion for forest fire fighting. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2022, T. 104, no. 2, pp. 1–13.

Vorkov A.A. Direction of modernization of technological equipment of logging machines. *Current problems of the forestry complex*, 2012, no. 32, pp. 9–13. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 22.07.2024

**Царев Е.М., Рукомойников К.П., Анисимов И.С., Анисимов Н.С.,
Багаутдинов И.Н., Макаров В.Е.** Сменные модульные рабочие органы
лесозаготовительных машин // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической
академии. 2025. Вып. 252. С. 289–303. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.289-303

Лесное хозяйство является одной из самых важных отраслей экономики России. Основной и важной задачей лесного хозяйства является организация рационального использования и сохранения лесов. В этом прослеживается тесная связь с лесной промышленностью. В настоящее время при заготовке и переработке древесины используют модульные объекты (машины), представляющие собой машины-конструкторы, служащие основой для другой техники. В статье рассматриваются конструкции навесного оборудования и рабочих органов современных лесозаготовительных машин. Даются рекомендации по увеличению конкурентоспособности предприятий лесного комплекса путем расширения ассортимента выпускаемой продукции или путем создания новых рабочих органов лесозаготовительных машин с целью расширения их технологических возможностей. Создание новых модульных рабочих органов с целью расширения технологических возможностей лесозаготовительных машин является приоритетным направлением в лесной отрасли. Это приводит к снижению стоимости работ при тушении пожаров. При работе над данной темой авторы использовали литературно-патентный поиск. Его результатом стали сменные модульные рабочие органы, расширяющие функциональные возможности лесозаготовительных и лесохозяйственных машин. Разработаны и предложены на рассмотрение сменные модульные рабочие органы

к лесозаготовительным и лесохозяйственным машинам для борьбы с лесными пожарами, а также для профилактики пожаров. Разрабатываемые сменные модульные рабочие органы, как и новая техника, позволяют значительно облегчить труд рабочих, а также сэкономить время и деньги при выполнении новых операций. В результате выполнения работ при предотвращении и тушении низовых пожаров данные сменные модульные рабочие органы расширяют технологические возможности серийных лесозаготовительных машин на базе харвестеров, трелевочных и лесохозяйственных тракторов.

Ключевые слова: энергетический модуль, пожар, технологический модуль, лесное хозяйство, лесозаготовительная отрасль, навесное оборудование, харвестер, фрезы-метатели, лемех.

Tsarev E.M., Rukomoinikov K.P., Anisimov I.S., Anisimov N.S., Bagautdinov I.N., Makarov V.E. Replaceable modular working parts of forestry machines. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 252, pp. 289–303 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.289-303

Forestry is one of the most important sectors of the Russian economy. But the main and important task of forestry is to manage and conserve forests. This is closely linked to the forest industry. Currently, in the wood harvesting and processing used modular objects (machines), which are design machines that serve as a basis for other techniques. The article considers the design of the mounted equipment and working parts of modern logging machines. Recommendations are given to increase the competitiveness of forest complex enterprises, namely by expanding the range of products produced or by creating new working bodies of logging machines in order to expand their technological capabilities. The development of new modular working units to increase the technological capabilities of logging machines is a priority in the forest industry. This leads to a reduction in the cost of work when extinguishing fires. When working on this topic, the authors used literature-patent search. The search resulted in replacement modular work units, which extend the functional capabilities of logging and forestry machines. The modular replacement work units for logging and forestry machines for forest fire fighting, as well as for fire prevention have been developed and proposed for consideration. The modular work units that are being developed, as well as new technology, make it possible to significantly reduce the workload of workers and save time and money when performing new operations. As a result of the work in preventing and extinguishing ground fires, these replacement modular working bodies expand the technological capabilities of serial logging machines based on harvesters, treelovingand forestry tractors.

Keywords: energy module, fire, technological module, forestry, logging industry, attachments, harvester, cutter-throwers, ploughshare.

ЦАРЕВ Евгений Михайлович – профессор кафедры лесопромышленных и химических технологий Поволжского государственного технологического университета, доцент, доктор технических наук. SPIN-код: 3117-8576. ORCID: 0000-0001-5695-3028.

424000, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия. E-mail: carevEM@volgatech.net

TSAREV Evgeniy M. – DSc (Technical), Professor of the Department of Forestry and Chemical Technologies, Volga State Technological University. Associate Professor. SPIN-code: 3117-8576. ORCID: 0000-0001-5695-3028.

424000. Lenin sq. 3. Yoshkar-Ola. Russia. E-mail: carevEM@volgatech.net

РУКОМОЙНИКОВ Константин Павлович – профессор кафедры лесопромышленных и химических технологий Поволжского государственного технологического университета, доцент, доктор технических наук. SPIN-код: 9119-8261. ORCID: 0000-0002-9956-5081.

424000, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия. E-mail: rukomoynikovkp@volgatech.net

RUKOMOYNIKOV Konstantin P. – DSc (Technical), Professor of the Department of Forestry and Chemical Technologies, Volga State Technological University, Associate Professor. SPIN-code: 9119-8261. ORCID: 0000-0002-9956-5081.

424000. Lenin sq. 3. Yoshkar-Ola. Russia. E-mail: rukomoynikovkp@volgatech.net

АНИСИМОВ Илья Сергеевич – студент Поволжского государственного технологического университета. SPIN-код: 7951-9072. ORCID: 0000-0002-9528-8988.

424000, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия. E-mail: kukri-machete-00@mail.ru

ANISIMOV Ilya S. – Student, Volga State Technological University. SPIN-code: 7951-9072. ORCID: 0000-0002-9528-8988.

424000. Lenin sq. 3. Yoshkar-Ola. Russia. E-mail: kukri-machete-00@mail.ru

АНИСИМОВ Никита Сергеевич – студент Поволжского государственного технологического университета. SPIN-код: 8848-6902. ORCID: 0000-0001-8465-261X.

424000, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия. E-mail: nikita_anisimov2000@mail.ru

ANISIMOV Nikita S. – Student, Volga State Technological University. SPIN-code: 8848-6902. ORCID: 0000-0001-8465-261X.

424000. Lenin sq. 3. Yoshkar-Ola. Russia. E-mail: nikita_anisimov2000@mail.ru

БАГАУТДИНОВ Ильдар Нургаязович – доцент кафедры эксплуатации машин и оборудования Поволжского государственного технологического университета, кандидат технических наук. SPIN-код: 1688-5368. ORCID: 0000-0003-4695-5323.

424000, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия. E-mail: ooobin@mail.ru

BAGAUTDINOV Ildar N. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Machine and Equipment Operation, Volga State Technological University. SPIN-code: 1688-5368. ORCID: 0000-0003-4695-5323.

424000. Lenin sq. 3. Yoshkar-Ola. Russia. Email: ooobi@mail.ru

МАКАРОВ Владимир Евгеньевич – старший преподаватель кафедры транспортно-технологических машин Поволжского государственного технологического университета, кандидат технических наук. SPIN-код: 5076-2600. ORCID: 0000-0003-2564-0832.

424000, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия. E-mail: MakarovVE@volgatech.net

MAKAROV Vladimir E. – PhD (Technical), Senior Lecturer of the Department of Machine and Equipment Operation, Volga State Technological University. SPIN-code: 5076-2600. ORCID: 0000-0003-2564-0832.

424000. Lenin sq. 3. Yoshkar-Ola. Russia. Email: MakarovVE@volgatech.net

А.В. Трофимов, И.А. Зверев, Г.С. Тарадин, М.С. Аввакумов

**О МЕТОДИКЕ РАЗРАБОТКИ МАРШРУТА
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ
ЛЕСНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ**

Введение. Маршрут технологического процесса (ТП) определяет перечень и последовательность выполнения технологических операций. Формирование технологии – это решение сложной многовариантной задачи в условиях значительной неопределённости. Проектирование основывается главным образом на опыте и интуиции технолога, а также на очень небольшом числе формализованных рекомендаций. Содержание и последовательность работ определены стандартом Р 50-54-93-88 «Рекомендации. Классификация, разработка и применение технологических процессов» [Трофимов и др., 2024].

Задаче формирования общего плана обработки посвящено достаточно много исследований. Рекомендации часто носят разрозненный характер и требуют обобщения по видам продукции (деталь, сборочная единица, изделие в целом) для наиболее характерных условий производства лесного машиностроения.

Реализация технологий третьей и четвёртой научно-технических революций, применение современных систем автоматизации инженерных расчётов (CAD/CAE/CAM) также обуславливают необходимость систематизации требований общего характера.

Цель работы – формирование рекомендаций по разработке маршрута процесса создания изделий отраслевого машиностроения на основе стандартов ЕСТПП.

Материалы и методика исследования. Основой исследования послужили труды отечественных ученых в области проектирования технологических процессов машиностроения. В работе используются методы системного анализа, сбора и обработки информации.

Результаты исследования. Стадии проектирования ТП, установленные стандартом, представлены на схеме (рис. 1).

Из схемы следует, что формирование маршрута складывается из следующих этапов (рис. 2).



Рис. 1. Стадии проектирования ТП

Fig. 1. Stages of TP design

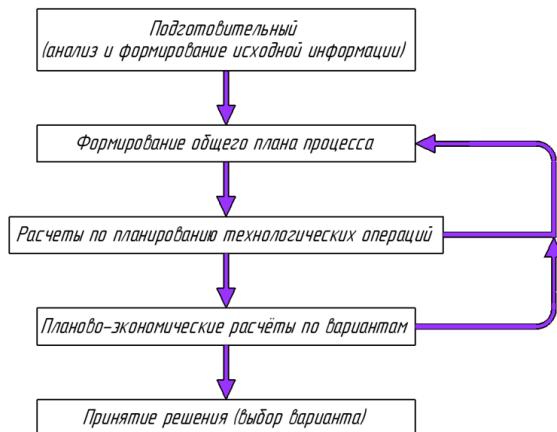
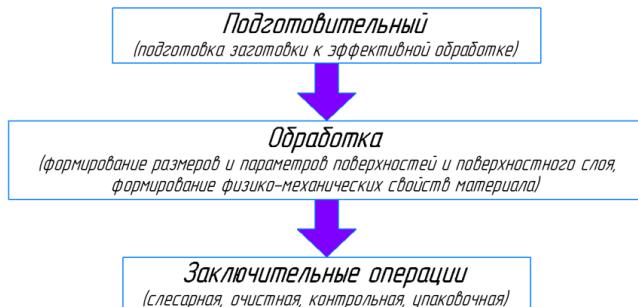


Рис. 2. Этапы проектирования маршрута ТП

Fig. 2. Stages of designing the TP route

Рассмотрим рекомендации по формированию маршрута процесса применительно к технологиям обработки резанием и сборке изделий.

Технологии обработки резанием. Для технологий обработки резанием формирование поверхностей детали и их параметров предусматривает три этапа (рис. 3).



Rис. 3. Этапы формирования поверхностей
Fig. 3. Stages of surface formation

На подготовительном этапе создаются условия для эффективного проведения операций обработки резанием. В зависимости от вида заготовки выполняются очистка поверхностей, разделение на отрезки мерной длины, правка, термическая обработка и другие действия.

В процессе трансформации заготовки решаются две группы задач – обеспечение геометрических параметров поверхностей и формирование физико-механических свойств материала с распределением по объёму изделия.

Планирование этапа предусматривает решение двух проблем. Требуется:

- для каждой формируемой поверхности установить необходимость реализации трёх стадий обработки – черновой, чистовой и отделочной;
- предварительно выбрать степень дифференциации обработки на (i) операций.

При разработке общей схемы этапа целесообразно придерживаться следующих рекомендаций.

- Технологические базы для последующих операций планировать в обработку в первую очередь.
- Последовательность операций реализовывать в порядке, обратном требованиям к точности параметров поверхности.
- Поверхности вспомогательного назначения предпочтительно формировать после чистовой обработки (резьба, отверстия, фаски, шлицы, канавки и др.).

- Открытые поверхности с риском повреждения (например, наружная резьба) формируют в конце этапа обработки.

- Проведение операций термического воздействия должно сопровождаться введением в план обработки дополнительных процедур, например, восстановления баз [Трофимов, Горбачева, 2015].

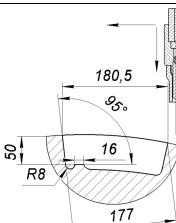
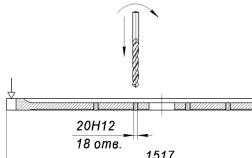
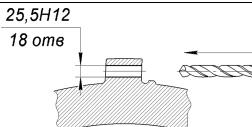
Пример сформированной с соблюдением указанных рекомендаций структуры технологического процесса изготовления пильного диска захватно-срезающего устройства валочно-пакетирующей машины представлен в табл.1 [Зверев и др., 2023].

Таблица 1

Маршрут изготовления детали «Пильный диск» The route of manufacturing the «Disc saw blade» component

№ операции	Наименование операций и их краткое содержание	Эскиз операции	Оборудование и инструмент
000	Заготовительная – Вырезать заготовку – Править заготовку – Объемная закалка на троостит со средним отпуском		Гидроабразивный станок; пресс; термопечь; закалочная ванна
005	Координатно-расточная – Сверлить технологическое отверстие по центру заготовки		Координатно-расточкой станок; корончатое сверло
010	Токарно-лобовая (2 установка) – Точить поверхность 1 – Подрезать торец 2 – Точить поверхность 3 – Расточить чисто отверстие 4 – Точить поверхность 5		Токарно-лобовой станок; резец прямой проходной; резец проходной упорный; резец расточной

Окончание табл. 1

№ операции	Наименование операций и их краткое содержание	Эскиз операции	Оборудование и инструмент
015	Гидроабразивная – Вырезать технологические выступы диска		Гидроабразивный станок
020	Сверлильная – Сверлить отверстия прижимной оси		Радиально-сверлильный станок; сверло спиральное
025	Горизонтально-расточная – Сверлить отверстия под режущие элементы		Горизонтально-расточкой станок; сверло спиральное
030	Слесарная		
035	Очистная		
040	Контрольно-измерительная		
045	Упаковочная		

Технологии сборки изделий. Применение рекомендаций единого стандарта по отношению к процессам сборки изделий имеет свои особенности по структуре и содержанию переходов.

Перечень и последовательность действий при формировании соединений и их параметров представлены на рис. 4.

Подготовительный этап реализуется, как правило, отдельно от основного. Часть вспомогательных процедур в мелко- и среднесерийном производстве включают в состав технологических операций по умолчанию (распаковка, промывка, продувка, протирка, осмотр и т. д.).

Технологию сборки изделия на основном этапе проектирования удобно представить в виде схемы, что существенно облегчает задачу разделения объекта на сборочные группы, разработку маршрута, планирование содержания операций [Трофимов и др., 2024].

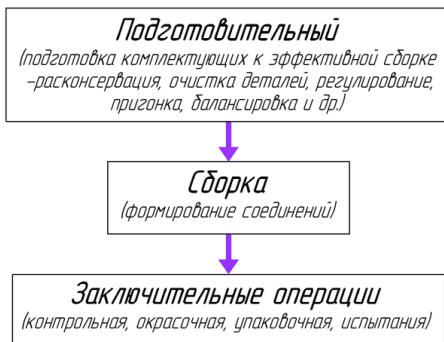


Рис. 4. Этапы формирования соединений
Fig. 4. The stages of formation of compounds

На рис. 5а и б представлены элемент чертежа и схема сборки узла «верхний вал коробки передач».

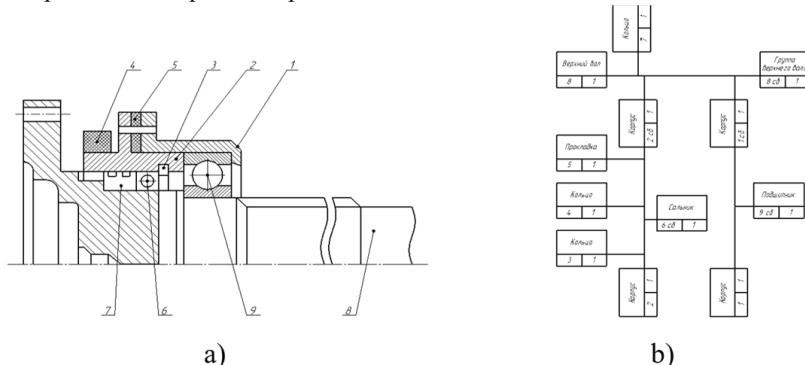


Рис. 5. Фрагмент чертежа (а) и схема сборки (б) узла «верхний вал коробки передач»

Fig. 5. A fragment of the drawing (a) and the assembly diagram (b) of the «upper shaft of the gearbox» assembly

Дифференциация объекта проводится с учётом следующих рекомендаций.

- Разделение объекта должно предусматривать наибольшее количество сборочных единиц при непоточной форме организации работ.
- Количество деталей и соединений в отдельной сборке должно быть небольшим, с учётом того, что излишняя дифференциация приводит к усложнению организации сборочных работ.

- Габариты и масса сборочных единиц должны соответствовать наличию и параметрам подъемно-транспортных средств.
- В процессе сборки и транспортировки сборочные единицы не рекомендуется разделять.
- Использование отдельных деталей в процессе сборки должно быть минимально необходимым.

Дополнительный эффект с точки зрения производительности и качества труда технолога достигается при использовании инструментальных средств CAD/CAM/CAE систем (например – программа «SOLIDWORKS», приложение Composer – см. рис. 6). Создание моделей сборки связано с необходимостью разработки твердотельных моделей отдельных элементов конструкции, её формирующих [Сорокин, Ануров, 2012; Вартанов, Чан Чунг Та, 2020].

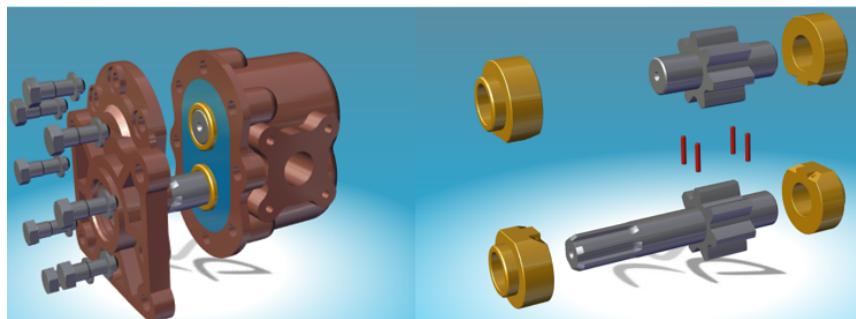


Рис. 6. Фрагменты пространственной модели шестерённого насоса НШ-32 с разнесёнными частями

Fig. 6. Fragments of the spatial model of the gear pump GP-32 with spaced parts

Обосновав состав работ (сборочных, регулировочных, пригоночных, подготовительных и контрольных), определяют содержание операций и переходов, выполняемых, как правило, на одном рабочем месте.

Стационарная, непоточная форма организации работ характерна для единичного и мелкосерийного производства отраслевого машиностроения и ремонта. В зависимости от решаемых задач возможно выделение отдельных операций (непоточная узловая сборка). *Например.*

- Сборка узлов гидропривода технологического оборудования требует выделения специализированного оборудования и оснастки, организации отдельных рабочих мест. Как следствие, планируется отдельная операция.

- Обеспечение соединения с натягом сопровождается применением габаритного оборудования, обслуживаемого квалифицированным персоналом, с организацией рабочего места. Необходима отдельная технологическая операция.
- Подготовка деталей к сборке требует наличия ёмкости (ванны), наполненной растворителем, с обеспечением специальных условий труда. Должно быть выделено и оборудовано рабочее место, т. е. запланирована отдельная операция.

Аналогичные примеры можно привести для действий, связанных с контролем параметров на специальном оборудовании.

Технологические операции обеспечения типовых соединений: подвижных и неподвижных; разборных и неразборных – и сборки различных видов передач (цепных, зубчатых и др.) подробно описаны в работах [Непомилуев, 2015; Осетров, Слащев, 2015; Вартанов, 2016; Зинченко, 2019; Тамаркин, Мельников, 2021].

В зависимости от структуры операций проводится выбор технологического и вспомогательного оборудования: стендов, элементов технологической оснастки, подъемно-транспортных средств и др.

Заключение.

1. Формирование маршрутов технологических процессов в машиностроении основано на рекомендациях стандарта и в значительной степени на интуиции и опыте технолога.

2. Повышение эффективности проектирования может быть обеспечено соблюдением рекомендаций, разработанных на основе функционального анализа структуры плана изготавления.

3. Эффективность проектирования процесса с точки зрения производительности и качества труда технолога может быть обеспечена применением инstrumentальных средств CAD/CAM/CAE систем (например – программа «SOLIDWORKS», приложение Composer).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Вартанов М.В. Методика обеспечения технологичности конструкций изделий машиностроения в процессе проектирования // Автоматизация и современные технологии. 2016. С. 36–37.

Вартанов М.В., Чан Чунг Та. Сборочное производство: проблемы и решения // СТАНКОИНСТРУМЕНТ. 2020. №2 (019). С. 22–29.

Зверев И.А., Трофимов А.В., Скобелкин Д.А. Анализ технологического процесса изготовления пильного диска захватно-срезающего устройства // Сборник статей по материалам НТК института технологических машин и транспорта леса по итогам НИР 2022 года. СПб.: СПбГЛТУ, 2023. С. 178–183.

Зинченко Д. Особенности и преимущества системы ADEM в области создания управляющих программ для станков с ЧПУ // СТАНКОИНСТРУМЕНТ. 2019. № 2 (015). С. 66–71.

Непомилуев В.В. Обеспечение устойчивости процесса сборки на основе индивидуального подбора деталей // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 11. С. 7–11.

Осетров В.Г., Слащев Е.С. Сборка в машиностроении, приборостроении. Теория, технология и организация: монография. Ижевск: Ижевский институт комплексного приборостроения, 2015. 327 с.

Сорокин М.Н., Ануров Ю.Н. Анализ собираемости изделий типа «вал-втулка» // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 1. С. 23–26.

Тамаркин М.А., Мельников А.С. Особенности обеспечения некоторых показателей точности изделия в технологических процессах сборки // Современные технологии сборки: материалы научно-технического семинара. Московский Политех, 2021. С. 6–16.

Трофимов А.В., Горбачёва Т.И. О месте термической и химико-термической обработки в технологическом процессе изготовления деталей лесных машин // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2015. Вып. 212. С. 167–175.

Трофимов А.В., Зверев И.А., Мужеев Е.А. Проектирование технологических процессов в машиностроении. Проектирование технологических процессов сборки изделий: учебное пособие. СПб.: СПбГЛТУ, 2024. 85 с.

References

Nepomiluyev V.V. Ensuring the stability of the assembly process based on individual selection of parts. *Assembly in mechanical engineering, instrumentation*, 2015, no. 11, pp. 7–11. (In Russ.)

Osetrov V.G., Slashchev E.S. Assembly in mechanical engineering. Instrumentation theory, technology and organization: monograph. Izhevsk: Izhevsk Institute of Integrated Instrument Engineering, 2015. 327 p. (In Russ.)

Sorokin M.N., Anurov Yu.N. Analysis of the assemblability of products of the «shaft-sleeve» type. *Assembly in mechanical engineering, instrumentation*, 2012, no. 1, pp. 23–26. (In Russ.)

Tamarkin M.A., Melnikov A.S. Features of ensuring some indicators of product accuracy in assembly processes. *Modern assembly technologies*: mater. of sci.-tech. seminar. Moscow Polytechnic University, 2021, pp. 6–16. (In Russ.)

Trofimov A.V., Gorbacheva T.I. On the place of thermal and chemical-thermal treatment in the technological process of manufacturing parts of forest machines. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2015, iss. 212, pp. 167–175. (In Russ.)

Trofimov A.V., Zverev I.A., Muzheev E.A. Design of technological processes in mechanical engineering. Designing technological processes for assembling products: textbook. St. Petersburg: SPbSFTU, 2024. 85 p. (In Russ.)

Vartanov M.V. Methodology for ensuring the manufacturability of mechanical engineering products in the design process. *Automation and modern technologies*, 2016, pp. 37–36. (In Russ.)

Vartanov M.V., Chan Chung Ta. Assembly production: problems and solutions. *STANKOINSTUMENT*, 2020, no. 2(019), pp. 22–29. (In Russ.)

Zinchenko D. Features and advantages of the ADEM system in the field of creating control programs for CNC machines. *STANKOINSTUMENT*, 2019, no. 2(015), pp. 66–71. (In Russ.)

Zverev I.A., Trofimov A.V., Skobelkin D.A. Analysis of the technological process of manufacturing a saw blade of a gripping and shearing device. *Collection of articles based on the materials of the NTC Institute of Technological Machines and Forest Transport based on the results of research in 2022*. St. Petersburg, 2023, pp. 178–183. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 24.03.2024

Трофимов А.В., Зверев И.А., Тарадин Г.С., Аввакумов М.С. О методике разработки маршрута технологического процесса изготовления изделий лесного машиностроения // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 252. С. 304–316. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.304-316

Рекомендации по проектированию технологических процессов машиностроительных производств часто носят разрозненный характер и требуют обобщения по видам продукции (деталь, сборочная единица, изделие в целом) для наиболее характерных условий отраслевого машиностроения. Применение современных систем автоматизации инженерных расчётов (CAD/CAE/CAM) также обуславливает необходимость формирования системных требований общего характера, что и определило цель и задачи представленной работы. В статье рассматриваются методические вопросы формирования маршрута технологических процессов изготовления деталей и сборки изделий в лесном машиностроении. Процесс создания технологии разделён на части, сформулированы задачи каждого этапа и наиболее рациональные способы их решения. Представлены принципы формирования структуры процесса, последовательности переходов и технологических

операций. Сформированы рекомендации по дифференциации создаваемого объекта как по поверхностям обработки, так и количеству сборочных единиц с учётом особенностей ремонтного и мелкосерийного производства. Материал иллюстрирован примерами проектирования процессов, сформированных с соблюдением указанных рекомендаций (технология изготовления пильного диска захватно-резающего устройства валочно-пакетирующей машины). Эффективность создания сборочных процессов может быть существенно повышена предварительной разработкой схем сборки. Рассмотрен вопрос повышения качества труда инженера-технолога применением современных CAD/CAM/CAE систем, обеспечивающих эффективную работу с базами данных и структурными элементами дерева технологий. Представлены варианты формирования схем сборки, иллюстрированных с применением программы «SOLIDWORKS», приложения Composer.

Ключевые слова: лесное машиностроение, технологический процесс, этапы проектирования, обработка резанием, сборка изделий, компьютерные технологии.

Trofimov A.V., Zverev I.A., Taradin G.S., Avvakumov M.S. About the methodology for developing the route of the technological process of manufacturing forest engineering products. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 252, pp. 304–316 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.304-316

Recommendations on the design of technological processes in machine-building industries are often fragmented and require generalization by product type (part, assembly unit, product as a whole) for the most typical conditions of industrial engineering. The use of modern automation systems for engineering calculations (CAD/CAE/CAM) also necessitates the formation of general system requirements, which determined the purpose and objectives of the presented work. The article discusses the methodological issues of forming the route of technological processes for manufacturing parts and assembling products in forestry engineering. The process of technology creation is divided into parts, the tasks of each stage and the most rational ways to solve them are formulated. The principles of forming the structure of the process, the sequence of transitions and technological operations are presented. Recommendations have been formed on the differentiation of the created object both by processing surfaces and the number of assembly units, taking into account the peculiarities of repair and small-scale production. The material is illustrated with examples of the design of processes formed in compliance with these recommendations (manufacturing technology of the saw blade of the gripping and shearing device of the felling machine). The efficiency of creating assembly processes can be significantly increased by the preliminary development of assembly schemes. The issue of improving the quality of work of a process engineer using modern

CAD/CAM/CAE systems that ensure effective work with databases and structural elements of the technology tree is considered. The variants of the formation of assembly diagrams illustrated using the program «SOLIDWORKS», the Composer application are presented.

К e y w o r d s : forestry engineering, technological process, design stages, cutting, product assembly, computer technology.

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: aggregat9@yandex.ru

TROFIMOV Alexander V. – PhD (Technical), Associate Professor of Forestry Engineering, Service and Repair Department, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 8933-0230.

194021. Institutsky per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: aggregat9@yandex.ru

ЗВЕРЕВ Игорь Андреевич – ассистент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. 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. – Assistant of Forestry Engineering, Service and Repair Department, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 1126-2121. ORCID: 0000-0002-8163-7489.

194021. Institutsky per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: igorzv1997@gmail.com

ТАРАДИН Григорий Сергеевич – доцент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 5247-6595.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: grisha190@mail.ru

TARADIN Grigory S. – PhD (Technical), Associate Professor of Forestry Engineering, Service and Repair Department, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 5247-6595.

194021. Institutsky per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: grisha190@mail.ru

АВВАКУМОВ Максим Сергеевич – магистрант, учебный мастер кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

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

AVVAKUMOV Maksim S. – Master's degree student, Educational Master of Forestry Engineering, Service and Repair Department, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institutsky per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: apxumakc@mail.ru

**Н.С. Королько, Ф.В. Свойкин, Г.Э. Рего, А.С. Королько, К.В. Россихин,
В.И. Кретинин**

ОПТИМАЛЬНАЯ СХЕМА РАЗРАБОТКИ ЛЕСОСЕКИ КАНАТНОЙ ТРЕЛЕВОЧНОЙ УСТАНОВКОЙ

Введение. В условиях затрудненности или невозможности применения традиционных решений для разработки лесосек в РФ в настоящее время по ряду причин [Кацадзе и др., 2022] альтернативные способы освоения лесных массивов [Свойкин и др., 2023; Svoikin et al., 2023; Svoikin et al., 2024a; Svoikin et al., 2024b] могут рассматриваться как один из способов стабилизации объемов заготовки древесины на таких территориях [Svoikin et al., 2024b].

В то же время неукоснительно реализуются цифровизация и диджитализация лесной промышленности в части вступления в силу с 1 января 2025 г. Федеральной государственной информационной системы лесного комплекса (ФГИС ЛК) – цифровой платформы, объединяющей в себе десятки государственных услуг в сфере лесных отношений. Трелевка, как основная технологическая операция, также подвергается цифровой трансформации. Подведены промежуточные итоги тестирования системы мониторинга лесной техники (в том числе для трелевки древесины) «ЭРА-ГЛОНАСС» для передачи во ФГИС Лесного комплекса информации о передвижении лесовозной, лесозаготовительной, а также лесопожарной и иной техники. Пилотный проект, проходящий в Архангельской и Ульяновской областях, организован Рослесхозом совместно с Минпромторгом России и акционерным обществом «ГЛОНАСС». В результате эксперимента были получены сведения об устойчивой передаче данных из «ЭРА-ГЛОНАСС» во ФГИС ЛК, т. е. интеграция систем успешно реализуется. После отработки механизмов интеграции данных о передвижении лесозаготовительной и иной техники в двух регионах РФ полученный опыт будет транслироваться по всей стране (ФГИС ЛК – национальная система). Следующим этапом является оснащение лесной техники датчиками, что позволит повысить прозрачность заготовки древесины на всех этапах.

Уже сформирован научный задел по применению канатных трелевочных установок новой конструкции в современных актуальных

природно-производственных условиях арендной базы лесозаготовителя РФ [Кацадзе и др., 2020; Svoikin et al., 2020; Svoikin et al., 2024c; Svoikin et al., 2024d].

В частном случае задача построения маршрута канатной дороги является построением схемы разработки лесосеки и технологической задачей. В РФ технологическая карта является основным общепринятым разрешительным документом, регламентирующим работу лесозаготовителя на лесосеке¹. При составлении такого документа помимо описания непосредственно технологического процесса и применяемого оборудования особое внимание уделяется лесоводственным требованиям, а именно сохранению подроста, семенных куртин и т. д.² Этот фактор существенно влияет на размещение погрузочных пунктов и волоков.

Цель работы. В целях создания оптимального маршрута необходимо максимально исключить неопределенность в расположении препятствий, что позволит применять иные, невероятностные математические методы решения [Джонс, 2011; Пантелеев, Летова, 2015]. Для решения данной задачи достаточно определить координаты в местной системе координат, что возможно сделать дистанционно на основании материалов космоснимков.

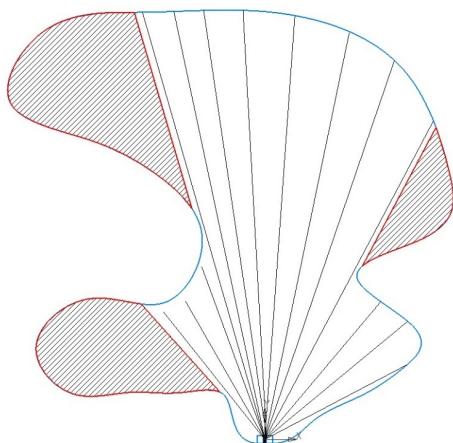
Еще одной проблемой, которую необходимо решать, помимо поиска минимального покрывающего дерева является минимизация числа поворотных опор, которые требуется поставить для осуществления транспортировки. В таком виде эта задача похожа на задачу поиска непересекающихся путей с минимальным общим числом отрезков [Rego, Voronov, 2020; Svoikin et al., 2024a]. Важным отличием нашей задачи от классической постановки является ограничение на длину отрезков, которое задается через максимально допустимое расстояние между двумя поворотными опорами.

Методика исследования. В случае применения классической канатной трелевочной установки волока имеют прямолинейную форму и

¹ Приказ Минприроды России №23 от 17.01.2022 «Об утверждении видов лесосечных работ, порядка и последовательности их выполнения, формы технологической карты лесосечных работ, формы акта заключительного осмотра лесосеки и порядка заключительного осмотра лесосеки»

² Приказ Минприроды России №993 от 01.12.2020 «Об утверждении Правил заготовки древесины и особенностей заготовки древесины в лесничествах, указанных в статье 23 Лесного кодекса Российской Федерации (с изменениями на 17 октября 2022 года)»

используется только веерная схема разработки лесосеки, что исключает выполнение выборочных рубок и работу на участках сложной формы, поскольку некоторые зоны остаются недоступными. Веерная схема разработки лесосеки сложной формы смоделирована и приведена на рис. 1.



Rис. 1. Веерная схема разработки лесосеки сложной формы

*Fig. 1. A fan scheme for the development
of a complex-shaped cutting area*

В случае применения разработанной авторами канатной трелёвочной установки новой конструкции с поворотом трассы в плане возникает необходимость проектирования волоков иной трассировки, в том числе выбора расположения и формы волоков с учётом равномерного захвата и разработки всей площади лесосеки и обхода возникающих препятствий. При этом монтаж промежуточных и поворотных опор общепринято является высокозатратной операцией. Для канатной трелёвки данная монтажная операция в разы превышает разницу в стоимости перемещения по прямой и поворота колёсной техники. Таким образом, расположение поворотных точек должно обеспечивать минимальное их число и минимальное число перестановок. Определение места расположение волока может основываться на экспертном заключении специалиста (лица, принимающего решение), осуществляющего проектирование, однако ввиду большого количества вариантов данный метод может сильно отличаться от оптимального. Данная задача похожа на задачу поиска минимального

покрывающего дерева непересекающимися путями [Rego et al., 2021]. При этом каждый путь строится независимо, минимизируется общее число поворотных опор. При составлении схемы разработки лесосеки всегда известны её внешние границы с установленной Правилами отвода и таксации лесосек точностью. Очевидно, что при любом способе отвода лесосек (круговые площадки, сплошной/ленточный перечёт) координаты каждого дерева не устанавливаются. В таком случае задача является наиболее сложной, поскольку из таксационных характеристик о запасе, среднем объеме хлыста по породе и полноте можно вычислить среднее расстояние между деревьями, при этом само их расположение остаётся неизвестным.

Формализуем постановку задачи с помощью математической нотации. Рассмотрим многоугольник A , внутри которого необходимо построить путь от начальной точки к множеству целевых точек, избегая препятствий и минимизируя общую длину пути и количество поворотных опор.

При этом зададим множество объектов:

- Границы области A зададим формулой (1) как множество последовательно соединенных вершин:

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}; \quad (1)$$

• Стартовая точка s (погрузочная площадка) расположена на границе или внутри области A ;

• Множество целевых точек зададим по формуле (2) и будем подразумевать, что они находятся внутри области A :

$$G = \{g_1, g_2, \dots, g_m\}; \quad (2)$$

• Множество препятствий обозначим как:

$$O = \{o_1, o_2, \dots, o_k\}. \quad (3)$$

Каждое препятствие o_i представлено как окружность с центром (x_i, y_i) и радиусом r_i . Искомые пути между s и G не должны иметь общих точек с O ;

• Множество поворотных опор определим как:

$$B = \{b_1, b_2, \dots, b_{end}\}. \quad (4)$$

К множеству объектов необходимы к введению следующие ограничения:

1. Избегание препятствий. Каждый из искомых путей не пересекает ни одно препятствие, о принадлежит O ;

2. Пребывание внутри области A . Каждый из искомых путей полностью лежит внутри или на границе A ;

3. Максимальное расстояние между поворотными опорами не превышает некоторое заданное число d , определяемое по формуле (5):

$$d(b_k, b_{k+1}) \leq d_{\max}, \forall k = 1, \dots, end - 1; \quad (5)$$

4. Задано расчетное минимальное число поворотных опор, которое соответствует выражению:

$$|B|_{\min} = \frac{d(s, g_j)}{d_{\max}} \forall j; \quad (6)$$

5. Минимальный радиус кривизны $R(b_k)$ на поворотах не должен быть менее некоторого заданного числа по неравенству (7) и связан с углом поворота β_k и расстоянием между опорами:

$$R(b_k) \geq R_{\min} \forall k = 1, \dots, end - 1; \quad (7)$$

6. Попарные пересечения между путями недопустимы:

$$\forall i, j \in \{1, 2, \dots, m\}, i \neq j, P_{s, g_i} \cap P_{s, g_j} = \emptyset, \quad (8)$$

где P_{s, g_i} и P_{s, g_j} – траектории путей от s до g_i и от s до g_j соответственно.

В ходе расчетов необходимо минимизировать функцию стоимости (9) с учетом общего числа поворотных опор, угла поворота на опоре, общей длины пути, коэффициентов весов, отражающих важность соответствующих компонентов:

$$F(s, g_j) = k_1 \times (|B| - |B|_{\min}) + k_2 \times \sum_{k=1}^{|B|} \beta_k + k_3 \times L(s, g_j), \quad (9)$$

где $|B|$ – общее число поворотных опор; β_k – угол поворота на опоре b_k ; $L(s, g_j)$ – общая длина пути от s до g_j ; k_1, k_2, k_3 – коэффициенты весов, отражающие важность соответствующих компонентов, $k_1 + k_2 + k_3 = 1$, $k_1, k_2, k_3 \geq 0$.

Помимо этого, для алгоритма потребуются обозначения для изменения положения поворотных опор: δb_k – вектор изменения положения на опоре b_k , ограниченный максимальной величиной Δ_{\max} ; $\delta \beta_k$ – изменение угла поворота на опоре b_k , ограниченное β_{\max} .

В ходе дальнейших преобразований строится алгоритм оптимального маршрута канатной дороги при помощи графа видимости.

Для построения алгоритма необходимы следующие входные данные: стартовая точка (s), множество целевых точек (G), множество препятствий (O) (деревья и границы полигона).

При этом должны учитываться параметры модели, т. е. максимальное расстояние между опорами (d_{\max}), минимальный радиус кривизны (R_{\min}), максимальное изменение позиции опоры (Δ_{\max}), максимальный угол поворота (β_{\max}).

Для работы алгоритма требуется инициализировать множество узлов и добавить дискретизированные точки вокруг препятствия. Указано в выражении (10):

$$V \leftarrow \{s\} \cup G. \quad (10)$$

Инициализируется множество рёбер ($E \leftarrow \emptyset$), при этом необходимо добавить ребро (v_i, v_j) в E , чтобы получить граф видимости $G_{\text{visibility}} = (V, E)$. Также стоит инициализировать множество путей ($P \leftarrow \emptyset$) для нахождения кратчайшего пути (p_g) от s до g в графе $G_{\text{visibility}}$ и добавить p_g в P . Инициализируются текущее состояние путей $P_{\text{current}} \leftarrow P$ и лучшее состояние путей $P_{\text{best}} \leftarrow P$. Для генерации нового состояния P_{new} путём изменения одной опоры в случайному пути задается начальная температура T . Затем выбираются случайный путь $p \in P_{\text{current}}$ и случайная опора b_k в пути p . Изменяется позиция опоры согласно формуле (11):

$$b'_k = b_k + \delta b_k, \quad (11)$$

где $|\delta b_k| \leq \Delta_{\max}$.

Проверяется изменение угла поворота ($\delta\beta_k$), которое не превышает β_{\max} . Обновляется путь (p) с новой опорой (b'_k). Затем вычисляется изменение целевой функции (12):

$$\Delta = F(P_{\text{new}}) - F(P_{\text{current}}). \quad (12)$$

Исходя из этого, принимается новое состояние $P_{\text{current}} \leftarrow P_{\text{new}}$, обновляется лучшее состояние $P_{\text{best}} \leftarrow P_{\text{current}}$ и температура $T \leftarrow T \times \alpha$, где $0 < \alpha < 1$ – коэффициент охлаждения. Инициализируется общая стоимость $F \leftarrow 0$, после чего вычисляется стоимость пути $f(p)$ как сумма штрафов:

- за количество опор по формуле (13):

$$k_1 \times (n_{\text{supports}} - n_{\min}); \quad (13)$$

- за углы поворота по формуле (14):

$$k_2 \times \sum |\beta_i|; \quad (14)$$

- за длину пути по формуле (15):

$$k_3 \times L(p); \quad (15)$$

Следующим этапом стоит обновить общую стоимость по формуле (16):

$$F \leftarrow F + f(p) \quad (16)$$

и проверить, что длина сегмента $\leq d_{\max}$, а радиус кривизны $\geq R_{\min}$. После проверяется непересекаемость пути и препятствия, а также проводится проверка того, что пути p_i и p_j не пересекаются.

В результате данных действий, получатся оптимизированные непересекающиеся пути P_{best} от стартовой точки s к целевым точкам G .

К вышеуказанному алгоритму поиска маршрута требуется пояснение, которое представлено далее.

Такой инструмент, как граф видимости, широко используется в вычислительной геометрии и помогает найти все возможные пути, избегая препятствий, что является основой для последующей оптимизации целевой функции. Для оптимизации пути можно использовать метод отжига или другие алгоритмы оптимизации для нахождения глобального минимума функции стоимости. Начальная температура T выбирается исходя из начальной оценки стоимости. Коэффициент охлаждения α определяет скорость снижения температуры. Функция вероятности $y(T)$ обычно определяется по формуле (17):

$$y(T) = \exp\left(\frac{-\Delta F}{T}\right), \quad (17)$$

где ΔF – разница в стоимости между новым и текущим решениями.

Помимо этого, на каждой итерации оптимизации первоначального решения постоянно проверяется соблюдение ограничений по радиусу кривизны, максимальному расстоянию между опорами и отсутствию пересечений с препятствиями. При этом алгоритм поиска маршрута канатной дороги выполняется за конечное время и, если существует решение, обязательно его найдёт.

Для доказательства конечности работы алгоритма докажем конечность всех его составляющих. Множество узлов графа ($G_{visibility}$) конечно, так как оно состоит из:

1. Стартовой точки s ;
2. Конечное число целевых точек определяется по уравнению (18):

$$G = \{g_1, g_2, \dots, g_m\}; \quad (18)$$

3. Конечного числа дополнительных узлов, добавленных вокруг препятствий и внутри многоугольника;

4. Рёбра графа E также конечны, поскольку они соединяют конечное множество узлов.

В качестве вспомогательного в предложенном алгоритме можно использовать любой известный алгоритм поиска пути на графе. Например, это может быть алгоритм Дейкстры, который гарантированно завершается за конечное число шагов, так как граф конечен и не имеет отрицательных весов. В качестве второго вспомогательного алгоритма используется алгоритм имитации отжига. Максимальное число итераций k_{max} алгоритма задаётся заранее и является конечным.

На каждой итерации алгоритма имитации отжига производится конечное число операций: выбор случайного пути, модификация одной опоры, проверка выполнения ограничений и оценка нового состояния.

Таким образом, алгоритм отжига гарантированно завершится после k_{max} итераций. Из конечности всех составных частей следует, что алгоритм поиска маршрута канатной дороги является конечным.

Теперь докажем, что алгоритм поиска маршрута канатной дороги находит допустимое решение, при условии, что оно существует. Алгоритм строит граф, содержащий все возможные пути, удовлетворяющие основным геометрическим ограничениям (видимость, отсутствие пересечения с препятствиями). При поиске начальных путей алгоритм находит кратчайшие пути в этом графе, если они существуют. Оптимизация путей не ухудшает их достижимость, а лишь улучшает параметры в рамках заданных ограничений. Проверка на отсутствие пересечений между путями и повторная оптимизация обеспечивают допустимость найденных путей.

Таким образом, поскольку каждый этап алгоритма завершается за конечное число шагов и алгоритм исчерпывает все возможные комбинации в заданном конечном пространстве, он является конечным. Если существует решение (т. е. пути, удовлетворяющие всем ограничениям), алгоритм его найдёт в процессе перебора допустимых состояний. Следовательно, алгоритм гарантированно завершится и найдёт решение, если таковое существует.

Для оценки сложности алгоритма необходимо проанализировать каждый его этап и определить их временную и пространственную сложность в зависимости от входных данных, рассмотреть генерацию узлов графа, количество узлов графа (N), которое зависит от многих вариативных факторов:

- Общее число заданных точек (стартовая точка и целевые точки) вычисляется по формуле (19):

$$n_s = m + 1, \quad (19)$$

где m – число целевых точек;

- Точки вокруг препятствий. Если вокруг каждого из c препятствий добавляется z точек, то общее число таких точек определяется по формуле (20):

$$n_t = c \cdot z; \quad (20)$$

- Квадратная сетка внутри многоугольника. При использовании сетки размером $n_x \cdot n_y$ общее число точек соответствует значению из формулы (21):

$$n_g = n_x \cdot n_y; \quad (21)$$

На основании этих компонентов вычисляется общее число узлов графа:

$$N = n_s + n_t + n_g \quad (22)$$

и генерируются ребра графа. В худшем случае граф является полным, и число возможных рёбер E между узлами графа определяется как:

$$E = \frac{N \cdot (N - 1)}{2}. \quad (23)$$

Однако на практике число рёбер значительно меньше вследствие ограничений. Рёбра добавляются только между узлами, которые видимы друг для друга (нет препятствий между ними). Рёбра должны находиться внутри многоугольника.

Далее рассматривается сложность проверки пересечения рёбер с препятствиями. Для каждого потенциального ребра необходимо проверить, пересекает ли оно какие-либо препятствия. При наличии c препятствий время на проверку одного ребра составляет $O(c)$. Следовательно, общая временная сложность построения графа составляет:

$$O(E \cdot c) = O(N^2 \cdot c). \quad (24)$$

Пространственную сложность для хранения графа можно вычислить как:

$$O(N) \cdot O(E). \quad (25)$$

Для поиска кратчайших путей от стартовой точки к каждой из целевых точек используется алгоритм Дейкстры. Его временная сложность равна

$$O(E + N \log N). \quad (26)$$

Поскольку

$$E = O(N^2), \quad (27)$$

то времененная сложность этапа поиска начальных путей составляет:

$$O(N^2 + N \log N) = O(N^2). \quad (28)$$

Оптимизация путей выполняется методом имитации отжига, при этом все пути оптимизируются одновременно. Обозначим максимальное число итераций как I (параметр k_{\max} в алгоритме). В каждой итерации выполняются следующие действия:

- Выбор случайного пути и опоры для изменения $O(1)$;
- Время проверки ограничений пути пропорционально длине пути L ;
- Проверка пересечения с препятствиями:

$$O(C \cdot L) \quad (29)$$

(проверка каждого сегмента пути с препятствиями);

- Проверка пересечений с другими путями:

$$O(|P| \cdot L^2), \quad (30)$$

где $|P|$ – число путей.

Общая времененная сложность оптимизации равна:

$$O(I \cdot (1 + L + c \cdot L + |P| \cdot L^2)) = O(I \cdot (c \cdot L + |P| \cdot L^2)). \quad (31)$$

Поскольку c , $|P|$ и L обычно меньше N , основными факторами здесь являются число итераций I и квадратичная зависимость от длины пути L при проверке пересечений между путями.

Общая времененная сложность состоит из:

- построения графа:

$$(O(N^2 \cdot c)); \quad (32)$$

- поиска начальных путей:

$$(O(N^2 + N \log N)); \quad (33)$$

- оптимизации путей:

$$(O(I \cdot (c \cdot L + |P| \cdot L^2))). \quad (34)$$

Таким образом, общая времененная сложность равна:

$$O(N^2 \cdot c + N^2 + N \log N + I \cdot (c \cdot L + |P| \cdot L^2)).$$

Общая пространственная сложность состоит из объема памяти хранения графа, определяемого по формуле (35):

$$(O(N + E) = O(N^2)), \quad (35)$$

и объема хранения путей, определяемого по формуле (36):

$$(O(|P| \cdot L)). \quad (36)$$

Алгоритм имеет полиномиальную сложность, которая в худшем случае квадратично зависит от числа узлов и числа препятствий. На практике этап оптимизации может быть вычислительно затратным при большом числе итераций и длинных путях.

Геометрически поворотную опору мы будем представлять в виде точки на пути. Каждая опора b_k характеризуется углом поворота β_k , который может быть равен 0.

Результаты исследования. Для проверки работоспособности алгоритма был выбран опытный участок, находящийся в выделе 1 квартала 4 Приморского участкового лесничества Курортного лесничества Санкт-Петербурга, Северо-Западный федеральный округ, Российская Федерация. Обоснование выбора и отвода участка – наиболее типичные природно-производственные условия арендной базы предприятий для осуществления канатной трелёвки при помощи канатных трелевочных установок.

На основании оцифрованных материалов космоснимков и планшетов в инженерно-программном комплексе SOLIDWORKS premium 2021 sp1.0 получены координаты границ лесного участка, а также координаты препятствий (деревьев, не подлежащих вырубке). Фрагмент оцифрованных материалов космоснимков и планшетов приведен на рис. 2.

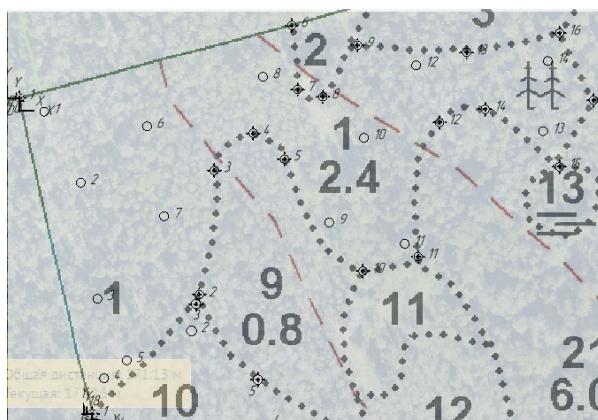


Рис. 2. Фрагмент оцифрованных материалов космоснимков и планшетов

Fig. 2. A fragment of digitized materials from satellite images and tablets

Непрямолинейная форма лесосеки, приведенной на рис. 2, является распространенной в отрасли и подразумевает нелинейный (неклассический) подход к трассировке волоков, отличный от существующих на практике подходов к параллельной трассировке волоков.

Для решения задачи исходя из критерия технологической целесообразности выбраны местоположение погрузочного пункта и конечные точки волоков. В результате применения алгоритма создана оптимальная схема расположения волоков, приведенная на рис. 3.

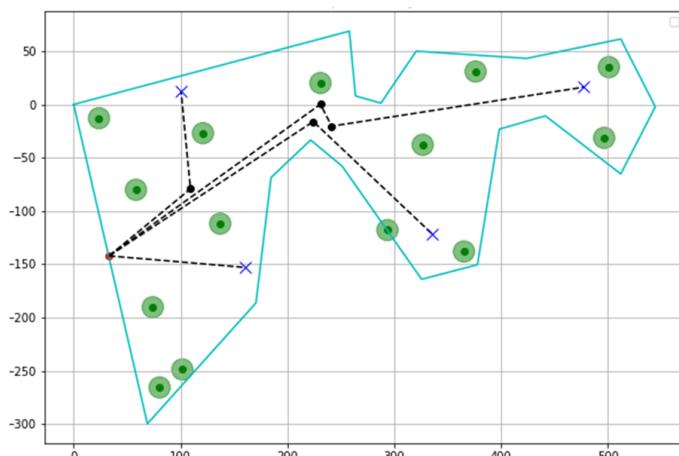


Рис. 3. Оптимальная схема разработки лесосеки
Fig. 3. The optimal scheme for the development of a cutting area

Из рис. 3 следует конкретный маршрут трассировки волоков, который может быть наложен на технологическую карту лицом, принимающим решение, и применен для разработки лесосеки подобной непрямолинейной формы и конфигурации в том числе в дальнейшем при работе с правоустанавливающим документом (вместо лесной декларации) в Федеральной государственной информационной системе лесного комплекса с 1 января 2025 г.

Заключение. В ходе исследования был разработан и испытан алгоритм поиска оптимальных маршрутов расположения трасс волоков канатной дороги, учитывающий технические ограничения канатных установок, такие как максимальное расстояние между опорами и

минимальный радиус кривизны. Алгоритм основан на построении графа видимости и использовании метода имитации отжига для оптимизации путей с учётом заданных ограничений. Проведённый эксперимент показал работоспособность алгоритма и его способность находить пути в реальных условиях.

В лесозаготовительной промышленности алгоритм может применяться для проектирования волоков при любой системе машин. Содействие лесоинженеру в проектировании лесосек позволит повысить производительность с учетом работы в ФГИС лесного комплекса с 1 января 2025 г., снизить количество несоответствий работ технологической карте. Также подобные алгоритмы могут найти свою применимость в робототехнике, например, для задачи планирования пути в условиях ограниченной видимости. Дальнейшая работа будет строиться в направлении программного поиска конечных точек волоков путём адаптации алгоритма для покрытия многоугольника минимальным корневым деревом с ограничением на длину узлов.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Джонс М.Т. Программирование искусственного интеллекта в приложениях / пер. с англ. Осипов А.И. М.: ДМК Пресс, 2011. 312 с.

Кацадзе В.А., Бирман А.Р., Свойкин Ф.В., Свойкин В.Ф., Угрюмов С.А., Королько Н.С., Шошин А.О. Результаты экспериментальных исследований использования КТУ для первичной вывозки древесины на переувлажненных лесосеках в Республике Беларусь // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 8. С. 32–36. DOI: 10.31044/1684-2561-2020-0-8-32-36

Кацадзе В.А., Свойкин Ф.В., Свойкин В.Ф., Угрюмов С.А. Обзор современных отечественных решений для транспортного освоения труднодоступных лесосек // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2022. № 3. С. 3–12. DOI: 10.31044/1684-2561-2022-0-3-3-12

Пантелейев А.В., Летова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах: учебное пособие. 4-е изд., испр. СПб.: Лань, 2015. 512 с.

Свойкин Ф.В., Свойкин В.Ф., Соколова В.А., Войнаш С.А., Арико С.Е. Применение канатно-рельсовых дорог для трелевки сортиментов // Лесной журнал. 2023. №5. С. 115–125. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-115-125

Rego G.E., Grigoreva O.I., Voronov R.V. Algorithms for calculating schemes of transport routes in a felling area // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. T. 806, no. 1. Art. no. 012025.

Rego G., Voronov R. On Algorithms for the Minimum Link Disjoint Paths Problem // 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE, 2020. P. 525–529.

Svoikin F., Sokolova V., Korolko N., Shoshin A. Constructive solutions to improve cable haulers for development of hard-to-reach cutting areas // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 193. Art. no. 01048. DOI:10.1051/e3sconf/202019301048

Svoikin F., Zhuk K., Svoikin V., Iniesta D.V., Ryapukhin A. Classification of Tree Species in the Process of Timber-Harvesting Operations Using Machine-Learning Methods // Inventions. 2023. Vol. 8, iss. 2. Art. no. 57. DOI: 10.3390/inventions8020057

Svoikin F.V., Zhuk K.D., Svoikin V.F., Kretinin V.I., Uglova L.A. Modern domestic solutions and software for Scandinavian logging in Russia under the new economic conditions // BIO Web of Conferences. 2024a. Vol. 84. Art. no. 01012. DOI:10.1051/bioconf/20248401012

Svoikin F.V., Svoikin V.F., Rossikhin K.V., Borozna A.A., Taraban M.V., Maksimov P.P., Kovtun M.A. Modernization of skidding and primary removal of wood in the Vologda Region through the use of relevant domestic solutions // E3S Web of Conferences. 2024b. Vol. 515. Art. no. 03022. DOI: 10.1051/e3sconf/202451503022

Svoikin F., Svoikin V., Borozna A., Taraban M., Shavelkin D. Modernization of cable skidding by finding the boundary conditions // E3S Web of Conferences. 2024c. Vol. 515. Art. no. 02017.

Svoikin F.V., Korolko N.S., Korolko A.S., Borozna A.A., Sorokin K.E. Construction of a cable yarding track by mathematical and software methods // E3S Web of Conferences. 2024d. Vol. 515. Art. no. 01013. DOI: 10.1051/e3sconf/202451501013

References

Jones M.T. Programming artificial intelligence in applications / transl. from English by Osipov A.I. Moscow: DMK Press, 2011. 312 p. (In Russ.)

Katsadze V.A., Birman A.R., Svoikin F.V., Svoikin V.F., Ugryumov S.A., Korolko N.S., Shoshin A.O. Results of experimental studies of the use of CTU for primary removal of wood from waterlogged cutting areas in the Republic of Belarus. *Repair. Recovery. Modernization*, 2020, no. 8, pp. 32–36. DOI: 10.31044/1684-2561-2020-0-8-32-36 (In Russ.)

Katsadze V.A., Svoikin F.V., Svoikin V.F., Ugryumov S.A. Review of modern domestic solutions for transport development of hard-to-reach cutting areas. *Repair. Recovery. Modernization*, 2022, no. 3, pp. 3–12. DOI: 10.31044/1684-2561-2022-0-3-3-12 (In Russ.)

Panteleev A.V., Letova T.A. Optimization methods in examples and problems: textbook. 4th ed., rev. St. Petersburg: Lan', 2015. 512 p. (In Russ.)

Rego G.E., Grigoreva O.I., Voronov R.V. Algorithms for calculating schemes of transport routes in a felling area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, T. 806, no. 1, art. no. 012025.

Rego G., Voronov R. On Algorithms for the Minimum Link Disjoint Paths Problem. 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE, 2020, pp. 525–529.

Svoikin F., Sokolova V., Korolko N., Shoshin A. Constructive solutions to improve cable haulers for development of hard-to-reach cutting areas. E3S Web of Conferences, 2020, vol. 193, art. no. 01048. DOI:10.1051/e3sconf/202019301048

Svoikin F.V., Svoikin V.F., Sokolova V.A., Voinash S.A., Arikko S.Ye. Application of Cable-Railways for Timber Skidding. Forestry Journal, 2023, no. 5, pp. 115–125. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-115-125 (In Russ.)

Svoikin F., Zhuk K., Svoikin V., Iniesta D.V., Ryapukhin A. Classification of Tree Species in the Process of Timber-Harvesting Operations Using Machine-Learning Methods. Inventions, 2023, vol. 8, iss. 2, art. no. 57. DOI: 10.3390/inventions8020057

Svoikin F.V., Zhuk K.D., Svoikin V.F., Kretinin V.I., Uglova L.A. Modern domestic solutions and software for Scandinavian logging in Russia under the new economic conditions. BIO Web of Conferences, 2024a, vol. 84, art. no. 01012. DOI:10.1051/bioconf/20248401012

Svoikin F.V., Svoikin V.F., Rossikhin K.V., Borozna A.A., Taraban M.V., Maksimov P.P., Kovtun M.A. Modernization of skidding and primary removal of wood in the Vologda Region through the use of relevant domestic solutions. E3S Web of Conferences, 2024b, vol. 515, art. no. 03022. DOI: 10.1051/e3sconf/202451503022

Svoikin F., Svoikin V., Borozna A., Taraban M., Shavelkin D. Modernization of cable skidding by finding the boundary conditions. E3S Web of Conferences, 2024c, vol. 515, art. no. 02017.

Svoikin F.V., Korolko N.S., Korolko A.S., Borozna A.A., Sorokin K.E. Construction of a cable yarding track by mathematical and software methods. E3S Web of Conferences, 2024d, vol. 515, art. no. 01013. DOI: 10.1051/e3sconf/202451501013

Материал поступил в редакцию 29.10.2024

Королько Н.С., Свойкин Ф.В., Рего Г.Э., Королько А.С., Россихин К.В., Кретинин В.И. Оптимальная схема разработки лесосеки канатной трелёвочной установкой // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 252. С. 314–334. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.317-334

В статье был предложен и апробирован алгоритм поиска оптимальных маршрутов расположения трасс волоков канатной дороги при разработке лесосеки канатными трелевочными установками, учитывающий технические ограничения канатных трелевочных установок, такие как максимальное расстояние между

опорами и минимальный радиус кривизны. Алгоритм основан на построении графа видимости и использовании метода имитации отжига для оптимизации путей с учётом заданных ограничений. Приведенный практический пример показал работоспособность алгоритма и его способность находить пути в реальных условиях. В лесозаготовительной промышленности алгоритм может применяться для проектирования волоков при любой системе лесных машин. Содействие лесоинженеру в проектировании лесосек позволит повысить производительность, снизить количество несоответствий работ технологической карте.

Ключевые слова: трелевка, оптимальный маршрут, канатные трелевочные установки, трассировка волоков, опора, граф видимости, алгоритм.

Korolko N.S., Svoikin F.V., Rego G.E., Korolko A.S., Rossikhin K.V., Kretinin V.I. Optimal scheme for developing a cutting area using a rope skidding installation. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 252, pp. 314–334 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.317-334

In the article, an algorithm was proposed and tested to find the optimal routes for the location of cable car trails when developing a cutting area with rope skidding installations, taking into account the technical limitations of rope skidding installations, such as the maximum distance between supports and the minimum radius of curvature. The algorithm is based on the construction of a visibility graph and the use of an annealing simulation method to optimize paths taking into account specified constraints. The given practical example showed the efficiency of the algorithm and its ability to find ways in real conditions. In the logging industry, the algorithm can be used to design hauls for any system of forest machines. Assistance to the forest engineer in the design of cutting areas will increase productivity, reduce the number of inconsistencies with the technological map.

Keywords: skidding, optimal route, rope skidding installations, tracing of drags, support, visibility graph, algorithm.

КОРОЛЬКО Николай Сергеевич – аспирант Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: kns89lta@mail.ru

KOROLKO Nikolay S. – PhD student, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: kns89lta@mail.ru

СВОЙКИН Федор Владимирович – доцент кафедры технологии лесозаготовительных производств Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук. SPIN-код: 8938-6910. ResearcherID: AAC-4074-2020. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8507-9584>.

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

SVOYKIN Fedor V. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Technologies of Logging Industries, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 8938-6910. ResearcherID: AAC-4074-2020. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8507-9584>.

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

РЕГО Григорий Эйнович – доцент кафедры прикладной математики и кибернетики Петрозаводского государственного университета, кандидат технических наук. SPIN-код: 1286-7507. ResearcherID: AFX-5848-2022. ORCID: 0000-0002-2235-8113.

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

REGO Grigorij E. – PhD (Technical), Associate Professor at the Department of Applied Mathematics and Cybernetics, Petrozavodsk State University. SPIN-code: 1286-7507. ResearcherID: AFX-5848-2022. ORCID: 0000-0002-2235-8113.

185910. Lenin av. 33. Petrozavodsk. Republic of Karelia. Russia. Email: regoGr@yandex.ru

КОРОЛЬКО Александр Сергеевич – инженер-технолог Федерального государственного унитарного предприятия «ГосНИИПП».

191167, наб. Обводного канала, д. 29, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: korolko2008@mail.ru

KOROLKO Alexander S. – Engineer-Technologist, Federal State Unitary enterprise “GosNIIPP”.

191167. Obvodny canal emb. 29. St. Petersburg. Russia. E-mail: korolko2008@mail.ru

РОССИХИН Кирилл Вадимович – магистрант Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

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

ROSSIKHIN Kirill V. – Master's Degree student, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: krossikhin@gmail.com

КРЕТИНИН Виктор Иванович – доцент кафедры автоматизации, метрологии и управления в технических системах Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук. SPIN-код: 4424-8046. ORCID: 0000-0003-0467-4080.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: KVI_1960@mail.ru

KRETININ Viktor I. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Automation, Metrology and Control in Technical Systems, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 4424-8046. ORCID: 0000-0003-0467-4080.

194021. Institutsky per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: KVI_1960@mail.ru

3. ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ, ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЕРЕВОПЕРЕРАБОТКИ

УДК 674.047.3

Н.Г. Иванов, А.М. Артеменков

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИСТАНЦИОННЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА И ТЕКУЩЕЙ ВЛАЖНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ В КАЧЕСТВЕ ГРАДИЕНТОМЕРА

Введение. В ГОСТ 19773-84 «Пиломатериалы хвойных и лиственных пород. Режимы сушки в камерах периодического действия» режим сушки характеризуется состоянием сушильного агента перед подачей его на высушенный материал. Оно изменяется по соответствующим ступеням в зависимости от переходной влажности древесины. Влажность пиломатериалов в процессе сушки должна проверяться периодическим взвешиванием контрольных образцов или дистанционными приборами. Применение систем автоматического регулирования регламентируется только для контроля и поддержания состояния сушильного агента в камере с использованием дистанционных психрометров.

Современные сушильные камеры для пиломатериалов в большинстве случаев оснащаются системами дистанционного контроля не только параметров агента сушки, но и влажности пиломатериалов. Знание влажности пиломатериалов в любой момент необходимо не только для принятия решения о завершении процесса при достижении требуемой конечной влажности, но и для проведения цикла сушки в автоматическом режиме в соответствии с заданными ступенями.

Системы дистанционного измерения влажности пиломатериалов в сушильных камерах периодического действия относятся к кондуктометрическим способам измерения влажности.

Рекомендации по установке электродов датчиков влажности излагаются в соответствующих руководствах по эксплуатации таких систем измерения влажности и в рекомендациях EDG [Welling, 1994].

Кондуктометрический способ измерения влажности пиломатериалов не лишён отрицательных сторон. Это локальное измерение влажности, зависимость от температуры и плотности древесины в точке замера, а также индивидуальных особенностей древесины, трудоёмкость установки датчиков в пиломатериалы.

Использование систем дистанционного контроля влажности даёт вполне адекватную информацию не только об изменении текущей влажности пиломатериалов, но и о скорости изменения влажности в процессе сушки.

Несмотря на развитие систем дистанционного контроля влажности пиломатериалов, актуальной задачей при проведении процесса сушки является контроль перепада влажности по толщине пиломатериалов, что, в свою очередь, позволяет контролировать развитие внутренних напряжений вследствие разности усушки различных слоёв пиломатериалов в процессе сушки.

Измерение поверхностной влажности пиломатериалов посредством дистанционной системы измерения влажности древесины, применяемой в сушильных камерах, не лишено некоторых технических затруднений, связанных с конструкцией датчика влажности и трудоёмкостью его установки на поверхности пиломатериалов.

Процесс сушки протекает тем быстрее, чем больше градиент влажности по толщине пиломатериалов, температура и избыточное давление паровоздушной смеси внутри самой древесины [Бывших, Дьяконов, 1962]. Значение перепада влажности и толщины пиломатериалов позволяет определить градиент влажности в любой момент времени, а значит вести за ним контроль, для чего в ЦНИИМОД был разработан специальный прибор дистанционного действия – градиентомер влажности ГВ-1 [Бывших, Дьяконов, 1962]. В приборе ГВ-1 применялось до десяти изолированных электродов, то есть до десяти датчиков влажности кондуктометрического типа. Сочетание нескольких таких датчиков, установленных в древесину на разную глубину, даёт возможность получить послойную влажность пиломатериалов непосредственным измерением и контролировать развитие внутренних напряжений вследствие разности усушки.

В большинстве конвективных сушильных камер периодического действия, эксплуатируемых на деревообрабатывающих предприятиях, для контроля относительной влажности воздуха используются датчики равновесной влажности древесины (датчик ЕМС), основанные на измерении электрического сопротивления целлюлозной пластинки или пластиинки из

шпона древесины лимба в зависимости от её влажности. Основное достоинство такого датчика заключается в создании возможности автоматизации процесса сушки с учётом фактической влажности пиломатериалов, которая измеряется кондуктометрическим способом.

Тот факт, что поверхностная влажность пиломатериалов достаточно быстро достигает устойчивой влажности при десорбции, которая в условиях применяемых режимов равна равновесной влажности древесины, позволит принимать результат измерения равновесной влажности древесины датчиком ЕМС за поверхностную влажность всех пиломатериалов, находящихся в сушильной камере, так как датчик ЕМС установлен в значительно турбулизированном потоке воздуха на входе в штабель, и поэтому диапазон изменения равновесной влажности древесины по высоте штабеля предполагается несущественным и во внимание не принимается.

В связи с развитием техники контроля и управления процессом сушки пиломатериалов существует реальная возможность использования штатных систем дистанционного измерения влажности древесины и параметров режима сушки не только для ведения процесса сушки по перепаду влажности, но и для оценки внутренних напряжений в пиломатериалах с использованием датчиков влажности древесины с изолированными электродами, установленными на середину толщины пиломатериалов.

Основываясь на приведённых данных, можно говорить о том, что, несмотря на некоторые недостатки гигрометрического способа определения относительной влажности воздуха с использованием датчиков ЕМС, сушильные камеры, оснащённые такими системами, широко распространены в России и будут эксплуатироваться ещё достаточно долго. Поэтому адаптация существующих режимов сушки, созданных под использование психрохрометрического метода определения параметров агента сушки, и разработка новых режимов под использование гигрометрического метода по датчикам ЕМС является актуальной задачей, решение которой позволит совершенствовать технику проведения процесса сушки пиломатериалов и повысить её эффективность.

Цель исследования заключалась в проверке гипотезы, что древесина контактирующих непосредственно с сушильным агентом слоёв достигает равновесной влажности древесины, соответствующей заданным параметрам режима.

Для достижения поставленной цели сформированы следующие задачи:

1. Выяснить, достигает ли образец древесины некоторой постоянной массы в процессе сушки его при температуре менее 100 °C;

2. Установить, является ли достигнутая при заданных параметрах агента сушки постоянная масса массой образца в абсолютно сухом состоянии;
3. Установить, является ли факт прекращения уменьшения массы образца древесины фактом достижения равновесной влажности древесины при соответствующих параметрах режима сушки;
4. Оценить время и скорость достижения равновесного состояния при различных температурах агента сушки.

Материалы, оборудование и приборы.

1. Климатическая камера СМ 5/100-250 ТВО для создания и поддержания заданного режима сушки;
2. Сушильный шкаф с автоматическим поддержанием температуры воздуха до 150 °C;
3. Электронные весы MW-150T с дискретностью 0,005 г;
4. Штангенциркуль с точностью измерения до 0,1 мм;
5. Бюкса алюминиевая с притёртой крышкой – 10 шт.;
6. Образцы древесины из берёзового шпона в виде прямоугольных пластинок размерами 22×43×1,5 мм, соответствующими размерам целлюлозной пластиинки С001573 датчика ЕМС и влажностью более 30%.

Методика исследования.

1. Образцы древесины из берёзового шпона в виде прямоугольных пластинок размерами 22×43×1,5 мм вымачиваются в чистой водопроводной воде в лабораторных условиях в течение нескольких суток до достижения ими абсолютной влажности более 30%;
2. Чистые пустые бюксы с крышками нумеруются и взвешиваются на электронных весах MW-150T;
3. Случайным образом отбираются 10 сырых образцов, с поверхности которых бумажным полотенцем удаляется излишняя влага, помещаются в 10 подготовленных бюксов по одному в каждую бюксу и закрываются крышками;
4. Каждая бюкса с образцом взвешивается на весах для определения начальной массы m_1 , г до начала процесса сушки;
5. Бюксы открываются, помещаются в климатическую камеру и сушатся при заданных температуре и относительной влажности воздуха до достижения постоянной массы. Взвешивание бюксов с образцами производится каждые 30 мин на электронных весах MW-150T. Перед взвешиванием, сразу после извлечения из климатической камеры, бюксы закрываются крышками;

6. После достижения постоянной массы при сушке в климатической камере образцы досушиваются в сушильном шкафу при температуре 103 ± 2 °С до постоянной массы, которая принимается за массу в абсолютно сухом состоянии, m_2 , г.

Режим сушки. Всего проведено три серии опытов при различной температуре и относительной влажности воздуха. В каждом опыте относительная влажность воздуха ϕ принимается такой, чтобы при заданной температуре равновесная влажность древесины соответствовала по диаграмме П.С. Серговского $W_p = 8\%$ [Расев, 2010]. Режимы по каждому опыту представлены в табл. 1.

Снятые с диаграммы значения относительной влажности воздуха ϕ уточнены расчётом по формулам И.В. Кречетова [1997]. Равновесной влажности древесины $W_p = 8\%$ соответствуют следующие расчётные значения относительной влажности воздуха ϕ' : при $t = 50$ °С $\phi' = 49,23\%$; при $t = 55$ °С $\phi' = 50,96\%$; при $t = 60$ °С $\phi' = 52,77\%$.

Таблица 1

Режимы сушки в климатической камере

Drying modes in the climate chamber

Параметр режима	Номер опыта		
	1	2	3
Температура воздуха t , °С	50	55	60
Относительная влажность воздуха ϕ , %	48	49	51
Равновесная влажность древесины W_p , %	8	8	8

Абсолютная Δ_ϕ и относительная δ погрешность определения относительной влажности воздуха ϕ по диаграмме П.С. Серговского по отношению к относительной влажности воздуха ϕ' , рассчитанной по формулам И.В. Кречетова, определяется по формулам (1) и (2) соответственно:

$$\Delta_\phi = |\phi - \phi'|, \quad (1)$$

$$\delta = \frac{\Delta_\phi}{\phi'} 100. \quad (2)$$

Результаты расчётов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты оценки точности определения относительной влажности воздуха при заданных температурах

The results of the accuracy assessment of determining the air relative humidity at specified temperatures

Параметр	Температура воздуха, °C		
	50	55	60
Относительная влажность воздуха по диаграмме П.С. Серговского φ , %	48	49	51
Относительная влажность воздуха по формуле И.В. Кречетова φ' , %	49,23	50,96	52,77
Абсолютная погрешность Δ_φ , %	1,23	1,96	1,77
Относительная погрешность δ , %	2,50	3,85	3,35

Для значений относительной влажности воздуха, принятых в эксперименте (п. 1, табл. 2), по формулам И.В. Кречетова [1997] рассчитаны соответствующие значения равновесной влажности древесины W'_p . Также, в соответствии с паспортом климатической камеры, точность поддержания относительной влажности воздуха в контрольной точке датчиком ИЛТВ-206/М1-02 составляет $\pm 5\%$. Следовательно, при заданных значениях φ действительное значение относительной влажности и соответствующее ему действительное значение равновесной влажности древесины W'_p будут находиться в следующих диапазонах:

- $t = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$, $\varphi = 48 \pm 5\%$, $W'_p = 7,83\%$: $\varphi = 43\dots53\%$, $W'_p = 7,14\dots8,52\%$;
- $t = 55 \text{ } ^\circ\text{C}$, $\varphi = 49 \pm 5\%$, $W'_p = 7,74\%$: $\varphi = 44\dots54\%$, $W'_p = 7,06\dots8,41\%$;
- $t = 60 \text{ } ^\circ\text{C}$, $\varphi = 51 \pm 5\%$, $W'_p = 7,77\%$: $\varphi = 46\dots56\%$, $W'_p = 7,10\dots8,43\%$.

Обработка результатов экспериментов. По полученным в результате проведения экспериментов массам образцов до и после высушивания рассчитаны абсолютная влажность образцов W_i , средняя влажность по десяти образцам \bar{W} , среднее квадратическое отклонение влажности образцов S и дисперсия S^2 .

Эксперимент проводился при трёх различных температурах 50, 55, 60 $^\circ\text{C}$ с одинаковой периодичностью взвешивания, и соответствующие дисперсии влажности S^2 различаются. Для подтверждения гипотезы, что

разброс значений влажности при различных температурах высушивания одинаковый, выполнена проверка однородности дисперсий по G -критерию Кохрена [Пижурин, Розенблит, 1984].

Объёмы каждой из трёх выборок одинаковы и равны десяти. По уровню значимости $q = 0,05$, числу степеней свободы $f = n - 1 = 10 - 1 = 9$ и количеству выборки $m = 3$ из таблицы значений G -критерия Кохрена [Пижурин, Розенблит, 1984] принимаем $G_{\text{табл}} = 0,62$.

Результаты исследования. Значения средней влажности образцов \bar{W} , среднего квадратического отклонения влажности S , дисперсий влажности S^2 и расчётного G -отношения $G_{\text{расч}}$ представлены в табл. 3.

Таблица 3

Влажность образцов в процессе сушки

Moisture content of the specimens during the drying process

Температура воздуха, °C	Параметры	Время, мин					
		0	30	60	90	120	150
50	\bar{W}	149,370	54,640	9,940	8,700	8,770	8,700
	$\pm S$	11,690	11,770	1,020	0,630	0,630	0,710
	S^2	136,547	138,501	1,035	0,391	0,402	0,509
55	\bar{W}	163,560	39,990	8,610	7,710	7,910	7,990
	$\pm S$	12,930	12,240	1,800	1,120	0,780	1,150
	S^2	167,091	149,859	3,223	1,263	0,606	1,315
60	\bar{W}	140,190	14,840	7,120	7,290	7,040	7,280
	$\pm S$	9,890	6,920	1,340	0,980	0,830	0,850
	S^2	97,870	47,928	1,797	0,961	0,689	0,715
$G_{\text{расч}}$		0,416	0,446	0,532	0,483	0,406	0,518
$G_{\text{табл}}$		0,62					

Поскольку для всех периодов эксперимента $G_{\text{расч}} < G_{\text{табл}} = 0,62$, гипотеза об одинаковом разбросе значений влажности образцов при различных температурах сушки принимается.

Из табл. 3 видно, что образцы достигают устойчивой влажности начиная с девяностою минуты процесса сушки в климатической камере. Определяя среднюю влажность образцов по последующим четырём замерам (от

90 до 180 мин) и соответствующее среднее квадратическое отклонение, получаем следующие результаты:

- при $t = 50^{\circ}\text{C}$: $W = (8,72 \pm 0,04)\% = (8,68...8,76)\%$;
- при $t = 55^{\circ}\text{C}$: $W = (7,90 \pm 0,13)\% = (7,77...8,03)\%$;
- при $t = 60^{\circ}\text{C}$: $W = (7,26 \pm 0,16)\% = (7,10...7,42)\%$.

Диапазоны равновесной влажности древесины, рассчитанные для условий эксперимента, и диапазоны влажности образцов древесины, рассчитанные по последним четырём замерам, представлены на рис. 1.

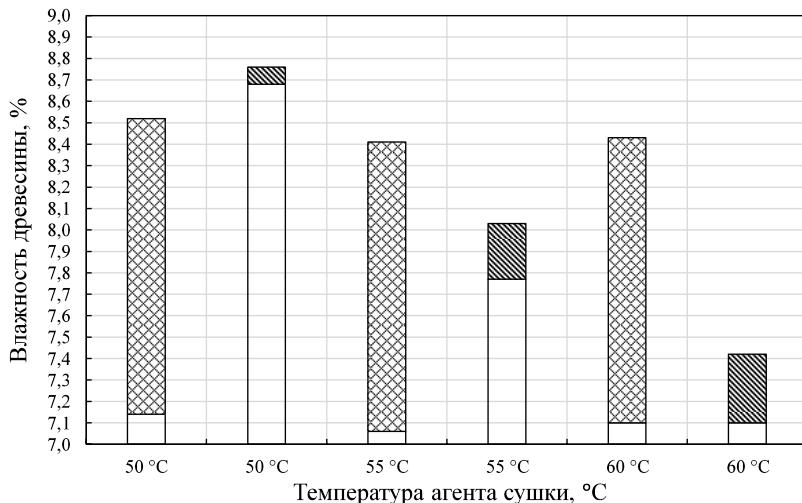


Рис. 1. Диапазоны равновесной влажности древесины

Fig. 1. The ranges of equilibrium moisture content of wood

При температуре 50°C средняя достигнутая влажность образцов оказалась больше ожидаемой равновесной влажности древесины, и диапазоны их изменения не пересекаются.

При температурах 55 и 60°C не только средняя влажность образцов, но и диапазон её изменения полностью лежат внутри диапазона изменения равновесной влажности древесины.

Абсолютное отклонение влажности образцов древесины от расчётного действительного значения равновесной влажности древесины и относительная погрешность составляют:

- при $t = 50^{\circ}\text{C}$: $\Delta W_p = |8,72 - 7,83| = 0,89\%$; $\delta = \frac{0,89}{7,83} \cdot 100 = 11,4\%$;

$$\bullet \text{ при } t = 55^{\circ}\text{C}: \Delta W_p = |7,90 - 7,74| = 0,16\%; \delta = \frac{0,16}{7,74} \cdot 100 = 2,1\%;$$

$$\bullet \text{ при } t = 60^{\circ}\text{C}: \Delta W_p = |7,26 - 7,77| = 0,51\%; \delta = \frac{0,51}{7,77} \cdot 100 = 6,6\%.$$

Выводы. По результатам проведённого эксперимента можно утверждать, что поставленные задачи решены успешно.

1. В процессе сушки при температурах менее 100°C образцы достигают некоторой постоянной массы, что также выражается в прекращении изменения влажности древесины в процессе сушки;

2. Достигнутая при заданных параметрах агента сушки постоянная масса не является массой образца в абсолютно сухом состоянии, так как при последующей досушке их в сушильном шкафу при температуре $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ масса образцов продолжала снижаться;

3. Факт прекращения уменьшения массы образца при сушке в климатической камере можно считать фактом достижения равновесной влажности древесины при соответствующих параметрах агента сушки;

4. При всех экспериментальных температурах образцы древесины достигали равновесия начиная с девяностой минуты процесса сушки.

По результатам проведённой экспериментальной работы можно рекомендовать следующее:

1. При проведении экспериментальных исследований с использованием климатического оборудования подбор значений относительной влажности воздуха по заданным температуре и равновесной влажности древесины следует выполнять по формулам И.В. Кречетова [1997];

2. Действительно представляется возможным использование в качестве градиентомера штатной системы определения относительной влажности воздуха по температуре и равновесной влажности древесины (ЕМС) в совокупности с дистанционной системой измерения текущей влажности пиломатериалов в современных сушильных камерах;

3. Дальнейшее исследование в этом направлении необходимо проводить в производственных условиях на действующих сушильных камерах.

Полученные результаты исследования позволили подтвердить гипотезу о возможности создания и использования методики измерения величины внутренних напряжений с помощью штатных систем контроля параметров агента сушки и влажности древесины в современных сушильных камерах.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Бывших М.Д., Дьяконов К.Ф. Контрольно-измерительные и регулирующие приборы камерной сушки древесины. Архангельск: Архангельское книжное издательство, 1962. 92 с.

Кречетов И.В. Сушка древесины. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Бриз, 1997. 496 с.

Пижурин А.А., Розенблит М.С. Исследование процессов деревообработки. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 232 с.

Rasev A.I. Сушка древесины: учебное пособие. СПб.: Лань, 2010. 416 с.

Welling J. EDG-Recommendation. Assessment of drying quality of timber: Pilot edition, 1994. 27 p.

References

Byvshikh M.D., Dyakonov K.F. Kontrol'no-izmeritel'nye i reguliruyushchie pribory kamernoy sushki drevesiny. Arkhangelsk: Arkhangelskoe knizhnoe izdatelstvo, 1962. 92 p. (In Russ.)

Krechetov I.V. Sushka drevesiny. Izd. 4-е, pererab. i dop. Moscow: Briz, 1997. 496 p. (In Russ.)

Pizhurin A.A., Rozenblit M.S. Issledovanie protsessov derevoobrabotki. Moscow: Lesn. prom-st', 1984. 232 p. (In Russ.)

Rasev A.I. Sushka drevesiny: uchebnoe posobie. St. Petersburg: Lan', 2010. 416 p. (In Russ.)

Welling J. EDG-Recommendation. Assessment of drying quality of timber: Pilot edition. 1994. 27 p.

Материал поступил в редакцию 25.04.2024

Иванов Н.Г., Артеменков А.М. О возможности использования дистанционных систем контроля параметров режима и текущей влажности древесины в качестве градиентомера // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 252. С. 335–345. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.335-345

В статье рассматривается возможность использования методики измерения величины внутренних напряжений в древесине в процессе сушки при помощи штатных систем контроля параметров агента сушки. Выдвигается гипотеза о возможности контроля влажности поверхности пиломатериалов датчиками равновесной влажности древесины. Приводятся результаты эксперимента для выявления скорости и точности достижения образцами значений равновесной влажности древесины.

Ключевые слова: обработка древесины, сушка древесины, системы контроля параметров сушки древесины.

Ivanov N.G., Artemenkov A.M. On the possibility of using remote control systems for the parameters of the regime and the current wood moisture content as a gradiometer. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 252, pp. 335–345 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.335-345

The article considers the possibility of using the method of measuring the value of internal stresses in wood during drying process using standard control systems for the parameters of the drying agent. The hypothesis about the possibility of controlling the moisture content of the surface of lumber by sensors of the equilibrium moisture content of wood is put forward. The results of the experiment are presented to identify the speed and accuracy of achieving the values of the equilibrium moisture content of wood by samples.

Keywords: wood processing, wood drying, wood drying parameters control systems.

ИВАНОВ Никита Геннадьевич – аспирант кафедры технологии материалов, конструкций и сооружений из древесины Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. ORCID: 0009-0003-0336-8986.

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

IVANOV Nikita G. – PhD Student, Department of Materials Technology, Designs and Constructions of Wood, St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0009-0003-0336-8986.

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

АРТЕМЕНКОВ Алексей Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии материалов, конструкций и сооружений из древесины Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. ORCID: 0000-0003-4281-8356. SPIN-код: 1146-8700. Web of Science Researcher ID: AAA-2039-2022. Scopus Author ID: 57209456120.

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

ARTEMENKOV Aleksey M. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Materials Technology, Designs and Constructions of Wood, St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0000-0003-4281-8356. SPIN-code: 1146-8700. Web of Science Researcher ID: AAA-2039-2022. Scopus Author ID: 57209456120.

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

4. ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ. БИОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 674-419.3

А.А. Леонович, Л.В. Замазий

ОСОБЕННОСТИ ДРЕВЕСНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В СВЯЗИ С НАРУШЕНИЕМ СПЛОШНОСТИ СИНТЕТИЧЕСКОЙ ПОЛИМЕРНОЙ ФАЗЫ

Введение. Поскольку в двухфазных древесных композиционных материалах древесина сама является природным композитом и состоит практически полностью из полимеров, то её в тексте условно будем обозначать «древесная фаза». Второе вещество, выступающее в качестве связующего (клей) и в конечном счёте состоящее из синтетического полимера, отнесём к «полимерной фазе». Такое упрощение в обозначении удобно для обсуждения экспериментального текста.

Древесные композиционные материалы по специфике содержания и по степени непрерывности полимерной фазы можно рассматривать как следующие подклассы композитов:

1. *Полимер-древесные композиционные материалы с полимерной фазой из термопластичных полимеров (полипропилен, полиэтилен и др.).* Массовая доля этих полимеров составляет 40...60 мас.%. Полимерная фаза при изготовлении материала экструзией оказывается нанесённой сплошным образом без нарушения непрерывности и в силу этого не содержит дефектов. Так изготавливают, в частности, декинг и сайдинг [Клесов, 2010].

2. *Материалы древесные композиционные на основе древесины в виде тонких листов.* Будущая полимерная фаза в виде олигомерных связующих веществ с промышленным обозначением «смола», в которую введён отвердитель, наносится сплошным самостоятельным слоем на подготовленную лущением или строганием древесину. В качестве связующего выступают фенолоформальдегидная смола (ФФС), карбамидоформальдегидная смола (КФС) и меламиноформальдегидная смола (МЛФС). При последующем горячем прессовании материала из смолы по реакциям по-

ликонденсации образуется соответствующий синтетический полимер. Расход связующего составляет порядка 30 мас.%. Так изготавливают фанеру и слоистый пластик [Чубинский и др., 2016].

3. *Древеснолитные материалы из измельчённой древесины.* Они состоят преимущественно из древесных частиц или волокон, а полимерная фаза также образуется из синтетических олигомерных смол с отвердителем (её определим как «клей») и составляет чаще всего 7...8 мас.%. Она наносится распылением и оседает на частицах в виде отдельных капель без создания сплошной фазы. В местах нарушения непрерывности возникают пробелы в микроучастках, определяемые как дефекты kleевых соединений. В процессе горячего прессования по реакциям конденсации олигомерная смола также переходит в синтетический сетчатый полимер. Так изготавливают древесно-стружечные плиты (ДСП) по ГОСТ 10632-2014, древесноволокнистые плиты (ДВП) по ГОСТ 4598-2018, OSB по ГОСТ 32567-2013 и MDF по ГОСТ 32274-2021. Наиболее многотоннажным представителем является ДСП.

Третий подкласс вырабатывается в основном для мебельной промышленности и строительства. По данным за 2023 г. общий выпуск ДСП и аналогичных плит из древесины или других одревесневших материалов в мире превышает выработку целлюлозы. В нашей стране он составляет 11603 тыс. усл. м³¹. Их технология характеризуется существенно низким расходом связующего (клея). Это обеспечивает получение материала с высокой удельной поверхностью и экономичностью продукции при условии соблюдения всех требований, изложенных в соответствующих стандартах, и высокой востребованностью многими потребляющими отраслями.

Особенности механизма образования указанных материалов связаны с дискретным нанесением синтетического олигомерного связующего (клея) – в технике используется термин «осмоление» – когда при воздушном распылении его на поверхность древесных частиц клей попадает в виде отдельных тонкодисперсных капель и по малосности расхода не полностью покрывает поверхности частиц древесной фазы. При последующем горячем прессовании древесные частицы соединяются между собой по нанесённым каплям клея, образуя в микрообластях контакта kleевые соединения, а при их отсутствии – дефекты. Особенность этого подкласса материалов состоит в том числе в отсутствии сплошности полимерной фазы. В силу многократного превышения размера древесных частиц над размерами капель клея и множественности капель, попадающих на отдельную частицу, происходит соедине-

¹ Рынок ДСП (древесно-стружечных плит) в России 2017-2024 гг. Цифры, тенденции, прогноз. URL: <https://tk-solutions.ru/russia-rynok-dsp>

ние древесных частиц в единый материал, несмотря на многократно прерывающуюся полимерную фазу. Анализируя особенности материалов третьего подкласса, нам следует проанализировать вероятные взаимодействия контактирующих частиц по множеству нанесённых на них капель. Для этого примем условные фрагменты в виде отдельных микрообластей контактов между частицами, обозначение этих фрагментов в данном анализе также условно. В общем виде такой анализ выполнен в работе [Леонович, 2023]. Наша задача будет состоять в том, чтобы количественно дополнить распределения этих контактов в модели и дать количественную оценку их прочности.

Рассмотрим три возможных варианта условных фрагментов:

1. Капля клея, нанесённая на одну из древесных частиц, непосредственно взаимодействует в микрообласти с другой каплей клея, нанесённой на другую частицу. Таких взаимодействий между частицами, исходя из соответствующих размеров частиц и капель, должно быть в материале некоторое множество. Введём обозначение отдельно взятого kleевого соединения в символах $\text{Д} - \text{С} \cdots \text{С} - \text{Д}$, где «Д» – древесная фаза, «С» – олигомерная смола с отвердителем, переходящая при отверждении в процессе горячего прессования в полимерную фазу. Точками обозначено их взаимодействие. Такой вариант kleевого соединения соответствует «Нс» – нормальному kleевому соединению;

2. Капля клея, нанесённая на одну древесную частицу, вступает во взаимодействие с другой частицей, где в микроучастке древесной фазы, контактирующей с ней, нет клея. Введём обозначение такого варианта kleевого соединения в тех же символах $\text{Д} - \text{С} \cdots \text{Д}$. Такой вариант обозначим «Ос» – ослабленное соединение;

3. Частицы в микрообласти соприкасаются без клея. Введём обозначение соединения в символах $\text{Д} \cdots \text{Д}$. Такой точечный вариант микроконтакта частиц обозначим «Дс» – дефектное соединение.

Общее число и соотношение микроучастков в изготавляемом материале обуславливает интегральную прочностную характеристику древесноплитного композита, в частности древесностружечных плит, а изменением соотношения микроучастков технологическими приёмами в направлении увеличения доли Нс можно увеличить прочность изготавливаемого материала. Если бы существовал способ точно рассчитать и регулировать соотношение контактов, то на этой основе представлялось бы возможным управлять качеством материала, приводя его к конкретно заданным требованиям.

Цель работы. Выявить особенности древесноплитных материалов в связи с дискретным (неполным) осмолением структурных древесных частиц при неравномерном распределении капель по их поверхности. На этой основе показать различие прочности kleевых соединений в вариантах Нс, Ос

и в присутствии варианта Дс для анализа особенностей древесных композиционных материалов и работоспособности научного подхода при расчёте прочности ДСП.

Методика исследований. Введём пояснение к используемым терминам. Древесная частица – основной структурный элемент древесностружечных плит, размеры которого моделируются параллелепипедом. Пласти – наибольшая поверхность древесной частицы, а остальные поверхности – боковая и торцевые грани. Наравне с используемыми в технике древесноплитного производства терминами «связующее», «смола» используем общенаучные термины «клей», «синтетическое олигомерное соединение». Капля – дисперсная kleевая частичка, образующаяся на поверхности древесной частицы при воздушном распылении клея. Термин «осмоление» в смысле обработки древесных частиц путём нанесения на них клея сохраним как краткий.

Древесные частицы получали из берёзовых карандашей (остатков при лущении шпона) с последующим измельчением щепы на молотковой дробилке и просеиванием для однородности получаемых частиц на сите 5 и задержавшихся – на сите 2 (номер соответствует диаметру отверстий в миллиметрах). Их масса составляла 92 мас.% общей массы. Частицы подсушивали до влажности 3%. Использовали смолу марки КФМТ-15, её разбавляли водой до рабочей концентрации 57% (типичная для производственных режимов), добавляли отвердитель (NH_4Cl – 1 мас.%) и в периодическом барабане массу древесных частиц осмоляли путём воздушного распыления клея под давлением $2,2 \pm 0,2$ МПа с расходом, обеспечивающим содержание клея на частицах 7,14 мас.%.

Для расчёта доли площадей, занимаемых суммой капель связующего на отдельной древесной частице, квартованием отбирали 6 частиц, на поверхности которых с помощью электронного микроскопа фиксировали распределение капель клея фотографированием и находили по фотографии количество капель клея и занимаемую ими площадь на пласти частицы. В проекции с увеличением в 7 раз находили смолопокрытую площадь как отношение доли площади капель к площади пласти древесной частицы. Это отношение находили для каждой из древесных частиц, приводя в расчёте неправильную их форму к параллелепипеду (l , b , h – длина, ширина, высота)

Изменение формы капель клея вследствие смачивания и впитываемости во времени относительно берёзового шпона (как подложки) оценивали по известной методике [Угрюмов, Цветков, 2007].

Прочность модельных kleевых соединений (σ_{\perp}) определяли на образцах берёзовой фанеры размером $80 \times 50 \times 3$ мм с тремя условиями нанесения клея, каждое в двух вариантах – на обе склеиваемые поверхности

(Нс вариант) и на одну из склеиваемых поверхностей (Ос вариант). Склевали при наложении образцов перпендикулярно друг другу с образованием площади клеевого соединения 50×50 мм. Испытывали с приложением напряжения при растяжении перпендикулярно площади склеивания (прочность на отрыв) при скорости нагружения 10 мм/мин.

Результаты обрабатывали статистически при вероятности $P = 0,95$ [Митропольский, 1971; Мартынов, Мартынов, 2011].

Результаты и их обсуждение. При нанесении клея на древесные частицы было установлено частичное покрытие поверхности kleem с сильной степенью неоднородности. Это иллюстрируется на фотографии частицы, увеличенной в 7 раз и приведённой на рис.1.



Рис. 1. Фотография отдельной древесной частицы с нанесённым на её поверхность kleem (тёмные точки)

Fig. 1. Photo of a separate wood particle with glue applied to its surface (dark points)

В публикации [Леонович и др., 2024] для анализа качества материала при неполном осмолении частиц воспользовались мысленной моделью в виде квадрата из 9 элементов. Из этой публикации возьмём вариант образования материала из двух разноосмолёных квадратных частей модели как ситуацию наиболее вероятной вариабельности осмоления. Примем квадрат на поверхности одной контактирующей части модели состоящим из девяти элементов (3×3). В этом квадрате три элемента заполнены kleem, а шесть – нет. Квадрат другой контактирующей части модели также состоит из девяти элементов (3×3) и содержит четыре элемента, заполненных kleem, и пять – без kleя. При наложении квадратов, как доказывается вероятностным анализом в цитируемой работе, соотношение следующих типов контактов при вероятности $P = 0,95$ окажется равным:

$$\text{Нс} : \text{Ос} : \text{Дс} = 0,1482 : 0,4815 : 0,3703. \quad (1)$$

В частности, в рассматриваемом варианте нормальных контактов оказывается меньше, чем ослабленных, а наличие дефектных контактов (без участия kleя и, соответственно, без создания прочности) усугубляет ситуацию в отношении ухудшения качества материала. При технологическом изменении расхода kleя можно по приведённым универсальным формулам рассчитать соответствующее соотношение трёх типов контактов в зависимости от расхода kleя и заданной вероятности.

Процесс воздушного распыления определяется только давлением воздуха в компрессоре и приводит к сильной дисперсности и неравномерному распределению образующихся на поверхности частиц капель клея. Степень осмоления содержится в табл. 1. Суммарная их площадь, рассчитанная по фотографии, показала, что только статистическая треть пласти каждой отдельной частицы покрыта kleem ($31,77 \pm 4,5\%$). Получается, что большая часть поверхности не покрыта kleem и не участвует во взаимодействии структурных элементов в механизме образования древесного композиционного материала. Отсюда следует, что из-за неполной площади склеивания древесных частиц материал получается неоднородным в отношении прочности. Эта неоднородность дополнительно усугубляется не только вариабельностью качества kleевых соединений, но и наличием микроучастков с полным их отсутствием.

Таблица 1

**Степень осмоления древесных частиц по пласти
при содержании kleя 7,14 мас.%**

**The degree of tarring of wood particles along the layer
with an adhesive content of 7,14 wt.%**

Номер частицы	Приведённые размеры частиц, мм			Площадь пласти, мм ²	Число капель на пласти, шт.	Площадь kleя, мм ²	Доля осмолённой площади, %
	1	b	h				
1	9,40	2,30	0,59	21,62	66	7,40	34,23
2	12,10	2,80	0,63	33,88	52	9,26	27,33
3	7,30	1,80	0,47	13,14	78	4,77	36,30
4	10,40	2,60	0,52	27,04	73	8,29	30,66
5	8,60	2,70	0,55	23,22	56	6,78	29,20
6	10,10	1,90	0,44	19,19	61	6,31	32,88
Среднее значение	9,65	2,35	0,53	23,02	64	7,14	$31,8 \pm 4,5$

Возможны два предельных случая. Первый – когда во всех вариантах образуется только нормальное kleевое соединение Нс. Тогда общая сумма таких соединений будет статистически минимальна. Второй – когда во всех вариантах образуются только ослабленные kleевые соединения Ос. Тогда общая сумма соединений будет увеличена в два раза при закономерном их ослаблении, а дефектная площадь контакта снизится. В остальных случаях общая сумма численно окажется больше суммы первого и меньше суммы второго вариантов.

Наиболее вероятное соотношение клеевых соединений установили по уравнению (1). Тогда, моделируя древесную частицу параллелепипедом и получив число частиц в сечении образца для испытания на отрыв, можно получить оценочную информацию для ожидаемой прочности. При этом пренебрегая долей прочности, образованной боковыми и торцевыми гранями, можем рассчитать ожидаемую прочность материала. Площадь граней (мм^2) в среднем составляет:

$$S_{\text{тр}} = [(9,65 \cdot 0,53) + (2,35 \cdot 0,53)] = 6,36. \quad (2)$$

Основанием для исключения вклада в прочность граней служит не только их малая площадь ($S_{\text{бок}} = 9,65 \cdot 0,53$; $S_{\text{топ}} = 2,35 \cdot 0,53$), составляющая $6,36 \text{ мм}^2$, по сравнению с площадью пласти ($S_{\text{пл}} = 9,65 \cdot 2,35$), которая в 3,57 раза больше. По механизму образования материала давление прессования приходится непосредственно на пласти, а на грани оно практически не прикладывается, и грани, следовательно, не вносят значимого вклада в создание прочности [Леонович, 2023].

Для расчёта ожидаемой прочности материала сначала получим прочность на отрыв на модельных образцах при трёх расходах клея для нормального (Нс) и ослабленного (Ос) соединений. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Прочность типов клеевых соединений модельных образцов
при разном содержании клея**

**The strength of the types of adhesive joints of the model samples
with different glue content**

Показатель	Содержание 4,5 г/м ²		Содержание 7,2 г/м ²		Содержание 9,0 г/м ²	
	Нс	Ос	Нс	Ос	Нс	Ос
Прочность при отрыве (σ_{\perp} , МПа)	2,96	1,75	3,62	2,88	4,57	3,59
Среднее квадратичное отклонение (s), МПа	0,09	0,16	0,08	0,01	0,11	0,08
Ошибка среднего арифметического (m), МПа	$\pm 0,1$	$\pm 0,17$	$\pm 0,08$	$\pm 0,01$	$\pm 0,12$	$\pm 0,08$
Вариационный коэффициент (v), %	3,11	5,86	2,56	3,36	2,30	3,24
Эффективность клея, %	65,8	38,9	50,3	40,0	50,8	28,8

Примечание: Эффективность клея (в процентах) определяется как прочность склеивания, отнесённая к количеству клея, обеспечивающему эту прочность

Нанесение клея на обе контактирующие поверхности, как это известно не только из теории, но и из практики склеивания, обеспечивает лучшее качество склеивания, чем при нанесении только на одну поверхность [Кардашов, 1976]. В нашем случае получено подтверждение известному факту: прочность Нс выше Ос при любом расходе клея – и выше, и ниже номинала. Однако при завышенном расходе (а среднее значение на практике производства порядка 7,5 мас.%) избыток клея затекает в микрорельеф другой соединяемой древесной частицы, лишённой в этом микроучастке клея и одностороннее нанесение как таковое строго не соблюдается. Хотя различие в пользу Нс для избыточного расхода клея сохраняется, как и для случая при меньшем расходе клея.

Тогда в расчёте примем вариант соотношений Нс и Ос по уравнению (1) и умножим на соответствующее значение прочности из табл. 2.

Получим:

$$\sigma_{\perp \text{расч}} = (Q_{\text{Нс}} \cdot \sigma_{\text{Нс}} + Q_{\text{Ос}} \cdot \sigma_{\text{Ос}}) \cdot Q_{\text{K}}, \quad (3)$$

где $Q_{\text{Нс}}$ и $\sigma_{\text{Нс}}$ – доля нормальных kleевых соединений и их прочность соответственно; $Q_{\text{Ос}}$ и $\sigma_{\text{Ос}}$ – доля ослабленных kleевых соединений и их прочность соответственно; Q_{K} – степень осмоления, выраженная как общая доля клея, нанесённого на древесные частицы.

Тогда согласно уравнению (3) получим:

$$\sigma_{\perp \text{расч}} = (0,1482 \cdot 3,62 + 0,4815 \cdot 0,3177) = 0,61. \quad (4)$$

Поскольку прочность kleевых соединений была получена на моделях и не учитывала структуру ДСП, то для перехода от результата расчёта на моделях к результату, получаемому на реальных древесных плитах, необходимо учесть особенности структуры материала из-за некоторой хаотичности расположения частиц при формировании ковра и разнотолщинности самих древесных частиц. Введём безразмерный структурный коэффициент K_c . Он характеризует отношение реальной прочности древесноплитного материала к предполагаемой прочности, которая отличалась бы при допущении такой упаковки структурных элементов (древесных частиц), когда из-за расположения в структуре пустоты не возникают. Предполагаемая прочность оценивается показателем, получаемым при определении прочности kleевого соединения на модели, когда разрушение происходит собственно по клею (когезионный характер), а пустоты не рассматриваются.

K_c суммарно учитывает дезориентацию древесных частиц по отношению к продольной оси плиты (K_d) и разнотолщинность частиц (K_p). Согласно работе [Позняков, 1988] дезориентация частиц понижает их прочность весьма существенно. Примем $K_d = 0,80$, а из данных табл. 1 найдём $K_p = 0,85$, тогда K_c будет равен:

$$K_c = K_d \cdot K_p = 0,80 \cdot 0,85 = 0,68. \quad (5)$$

Тогда рассчитанное по модели значение прочности в уравнении (4) скорректируем на структурную поправку и получим ожидаемое значение:

$$\sigma_o = \sigma_{\perp \text{расч}} \cdot K_c = 0,61 \cdot 0,68 = 0,41. \quad (6)$$

Найденное значение $\sigma_o = 0,41$ МПа по нашему расчёту сопоставимо с требованиями стандарта на ДСП. Согласно ГОСТ 10632-2014 при толщине плит 13-20 мм для марки Р1 требуется прочность на отрыв не менее 0,24 МПа, для Р2 – 0,35 МПа, для Р3 – 0,45 МПа.

Близкое совпадение значений прочности на отрыв, полученных при моделировании, и значений, указанных в ГОСТ 10632-2014, свидетельствует о правомочности приведённых рассуждений и работоспособности принятого моделирования.

При обсуждении мы рассмотрели эффективность использования клея. Избыток расхода приводит к увеличению толщины клеевого шва и нарушает эффективную «работу» клеевого соединения. Что же касается Ос, то при расходе 9,0 мас.%, избыток клея проникает в предповерхностный слой соседней соединяемой древесной частицы в микроучасток, который рассматривается как микроучасток с отсутствием клея, и результат несколько сдвигается в направлении варианта двустороннего нанесения. Ограничения в увеличении интегрального расхода клея для повышения прочности те же, что и ограничения по увеличению общего числа клеевых соединений – экономические. Приемлемым считается суммарный расход до 8 мас.%, хотя по равномерности осмоляния в отдельных точках возможно колебание $7,5 \pm 0,5$ мас.% в зависимости от качества форсунок и режима осмоляния.

По соображениям эффективности расхода клея в стремлении обработать как можно большую поверхность древесных частиц клей (определенный в технологических регламентах как связующее) разбавляют водой от товарной концентрации 65% до рабочей – 57%. При этом улучшаются условия воздушного распыления с использованием применяемых форсунок, но не учитывается поведение капель клея на поверхности древесных частиц (на подложке) после их нанесения.

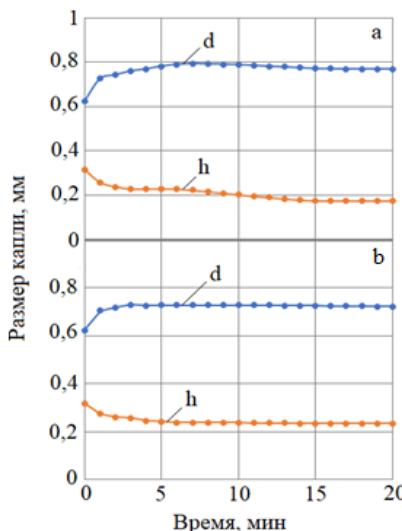


Рис. 2. Изменение размеров капли клея концентрацией 57% (а) и концентрацией 65,4% (б): d – диаметр капли; h – высота капли

Fig. 2. Change in the size of the glue drop concentration 57% (a) and concentration 65,4% (b): d – drop diameter; h – drop height

Рис. 2 иллюстрирует изменение размера отдельных капель на древесной подложке во времени. Восходящая ветвь кривой d (увеличение диаметра расползающейся капли) отвечает процессу смачивания kleem поверхности подложки, а слабо выраженная нисходящая ветвь этой кривой, отражающая некоторое уменьшение диаметра капель, соответствует частичной впитываемости kleя в структуру древесины и собственным превращениям kleя, приводящим (кривая h на графике а) к уменьшению микрообъёма главным образом за счёт испарения растворителя (воды).

Повышенная по сравнению с рабочей концентрацией kleя 65,4% угнетает анализируемые процессы. Смачивание (кривая d на графике б) в силу снижения полярности раствора заканчивается раньше, но и впитывание kleя в структуру древесины замедляется. Соответственно уменьшилось сокращение объема капель. В целом нанесённые отдельные капли kleя лучше выполняют свою функцию, но они при этом покрывают меньшую поверхность древесных частиц, что и обуславливает технологическую необходимость разбавления kleя.

Однако вследствие ухода некоторого количества kleя из зоны склеивания во внутреннюю структуру древесины и в результате этого частичного неучас-

стия его в образовании клеевого соединения частиц эффективность использования клея понижается и требует мероприятий по снижению отрицательных факторов. Представляется целесообразным несколько повысить рабочую концентрацию клея для уменьшения впитываемости. Одновременно надо снизить вязкость для его лучшего распыления, например, созданием приемлемого теплового режима или путём введения в состав клея ПАВ (поверхностно-активных веществ). Возможны и другие технологические мероприятия. За идеальный межоперационный временной период от нанесения клея до горячего прессования можно считать промежуток Δt от начала смачивания до момента, когда начинается впитывание клея в структуру древесины, т. е. за максимум участка смачивания. При этом возможно сохранение приблизительно 3...4% общей массы клея для участия в образовании материала.

Выводы.

1. Особенность образования композиционных материалов из измельчённых древесных частиц при минимальном нанесении синтетических олигомерных соединений (клея) заключается в неполном покрытии частиц каплями клея. При прилегании частиц друг к другу клеевые контакты возникают с образованием нормальных клеевых соединений (капли на поверхности одной частицы соединяются с каплями на другой), или капли на поверхности одной частицы соединяются непосредственно с древесной поверхностью другой частицы, образуя ослабленное клеевое соединение. Микроучастки в прилегающих частицах без клея образуют дефекты в структуре материала;

2. На моделях установлена эффективность используемого клея для двух типов клеевых соединений при нормативном и ниже, и выше нормативного расходах. Нормальное клеевое соединение примерно в 1,3...1,7 раза прочнее ослабленного. Нанесение избытка клея несколько повышает прочность ослабленного клеевого соединения благодаря частичному затеканию клея на совмещающуюся поверхность второй частицы, уменьшая тем самым ослабляющее проявление односторонне нанесённого клея;

3. Капля связующего до включения в клеевое соединение претерпевает физические превращения в связи со смачиваемостью подложки и впитываемостью в структуру древесины, что обусловливает в первом случае увеличение площади капель на подложке, а во втором – уменьшение клея в зоне образования клеевого соединения.

Высказано предположение, что учёт особенностей образования материала может быть использован для объяснения и повышения качества материала, в частности, нагреванием наносимого клея, изменением конструкции

форсунки, сокращением интервала от операции нанесения до операции горячего прессования или другими технологическими мероприятиями.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Кардашов Д.А. Синтетические клеи. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Химия, 1976. 504 с.

Клёсов А. Древесно-полимерные композиты: руководство. СПб.: НОТ, 2010. 736 с.

Леонович А.А. Физико-химические основы образования древесных плит: учебное пособие. Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 264 с.

Леонович А.А., Куликов В.Н., Замазий Л.В., Овсянников Е.А. Вероятностный анализ клеевых соединений в материалах из измельчённых частиц // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы IX Всерос. науч.-тех. конф. СПб.: СПбГЛТУ, 2024. С. 405–408.

Мартынов В.В., Мартынов П.В. Статистические методы обработки экспериментальных данных. Саратов: СГТУ, 2011. 186 с.

Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1971. 576 с.

Поздняков А.А. Прочность и упругость композиционных древесных материалов. М.: Лесн. пром-сть, 1988. 138 с.

Угрюмов С.А., Цветков В.Е. Разработка методики определения смачивающей способности костры льна синтетическими олигомерами // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы межд. науч.-тех. конф. Вологда: ВоГТУ, 2007. С. 7–9.

Чубинский А.Н., Кузнецова Е.Г., Коваленко И.В. Физико-химические основы процессов склеивания: учебное пособие. СПб.: СПбГЛТУ, 2016. 40 с.

References

Chubinskiy A.N., Kuznetsova E.G., Kovalenko I.V. Physico-chemical foundations of bonding processes: a textbook. St.Petersburg : SPbGLTU, 2016. 40 p. (In Russ.)

Kardashov D.A. Synthetic adhesives. 3rd edition, revised and add. Moscow: Chemistry, 1976. 504 p. (In Russ.)

Klesov A. Wood-polymer composites: a guide. St. Petersburg: NOT, 2010. 736 p. (In Russ.)

Leonovich A.A., Kulikov V.N., Zamaziy L.V., Ovsyannikov E.A. Probabilistic analysis of adhesive compounds in materials from crushed particles. *Forests of Russia: politics, industry, science, education:* materials of the IX All-Russian sci.-tech. conf. St. Petersburg, 2024, pp. 405–408. (In Russ.)

Leonovich A.A. Physico-chemical foundations of the formation of wood slabs: a textbook. Vologda: Infra-Engineering, 2023. 264 p. (In Russ.)

Martynov V.V., Martynov P.V. Statistical methods of processing experimental data. Saratov: SSTU, 2011. 186 p. (In Russ.)

Mitropolskiy A.K. Technique of statistical calculations. 2nd ed., reprint. and add. Moscow: Nauka, 1971. 576 p. (In Russ.)

Pozdnyakov A.A. Strength and elasticity of composite wood materials. Moscow: Lesn. prom-st, 1988. 138 p. (In Russ.)

Ugryumov S.A., Tsvetkov V.E. Development of a methodology for determining the wetting ability of flax bonfires with synthetic oligomers. *Actual problems of the development of the forest complex*: mater. of the inter. sci.-tech. conf. Vologda, 2007, pp. 7–9. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 05.12.2024

Леонович А.А., Замазий Л.В. Особенности древесных композиционных материалов с нарушением сплошности синтетической полимерной фазы // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 252. С. 346–359. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.346-359

Рассматриваются особенности образования композиционных материалов из измельчённых древесных частиц при минимальном нанесении синтетических олигомерных соединений (клея) применительно к ДСП (древесно-стружечным плитам). Изучали процесс формирования kleевых соединений из древесных частиц, при котором при осмолении капли наносятся с неполным покрытием поверхности частиц. Определяли степень осмоления. Анализировали различные типы kleевых соединений, подразделяя их на нормальные, когда клей находится на микроучастках обеих склеиваемых поверхностей, и ослабленные, когда клей находится только на одной из них, а также на дефекты в структуре материала, возникающие при контакте микроучастков без участия клея. Оценены варианты образования типов kleевых соединений при наложении контактирующих частиц. Установлено, что Нс всего порядка 15%, а ослабленных – почти 50% от общей площади контактирующих частиц. Исследование показало, что прочность при отрыве нормальных kleевых соединений в 1,3…1,7 раза выше, чем у ослабленных, и что нанесение избытка клея может повысить прочность ослабленных соединений. Изучали процесс поведения капли клея на подложке в результате смачивания подложки и впитывания в структуру древесины. Высказано предположение о повышении качества такими приёмами, как нагревание наносимого клея, модификация конструкции форсунки, сокращение интервала между операциями осмоления и горячего прессования.

Ключевые слова: древесные композиционные материалы, полимерная фаза, дефекты kleевых соединений, степень осмоления, прочность типов kleевых соединений, эффективность клея.

Leonovich A.A., Zamaziy L.V. Features of wood composite materials with a violation of the continuity of the synthetic polymer phase. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 252, pp. 346–359 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.346-359

The features of the formation of composite materials from crushed wood particles with minimal application of synthetic oligomeric compounds (glue) in relation to chipboard (chipboard) are considered. The process of forming adhesive compounds from wood particles was studied, in which, during tarring, glue droplets are applied with an incomplete coating of the particle surface. The degree of tarring was determined. Various types of adhesive joints were analyzed, dividing them into normal ones when the glue is on the microparticles of both surfaces to be glued, and weakened joints when the glue is only on one of them, as well as defects in the structure of the material that occur when microparticles contact without glue. Variants of the formation of types of adhesive joints when applying contacting particles were evaluated and it was found that Hc is only about 15%, and weakened ones – almost 50% of the total area of the contacted particles. The study showed that the tear strength of normal adhesive joints is 1,3…1,7 times higher than weakened ones, and that applying an excess of glue can increase the strength of weakened joints. The process of the behavior of a drop of glue on a substrate as a result of wetting of the substrate and absorption into the wood structure was studied. It is suggested to improve the quality by such techniques as heating the applied glue, modifying the nozzle design, reducing the interval between tarring and hot pressing operations.

Keywords: wood composite materials, polymer phase, defects of adhesive joins, degree of tarring, strength of types of adhesive joints, adhesive efficiency.

ЛЕОНОВИЧ Адольф Ануфриевич – профессор Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор технических наук, заслуженный деятель науки РФ. SPIN-код: 1378-5709.

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

LEONOVICH Adol'f A. – DSc (Technical), Professor, St.Petersburg State Forest Technical University, Honored Scientist of the Russian Federation. SPIN- code: 1378-5709.

194021. Institutsky per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: wood- plast@mail.ru

ЗАМАЗИЙ Леонид Витальевич – аспирант Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

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

ZAMAZIY Leonid V. – PhD student, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institutsky per. 5. St. Petersburg. Russia, E-mail: zamaziyl@gmail.com

Е.А. Топтунов, Ю.В. Севастьянова, Ю.А. Саврасова, А.Д. Ивахнов

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ
И ПРОДУКТОВ ЕЕ ПЕРЕРАБОТКИ
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ АЭРОГЕЛЕЙ**

Введение. Целлюлоза является одним из самых распространенных биополимеров – основным структурным компонентом клеточной стенки всех растений. Также разновидности целлюлозы могут быть синтезированы микроорганизмами (бактериальная целлюлоза) и выделены из туннок оболочников (туницин) [Abdel-Hakim, Mourad, 2023].

Основным направлением использования данного биополимера, выделяемого преимущественно из древесины различных пород, является целлюлозно-бумажная промышленность, в которой целлюлоза выступает в качестве волокнистого полуфабриката для получения различных видов бумаги и картона. Однако в настоящее время активно исследуется возможность расширения области применения целлюлозы, изучаются различные продукты ее переработки, среди которых можно выделить так называемые порошковые целлюлозные материалы – обширную категорию продуктов деструкции, включающую порошковую, микро- и наноцеллюлозу. К микроцеллюлозам относятся микрокристаллическая и микрофибрillярная целлюлозы. Первая представляет собой продукт гидролиза целлюлозы [Аутлов и др., 2013], а вторую получают путем механической фибрillation цеплюлозных волокон [Adel et al., 2016]. К наноцеллюлозам относят нанокристаллическую, нанофибрillярную и бактериальную наноцеллюлозу [Dufresne, 2013]. Также в эту группу включают специальный вид нанокристаллической целлюлозы, полученный из туннок оболочников (Т-НКЦ) [Dunlop et al., 2018]. Благодаря своим уникальным характеристикам порошковые целлюлозные материалы находят свое применение в таких областях, как строительная, косметическая, фармацевтическая, пищевая промышленность, рассматриваются в качестве бумажных наполнителей, материалов для гибких экранов и 3D-моделирования [Топтунов, Севастьянова, 2021].

Особый интерес представляют высокопористые материалы на основе целлюлозы, что обуславливается их высокой удельной площадью поверхности в совокупности с биоразлагаемостью и биосовместимостью. Общая схема подготовки таких материалов включает в себя: получение суспензии

путем растворения исходного материала, гелеобразование, подготовку к сушке и непосредственно сушку. В качестве исходного материала может выступать как первичная целлюлоза (например, хлопок), так и переработанный материал (макулатура) или же продукты деструкции целлюлозы (например, микрокристаллическая целлюлоза). Получение геля целлюлозы может осуществляться как путем физического, так и путем химического гелеобразования [Федотова и др., 2023].

Аэрогели представляют собой сверхлегкий материал (плотность менее 0,05 г/см³), отличающийся высокой удельной поверхностью (100-1000 м²/г) и пористостью (свыше 90%). Зачастую гели разделяются на различные виды по типу сушки, которая использовалась для их получения. Так, например, аэрогели получают, используя метод сверхкритической сушки, а криогели – сублимационной [Lavoine, Bergström, 2017]. Также для характеристики аэрогелей используют размер пор и пористость. Материалы с пористостью не менее 90% и размером пор 2-50 нм называют аэрогелями [Rahmanian et al., 2021].

Аэрогели на основе целлюлозы относятся к третьему классу аэрогелей – биоаэрогелям. К этому классу также относятся материалы, полученные на основе других полисахаридов (крахмал, хитозан, пектин и др.). Схема их получения аналогична получению обычных аэрогелей [Al Abdallah et al., 2024]. Целлюлозные аэрогели представляют собой новую категорию устойчивых и экологически безопасных материалов, которые имеют ряд преимуществ по сравнению с обычными аэрогелями на основе неорганических и синтетических полимеров. Они обладают высокой пористостью (от 84,0 до 99,9%), значительной удельной поверхностью (10–975 м²/г) и низкой плотностью (от 0,0005 до 0,35 г/см³). Кроме того, целлюлозные аэрогели обладают превосходной прочностью на сжатие (от 5,2 до 16,67 МПа) [Long et al., 2018].

В рамках выполнения данного исследования авторы изучали возможность получения аэрогелей из различного целлюлозного сырья (первичный волокнистый полуфабрикат, порошковая целлюлоза, наноцеллюлоза). Целью работы стала оценка возможности получения аэрогелей из образцов целлюлозы, подвергнутых различным методам обработки (порошковая целлюлоза, наноцеллюлоза).

Материалы и методика исследования. В качестве исходных образцов целлюлозы использовались хвойная и лиственная товарная сульфатная беленая целлюлозы, предоставленные крупными предприятиями ЦБП России.

Порошковую целлюлозу получали методом сухого размола образцов исходной целлюлозы. Сухой размол осуществлялся на планетарной шаровой мельнице марки Retsch PM400. В размольный стакан загружалось 10 г а.с. целлюлозы и помещалось 24 размалывающих элемента (шарика).

Получение препаратов растительной наноцеллюлозы проводили методом сернокислого гидролиза. Гидролиз осуществляли с помощью ротационного испарителя Heidolph Hei-VAP Advantage (Германия). Процесс получения наноцеллюлозы включал в себя непосредственно гидролиз (концентрация кислоты в массе – 40%, продолжительность – 1 ч, температура обработки 80 °С), 10-кратное разбавление полученной суспензии водой с последующей промывкой центрифугированием. Полученная суспензия наноцеллюлозы высушивалась до пастообразного состояния.

Получение аэрогеля проводили методом углекислотной сверхкритической сушки после вытеснения воды безводным ацетоном. Образец целлюлозы (около 2 г) промывался безводным ацетоном в течение 12 ч при гидромодуле 350, которого оказывается достаточно для полного вытеснения воды из образца. Контроль содержания воды проводили по методу Фишера. Сверхкритическую сушку (экстракционное извлечение ацетона) проводили при температуре 40 °С, давлении 10 Мпа и скорости потока 1 мл СО₂/мин. (для состояния СО₂ 10 МПа и 2 °С) в течение 12 ч с использованием установки MV-10ASFE (Waters, USA).

Структурно-морфологические характеристики образцов целлюлозы на различных этапах оценивались с помощью анализатора FiberTester.

Оценку удельной поверхности и пористости образцов проводили методом низкотемпературной адсорбции азота на анализаторе удельной поверхности и пористости ASAP 2020 mp (Micromeritics, USA). Образцы адсорбента предварительно дегазировали в порту дегазации прибора при 90 °С до остаточного давления $7 \cdot 10^{-4}$ Па с выдерживанием при заданных условиях в течение 2 ч. Навеска образцов составляла от 100 до 200 мг в зависимости от предполагаемой структуры образца. Далее в порту анализа проводили адсорбцию и десорбцию газа в интервале давлений от 0 до 101,3 кПа. Используя программное обеспечение прибора, по полученным изотермам рассчитывали параметры пористой структуры. Суммарный объём пор V_{Σ} (см³/г) и удельную площадь поверхности пор S (м²/г) определяли методом Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ).

Результаты исследования. На первом этапе эксперимента образцы товарной хвойной и лиственной беленой сульфатной целлюлоз подвергали размолу на планетарной шаровой мельнице. Размол проводили в течение 2 ч, выполняя отбор проб через 30 и 60 мин после начала размола. Для полученных образцов порошковой целлюлозы оценивались структурно-морфологические характеристики с использованием анализатора FiberTester и метода сканирующей электронной микроскопии (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1

Изменение структурно-морфологических характеристик образцов целлюлозы в процессе сухого размола

Structural and morphological characteristics of cellulose samples during ball milling

Наименование образца	Продолжительность размола, мин	Средняя длина, мм	Средняя ширина, мкм	Средний фактор формы, %	Грубость
Беленая хвойная СФА целлюлоза	0	2,243	26,9	82,5	205
	30	0,405	34,2	87,1	650
	60	0,389	33,7	86,9	590
	120	0,262	36,8	90,3	620
Беленая лиственная СФА целлюлоза	0	0,888	21,2	89,8	137
	30	0,377	26,4	84,2	380
	60	0,351	27,5	84,8	470
	120	0,234	32,2	89,1	570

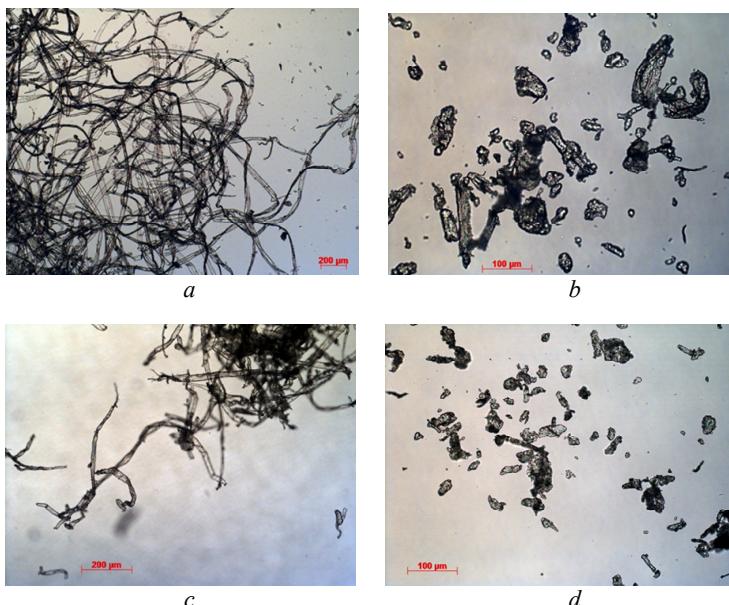


Рис. 1. Микрофотографии образцов до и после 120 мин размола: (а, б) беленая хвойная целлюлоза; (с, д) беленая лиственная целлюлоза

Fig. 1. Microphtographs of samples before and after 120 min of grinding: a, b – bleached softwood pulp; c, d – bleached hardwood pulp

В результате проведенного сухого размола образцов целлюлозы было отмечено, что наиболее интенсивное снижение размеров волокон происходит в первые полчаса размола. Также отмечено, что в процессе сухого размола образец целлюлозы теряет волокнистую структуру и превращается в отдельные частицы, составляющие порошок.

Для полученных образцов порошковой целлюлозы проводилось исследование удельной поверхности с целью определения влияния сухого размола на данную характеристику (табл. 2).

Таблица 2

**Оценка изменения удельной поверхности и общего объема пор
образцов целлюлозы в процессе сухого размола**

**Evaluation of changes in the specific surface area and total pore volume
of cellulose samples during ball milling**

Наименование образца	Продолжительность размола, мин	Удельная поверхность, м ² /г	V _{Σпор} , см ³ /г
Беленая хвойная СФА целлюлоза	30	1,53	0,0039
	60	1,48	0,0041
	120	1,76	0,0045
Беленая лиственная СФА целлюлоза	30	1,84	0,0047
	60	1,65	0,0048
	120	2,34	0,0054

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что в ходе сухого размола на шаровой мельнице планетарного типа наблюдается небольшое снижение удельной поверхности при часе размола, что может быть обусловлено наличием в образце как разработанных, так и остатков неразработанных волокон. В целом размол образцов на шаровой мельнице планетарного типа не приводит к значительному увеличению удельной поверхности образцов.

Для оценки возможности использования порошковой целлюлозы в качестве материала для получения аэрогеля использовали образец порошковой беленой хвойной целлюлозы. Образец был преобразован в аэрогель по описанному выше методу (табл. 3).

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что использование порошковой целлюлозы в качестве материала для аэрогеля позволяет незначительно повысить удельную поверхность. Следовательно, такой материал не подходит для получения аэрогелей.

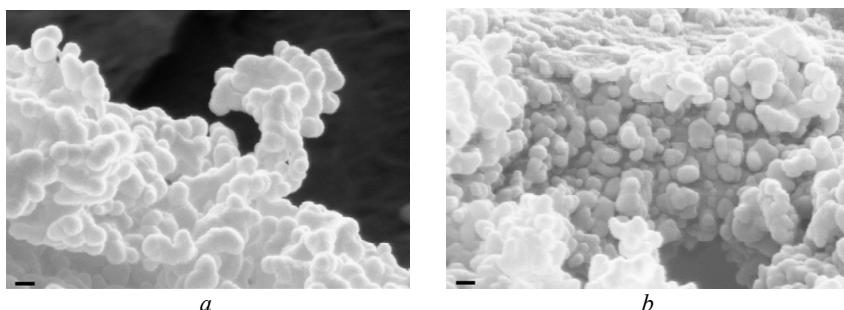
Таблица 3

Оценка удельной поверхности и общего объема пор беленой хвойной порошковой целлюлозы и аэрогеля, полученного на ее основе

Evaluation of the specific surface area and total pore volume of bleached softwood powdered cellulose and aerogel obtained on its basis

Наименование образца	Удельная поверхность, м ² /г	V _{Σпор} , см ³ /г
Порошковая целлюлоза	1,76	0,0045
Аэрогель из порошковой целлюлозы	5,56	0,0121

С целью наиболее полной разработки поверхности образцов беленой хвойной и лиственной целлюлоз они были подвергнуты сернокислому гидролизу с целью получения образцов наноцеллюлозы. В ходе такой обработки получается пастообразный материал, содержащий в себе частицы наноцеллюлозы. Преимущественно частицы наноцеллюлозы расположены на остатках более крупных волокон (рис. 2) и могут быть изолированы, например, путем ультразвуковой обработки. В данной работе использовался пастообразный материал, полученный путем кислотного гидролиза образца целлюлозы с последующим центрифугированием.



*Rис. 2. Микрофотографии образцов наноцеллюлозы:
(а) беленая хвойная целлюлоза; (б) беленая лиственная целлюлоза*

*Fig. 2. Microphotographs of nanocellulose samples:
(a) bleached softwood pulp; (b) bleached hardwood pulp*

С использованием описанного выше метода были получены аэрогели на основе наноцеллюлозы из беленой хвойной и лиственной целлюлозы и выполнена оценка их удельной поверхности (табл. 4).

Таблица 4

Сравнительная характеристика аэрогелей, полученных из различных образцов наноцеллюлозы

Comparative analysis of aerogels obtained from various nanocellulose samples

Наименование образца	Удельная поверхность, м ² /г	V _{Σпор} , см ³ /г
Аэрогель из хвойной беленой наноцеллюлозы	91,7	0,2551
Аэрогель из лиственной беленой наноцеллюлозы	135,32	0,2502

На основании приведенных данных можно отметить, что использование образцов наноцеллюлозы в качестве исходного сырья позволяет получить образцы аэрогелей, соответствующие требованиям к характеристикам качества.

Заключение. В настоящее время активно развивается интерес к получению аэрогелей целлюлозного происхождения. В рамках проведенного исследования была оценена возможность использования различных продуктов переработки целлюлозы для получения аэрогелей. Было показано, что в ходе получения порошковой целлюлозы методом сухого размола не происходит значительной разработки поверхности волокон и частиц целлюлозы, что при дальнейшем формировании аэрогеля не дает требуемых результатов удельной поверхности.

Перспективным способом разработки поверхности целлюлозы является кислотный гидролиз с получением образцов наноцеллюлозы. Аэрогели, полученные из образцов хвойной и лиственной наноцеллюлозы, обладают характеристиками, требуемыми для аэрогелей (удельная поверхность, объем пор).

Были получены аэрогели из беленой хвойной и лиственной наноцеллюлоз и выполнен их сравнительный анализ. Отмечено, что образец, полученный из лиственной наноцеллюлозы, отличается несколько большей удельной поверхностью, чем образец из хвойной наноцеллюлозы.

Благодарности. Работа выполнялась с использованием оборудования ЦКП НО «Арктика» и ИТЦ «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» (ИТЦ СТПБС) Северного Арктического федерального университета имени М.В. Ломоносова, г. Архангельск

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Аутлов С.А., Базарнова Н.Г., Кушнир Е.Ю. Микрокристаллическая целлюлоза: структура, свойства и области применения (обзор) // Химия растительного сырья. 2013. № 3. С. 33–41.

Топтунов Е.А., Севастьянова Ю.В. Порошковые целлюлозные материалы: обзор, классификация, характеристики и области применения // Химия растительного сырья. 2021. № 4. С. 31–45.

Федотова О.В., Трофимова К.В., Цыганков П.Ю., Сафаров Р.Р. Исследование влияния параметров получения высокопористых целлюлозных материалов на их структурные характеристики // ИВУЗ. Химия и хим. технология. 2023. Т. 66, вып. 2. С. 107–113.

Al Abdallah H., Tannous J.H., Abu-Jdayil B. Cellulose and nanocellulose aerogels, their preparation methods, and potential applications: a review // *Cellulose*. 2024. Vol. 31. P. 2001–2029.

Abdel-Hakim A., Mourad R. Nanocellulose and its polymer composites: preparation, characterization, and applications // *Russian Chemical Reviews*. 2023. Vol. 92, no. 4. Art. no. RCR5076.

Adel A.M., El-Gendy A.A., Diab M.A., Abou-Zeid R.E., El-Zawawy W.K., Dufresne A. Microfibrillated cellulose from agricultural residues. Part I: Papermaking application // *Industrial Crops and Products*. 2016. Vol. 93. P. 161–174.

Dufresne A. Nanocellulose: a new ageless bionanomaterial // *Materials Today*. 2013. Vol. 16. P. 220–227.

Dunlop M.J., Acharya B., Bissessur R. Isolation of nanocrystalline cellulose from tunicates // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2018. Vol. 6, no. 4. P. 4408–4412.

Lavoine N., Bergström L. Nanocellulose-based foams and aerogels: processing, properties, and applications // *Journal of Materials Chemistry A*. 2017. No. 5. P. 16105–16117.

Long L.Y., Weng Y.X., Wang Y.Z. Cellulose aerogels: synthesis, applications, and prospects // *Polymers*. 2018. No. 8. P. 1–28.

Rahmanian V., Pirzada T., Wang S., Khan S.A. Cellulose-based hybrid aerogels: strategies toward design and functionality // *Advanced Materials*. 2021. No. 33. P. 1–26.

References

Al Abdallah H., Tannous J.H., Abu-Jdayil B. Cellulose and nanocellulose aerogels, their preparation methods, and potential applications: a review. *Cellulose*, 2024, vol. 31, pp. 2001–2029.

Abdel-Hakim A., Mourad R. Nanocellulose and its polymer composites: preparation, characterization, and applications. *Russian Chemical Reviews*, 2023, vol. 92, no. 4, art. no. RCR5076.

Adel A.M., El-Gendy A.A., Diab M.A., Abou-Zeid R.E., El-Zawawy W.K., Dufresne A. Microfibrillated cellulose from agricultural residues. Part I: Papermaking application. *Industrial Crops and Products*, 2016, vol. 93, pp. 161–174.

Autlov S.A., Bazarnova N.G., Kushnir E.Yu. Microcrystalline cellulose. Structure, properties and applications. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2013, no. 3, pp. 33–41. (In Russ)

Fedotova O.V., Trofimova K.V., Tsygankov P.Yu., Safarov R.R. Research of the influence of parameters for obtaining highly porous cellulosic materials on their structural characteristics. *IVUZ. Khimiya i khim. tekhnologiya*, 2023, vol. 66, no. 2, pp. 107–113. (In Russ)

Dufresne A. Nanocellulose: a new ageless bionanomaterial. *Materials Today*, 2013, vol. 16, pp. 220–227.

Dunlop M.J., Acharya B., Bissessur R. Isolation of nanocrystalline cellulose from tunicates. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2018, vol. 6, no. 4, pp. 4408–4412.

Lavoine N., Bergström L. Nanocellulose-based foams and aerogels: processing, properties, and applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017, no. 5, pp. 16105–16117.

Long L.Y., Weng Y.X., Wang Y.Z. Cellulose aerogels: synthesis, applications, and prospects. *Polymers*, 2018, no. 8, pp. 1–28.

Rahmanian V., Pirzada T., Wang S., Khan S.A. Cellulose-based hybrid aerogels: strategies toward design and functionality. *Advanced Materials*, 2021, no. 33, pp. 1–26.

Toptunov E.A., Sevastyanova Yu.V. Powdered cellulosic materials: overview, classification, characteristics and fields of application. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2021, no. 4, pp. 31–45. (In Russ)

Материал поступил в редакцию 19.03.2024

Топтунов Е.А., Севастянова Ю.В., Саврасова Ю.А., Ивахнов А.Д.
Использование целлюлозы и продуктов ее переработки для получения аэрогелей // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 252. С. 360–371. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.360-371

В настоящее время активно исследуется возможность расширения областей применения целлюлозы. Отдельное внимание начинает уделяться продуктам деструкции целлюлозы – порошковым целлюлозным материалам. Наиболее распространенными порошковыми целлюлозными материалами являются микро- и наноцеллюлозы. Они обладают рядом уникальных характеристик, отличающихся от обычной целлюлозы, что обуславливает их использование в таких отраслях как строительная, косметическая, фармацевтическая промышленность. Порошковые целлюлозные материалы рассматриваются как материал для изготовления гибких экранов и 3D-моделирования. Наряду с этим возрастают интерес к высокопористым

материалам на основе целлюлозы, в частности, получению аэрогелей из первичной целлюлозы, переработанных материалов (макулатура) и продуктов деструкции целлюлозы (например, микрокристаллической целлюлозы). Целлюлозные аэрогели относятся к биоаэрогелям (третий класс аэрогелей) и представляют собой новую категорию устойчивых и экологически безопасных материалов. В рамках выполнения данного исследования была оценена возможность получения аэрогелей из различных целлюлозных материалов. Были исследованы структурно-морфологические характеристики и удельная поверхность образцов порошковой целлюлозы, полученной сухим размолом на шаровой мельнице планетарного типа с разной продолжительностью. Из образцов беленой хвойной порошковой целлюлозы был получен и проанализирован аэрогель. Отмечено, что такая обработка не позволяет достаточно разработать поверхность целлюлозы и получить аэрогель с требуемыми характеристиками. С целью наиболее полной разработки поверхности образцов целлюлозы они были подвергнуты сернокислому гидролизу с выделением наноцеллюлозы. Полученные образцы наноцеллюлозы были использованы для изготовления аэрогелей. Было отмечено, что аэрогели на основе наноцеллюлозы обладают удельной поверхностью и объемом пор, которые требуются для таких материалов.

Ключевые слова : порошковые целлюлозные материалы, наноцеллюлоза, аэрогель, кислотный гидролиз, удельная поверхность.

Toptunov E.A., Sevastyanova Yu.V., Savrasova Yu.A., Ivakhnov A.D.
Application of cellulose and its processed products for the production of aerogels.
Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii, 2025, iss. 252, pp. 360–371
(in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.360-371

Currently, the possibility of expanding the areas of application of cellulose is being actively investigated. Special attention is beginning to be paid to the products of cellulose destruction – powdered cellulose materials. The most common powdered cellulose materials are micro- and nanocelluloses. They have a number of unique characteristics that differ from cellulose, which leads to their use in such industries as construction, cosmetics, and pharmaceuticals. Powdered cellulose materials are considered as a material for flexible screens and 3D modeling. Along with this, there is growing interest in highly porous cellulose-based materials, in particular the production of aerogels from cellulose, recycled materials (waste paper) and cellulose destruction products (for example, microcrystalline cellulose). Cellulose aerogels belong to bioaerogels (the third class of aerogels) and represent a new category of sustainable and environmentally friendly materials. As part of this study, the possibility of obtaining aerogels from various cellulose materials was assessed. The structural and morphological characteristics and specific surface area of samples of powdered cellulose obtained by dry grinding in a planetary type ball mill with different durations were investigated. An aerogel was prepared and analyzed from samples of bleached softwood powdered cellulose. It is noted that such treatment does not allow developing the

cellulose surface and obtaining an aerogel with the required characteristics. In order to improve the surface development of cellulose samples, they were subjected to sulfuric acid hydrolysis to release nanocellulose. The resulting nanocellulose samples were used to prepare aerogels. It was noted that nanocellulose-based aerogels have the necessary specific surface area and pore volume required for such materials.

Keywords: powdered cellulose materials, nanocellulose, aerogel, acid hydrolysis, specific surface area.

ТОПТУНОВ Евгений Алексеевич – аспирант кафедры целлюлозно-бумажных и лесохимических производств Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова, инженер ИТЦ «Современные технологии переработки биоресурсов Севера». ResearcherID: ABE-4069-2020. ORCID: 0000-0001-8441-788X.

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: zhenyatope@gmail.com

TOPTUNOV Evgeniy A. – PhD student of the Department of Pulp, Paper and Wood Chemical Production, Northern Arctic Federal University named after M.V. Lomonosov, engineer of RTC “Modern technologies of processing of North bioresources”. ResearcherID: ABE-4069-2020. ORCID: 0000-0001-8441-788X.

163002. Severnaya Dvina emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: zhenyatope@gmail.com

СЕВАСТЬЯНОВА Юлия Вениаминовна – профессор кафедры целлюлозно-бумажных и лесохимических производств Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова, кандидат технических наук. ResearcherID: ABE-4746-2020. ORCID: 0000-0002-1806-9052;

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: y-sevastyanova@yandex.ru

SEVASTYANOVA Yulia V. – PhD (Technical), Professor of the Department of Pulp, Paper and Wood Chemical Production, Northern Arctic Federal University named after M.V. Lomonosov.

163002. Severnaya Dvina emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: y-sevastyanova@yandex.ru

САВРАСОВА Юлия Александровна – учебный мастер кафедры целлюлозно-бумажных и лесохимических производств Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. SPIN-код: 8292-4175. ORCID: 0000-0003-2096-4379.

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: yulia925@mail.ru

SAVRASOVA Yulia A. – training master of the Department of Pulp, Paper and Wood Chemical Production, Northern Arctic Federal University named after M.V. Lomonosov. SPIN-code: 8292-4175. ORCID: 0000-0003-2096-4379.

163002. Severnaya Dvina emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: yulia925@mail.ru

ИВАХНОВ Артем Дмитриевич – старший научный сотрудник ФИЦ комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова УрО РАН, кандидат химических наук. ResearcherID: U-4822-2019. ORCID: 0000-0003-2822-9192.

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: ivahnov-tema@yandex.ru

IVAKHNOV Artem D. – PhD (Chemical), Senior Researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the RAS. ResearcherID: U-4822-2019. ORCID: 0000-0003-2822-9192.

163002. Severnaya Dvina emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: ivahnov-tema@yandex.ru

Н.С. Никулина, А.И. Дмитренков, С.С. Никулин

МОДИФИКАЦИЯ ДРЕВЕСНОВОЛОКНИСТЫХ ПЛИТ ОЛИГОМЕРОМ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ НЕФТЕХИМИИ И ПОЛИСТИРОЛА

Введение. Древесина и изделия на её основе находят широкое применение в различных промышленных отраслях [Уголев, 2007; Плотников, 2014]. Наилучшими показателями обладает химически модифицированная древесина [Lin et al., 2018; Sangregorio et al., 2020; Čermák et al., 2022] и материалы на ее основе [Мельникова, 2007]. Особое внимание при этом уделяется такому материалу, как древесноволокнистые плиты (ДВП) [Мерсов, 1989].

Сырьём для производства ДВП служат переработанные в древесное волокно древесная щепа, дроблёнка и др. При изготовлении ДВП используются kleящие материалы и специальные добавки, такие как антиpirены, антисептики и другие компоненты. Производство твердых и сверхтвердых ДВП сопряжено с их пропиткой талловым маслом и другими материалами [Мерсов, 1989]. Применение таллового масла позволяет повысить прочностные показатели плит на 20–30%.

ДВП – дешевый и доступный продукт, который находит применение в промышленном и гражданском строительстве, производстве мебели, вагоностроении, столярных изделиях и других областях [Мерсов, 1989]. Однако, как и все существующие материалы, ДВП имеют как достоинства, так и недостатки. Основными слабыми местами, снижающими возможность широкого использования ДВП, являются низкая водостойкость, нестабильность физико-механических показателей, линейная деформация в условиях переменной влажности. Для решения этих вопросов важную роль играет использование эффективных проклеивающих и пропитывающих составов [Пиргач и др., 1987].

Перспективными реагентами для обработки ДВП могут служить продукты, изготовленные из отходов и побочных продуктов химической и нефтехимической промышленности [Никулин, 2005]. В настоящее время в промышленных масштабах был освоен выпуск низкомолекулярных полимеров (олигомеров), которые нашли свое применение в производстве лакокрасочных материалов, а также в композиционных составах различного назначения [Думский, 1988; Филимонова, 2009]. Использование продукции, изготовленной из отходов и побочных продуктов действующих производств, обеспечивает возможность более полного и рационального ис-

пользования природных ресурсов, а также снижения загрязнения окружающей среды. Употребление вторичного сырья позволит снизить затраты первичных ресурсов, необходимых для изготовления новой органической продукции и полимерных материалов.

Одним из перспективных направлений использования продуктов, полученных из вторичного сырья, является производство модифицированной древесины. В результате химической модификации происходит заполнение пропитывающим составом анатомических элементов древесины, в частности, заполняются поры, состав проходит по сердцевинным лучам и обволакивает волокнистые элементы, что позволяет повысить влаго- и водостойкость древесных материалов.

Перспективным модифицирующим материалом может служить олигомер, приготовленный при комплексной переработке двух и более видов отходов – из отходов нефтехимии и из отходов полистирола (ВПС). Данний прием позволяет утилизировать одновременно два вида отходов.

Целью данной работы является исследование процесса модификации древесноволокнистых плит олигомером, приготовленным из отходов нефтехимии и полистирола.

Методика исследований. Для модификации ДВП использовали состав на основе олигомера, приготовленного из побочных продуктов производства полибутадиена (ПППБ) (содержание связанного стирола 50%, алюмосиликатный катализатор, 160 °C, 24 ч) [Никулин, 2005] в сочетании с ВПС. ВПС вводили в количестве от 10 до 40% в олигомер из ПППБ. Общее содержание стирола в олигомере изменялось от 60 до 90%. После введения ВПС в олигомер на основе ПППБ в систему загружали сиккавтив НФ-1 (5,0% на олигомерно-полимерную смесь). Полученный композит гомогенизировали при 200–220 °C в течение 7 ч.

Модификация ДВП приведенным выше олигомерным составом будет сопровождаться как снижением молекулярной массы ВПС и олигомера на основе ПППБ, так и сшивкой олигомерных молекул с образованием разветвленных и сшитых структур. При этом будет теряться растворимость не только в воде, но и в углеводородных растворителях [Пчелинцев, 1986; Грасси и др., 1988]. Прохождение ряда конкурирующих процессов сопровождается возникновением олигомерных молекул с повышенным содержанием стирола. При этом протекает прививка к молекулам олигомера на основе ПППБ как отдельных молекул стирола, так и полистирольных фрагментов, состоящих из двух, трех, четырех и более звеньев стирола. Протекание распада олигомерных цепей в присутствии кислорода воздуха будет способствовать появлению в структуре возникающего олигомера кислородсодержащих функциональных групп. Появление содержащих

кислород функциональных групп в макромолекулах олигомера повышает не только его сродство к компонентам древесного вещества, но и способствует образованию разноплановых видов связи (водородные, силы Вандер-Ваальса и др.) окисленного компонента с целлюлозой, гемицеллюлозой и лигнином. При высокотемпературной обработке смеси олигомера на основе ППППБ с ВПС в приготовленном нанокомпозите содержатся макромолекулы: олигомер на основе ППППБ с разным содержанием стирола, полистирол, продукты окисления и др. Протекание данных процессов подтверждается результатами химического анализа (изменение кислотного и бромного чисел). Бромное число снижается, а кислотное – повышается. Снижение бромного числа связано с участием в данных процессах соединений с кратными связями олигомера из ППППБ. Показатели полученного олигомерного продукта представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Кислотные и бромные числа олигомеров на основе ППППБ,
модифицированных вторичным полистиролом**

**Acid and bromine numbers of oligomers
based on PPPPB modified with secondary polystyrene**

Продукты	Продолжительность обработки, ч	Кислотное число, мг КОН/г	Бромное число, мг Br ₂ /100 г
Олигомер на основе ППППБ с добавкой вторичного полистирола (10%)	1	2,34	108
	3	2,92	99
	5	3,44	93
	7	3,57	91
Олигомер на основе ППППБ с добавкой вторичного полистирола (20%)	1	2,07	101
	3	2,25	95
	5	2,38	90
	7	2,40	87
Олигомер на основе ППППБ с добавкой вторичного полистирола (30%)	1	1,92	94
	3	1,96	90
	5	2,06	86
	7	2,11	84
Олигомер на основе ППППБ с добавкой вторичного полистирола (40%)	1	1,90	87
	3	1,84	80
	5	1,73	76
	7	1,70	73

Молекулярная масса приготовленного олигомерного состава изменилась от 4000 до 7000 с повышением ВПС в композите с 10 до 40%.

Введение 5,0% сиккатива при совместной переработке используемых отходов исключает необходимость дополнительного введения сиккатива в приготовленный состав для дальнейшего структурирования данного композита. Это связано с тем, что оставшийся сиккатив будет выполнять функцию структурирующего агента [Сорокин и др., 1989] в полученном олигомерном составе модификатора при эксплуатации изделий из модифицированных ДВП.

Для пропитки применяли толуольный раствор приготовленного модификатора с концентрацией $50 \pm 5\%$.

Использование олигомерных модификаторов, приготовленных на основе ППППБ и ВПС, в деревообработке способствует повышению гидрофобности и прочностных показателей модифицированных ДВП. Интерес к использованию олигомерных модификаторов на основе отходов нефтехимии в деревообрабатывающей промышленности базируется на их невысокой стоимости и доступности потребителю. Такие производства могут быть реализованы на действующих предприятиях, производящих изделия из ДВП. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили это.

Изготовленные по стандартной технологии ДВП толщиной 3,2 мм погружали в приготовленный толуольный раствор олигомера, содержащий сиккатив. Введение олигомерного композита в ДВП проводили путем погружения плит в пропиточную ванну, содержащую толуольный раствор олигомеров. Пропитку плит проводили при температуре 60–70 °C в течение 1 мин. Этого времени достаточно для полной пропитки ДВП мокрого способа производства. Из пропитанных образцов предварительно отгоняли растворитель и подвергали термообработке при 160–165 °C в течение 5 ч. В данных условиях протекал ряд процессов: структурирование олигомера, частичная его деструкция, окислительные процессы. Содержание олигомерного модификатора в ДВП составляло 15,3–16,5%.

Результаты исследований. Результаты испытаний ДВП, модифицированных олигомером на основе ППППБ и ВПС, представлены в табл. 2.

Анализ экспериментальных данных показывает, что ДВП, пропитанные олигомерным составом на основе ППППБ и модифицированного ВПС, обладают повышенными прочностными показателями и устойчивостью к действию воды и влаги. С увеличением содержания ВПС в олигомере из ППППБ прочность ДВП повышалась, а водопоглощение и разбухание по толщине уменьшались. По своим показателям модифицированные олигомерными продуктами ДВП относились к твердым и сверхтвердым с повышенной прочностью (ГОСТ 4598-2018).

Таблица 2

Показатели образцов ДВП, обработанных олигомерным материалом на основе ППППБ и ВПС

Indicators of fiberboard samples treated with a polymer material based on PPPPB and UPC

Показатели	Количество вводимого ВПС в олигомер из ППППБ при производстве пропитывающего состава, %				
	0	10	20	30	40
Прочность при изгибе, МПа	45,1	47,5	50,7	54,9	55,1
Разбухание по толщине, %	14,6	13,3	12,1	10,4	9,8
Водопоглощение, %	11,7	10,9	9,6	8,3	7,0

Эффективность замены первичного стирола на ВПС подтверждается проведенными сравнительными экспериментальными исследованиями для плит, обработанных пропитывающими составами на основе олигомерного модификатора, приготовленного на основе ППППБ с добавкой стирольного мономера. Основные показатели полученных ДВП представлены в табл. 3.

Таблица 3

Показатели образцов ДВП, обработанных олигомерным материалом на основе ППППБ

Indicators of fiberboard samples treated with an oligomeric material based on PPPPB

Показатели	Содержание стирола в олигомере из ППППБ, %				Талловое масло
	60	70	80	90	
Прочность при изгибе, МПа	45,1	47,5	50,7	54,9	38,6
Разбухание по толщине, %	14,6	13,3	12,1	10,4	18,1
Водопоглощение, %	11,7	10,9	9,6	8,3	13,5

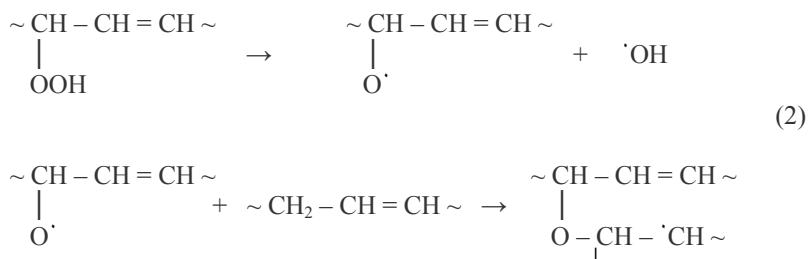
Примечание: содержание таллового масла в ДВП 13,9% мас.

Сравнительный анализ представленных в табл. 2 и 3 результатов показывает, что замена первичного мономерного стирола на ВПС является перспективной и с практической точки зрения целесообразной.

Модифицированные образцы ДВП подвергали высокотемпературной обработке при температуре 160–165 °C в течение 5 ч. В данных условиях протекают параллельно два процесса – дополимеризация незаполимеризовавшихся соединений и структурирование олигомера в матрице ДВП. При этом нельзя исключать и протекание деструкционных процессов, протекающих в присутствии кислорода воздуха и приводящих к дополнительному появлению содержащих кислород функциональных групп в молекулах олигомера (гидроксильных, карбонильных, карбоксильных). Протекание данных процессов может быть описано следующими реакциями. Образующиеся радикалы будут взаимодействовать с кислородом с получением гидропероксида:



Возникающие свободные радикалы будут способствовать соединению друг с другом олигомерных цепей химическими связями с образованием трехмерной сетки. Это приводит к потере способности полученных полимерных композитов плавиться, растворяться и пластически деформироваться.



Выводы. Для повышения эксплуатационных свойств плитных материалов на основе древесного волокна могут быть использованы олигомерные продукты, приготовленные на основе отходов и побочных продуктов нефтехимии и вторичных полимеров. Модифицированные такими олигомерными продуктами ДВП приобретают свойства твердых и сверхтвердых плит с повышенными прочностными показателями и низкими значениями водопоглощения и разбухания по толщине.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Грасси Н., Скотт Дж. Деструкция и стабилизация полимеров. М.: Мир, 1988. 446 с.
- Думский Ю.В. Нефтеполимерные смолы. М.: Химия, 1988. 168 с.
- Мельникова Л.В. Технология композиционных материалов из древесины. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2007. 235 с.
- Мерсов Е.Д. Производство древесноволокнистых плит. М.: Высш. шк., 1989. 231 с.
- Никулин С.С. Полимерные материалы на основе отходов производства полибутadiена // Производство и использование эластомеров. 2005. № 5. С. 8–13.
- Пиргач А.А., Сомова А.И., Стехун А.И. Использование гидрофобизирующих и упрочняющих добавок в производстве древесноволокнистых плит. М.: ВНИПЭИлеспром, 1987. 40 с.
- Плотников С.М. Формирование и обработка стружечного ковра в производстве древесных плит. Красноярск: СибГТУ, 2014. 165 с.
- Пчелинцев В.В. Термоокислительная деструкция диеновых каучуков. М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1986. 52 с.
- Сорокин М.Ф., Кочнова З.А., Шодэ Л.Г. Химия и технология пленкообразующих веществ. М.: Химия, 1989. 446 с.
- Уголев Б.Н. Древесиноведение и лесное товароведение. М.: Изд-во МГУЛ, 2007. 351 с.
- Филимонова О.Н. Переработка и применение кубовых остатков ректификации стирола. М.: Академия Естествознания, 2009. 78 с.
- Čermák P., Baar J., Dömöny J., Výbohová E., Rousek R., Pařil P., Oberle A., Čabalová I., Hess D., Vodák M., Brabec M. Wood-water interactions of thermally modified, acetylated and melamine formaldehyde resin impregnated beech wood // Holzforschung. 2022. Vol. 76, iss. 5. P. 437–450. DOI: 10.1515/hf-2021-0164
- Lin W., Huang Y., Li J., Liu Z., Yang W., Li R., Chen H., Zhang X. Preparation of highly hydrophobic and anti-fouling wood using poly(methylhydrogen)siloxane // Cellose. 2018. Vol. 25. Art. no. 7341. DOI: 10.1007/s10570-018-2074-y
- Sangregorio A., Muralidhara A., Guigo N., Thygesen L.G., Marlair G., Angelici C., Jong E. de, Sbirrazzuoli N. Humin based resin for wood modification and property improvement // Green Chemistry. 2020. T. 22, no. 9. P. 2786–2798. DOI: 10.1039/C9GC03620B

References

- Čermák P., Baar J., Dömöny J., Výbohová E., Rousek R., Pařil P., Oberle A., Čabalová I., Hess D., Vodák M., Brabec M. Wood-water interactions of thermally modified, acetylated and melamine formaldehyde resin impregnated beech wood. Holzforschung, 2022, vol. 76, iss. 5, pp. 437–450. DOI: 10.1515/hf-2021-0164

Dumskiy Yu.V. Petroleum polymer resins. Moscow: Chemistry, 1988. 168 p. (In Russ.)

Filimonova O.N. Processing and application of cubic residues of styrene rectification. Moscow: Academy of Natural Sciences, 2009. 78 p. (In Russ.)

Grassi H., Scott J. Destruction and stabilization of polymers. M.: Mir, 1988. 446 p. (In Russ.)

Lin W., Huang Y., Li J., Liu Z., Yang W., Li R., Chen H., Zhang X. Preparation of highly hydrophobic and anti-fouling wood using poly(methylhydrogen)siloxane. *Cellulose*, 2018, vol. 25, art. no. 7341. DOI: 10.1007/s10570-018-2074-y

Melnikova L.V. Technology of composite materials from wood. Moscow: GOU VPO MGUL, 2007. 235 p. (In Russ.)

Mersov E.D. Production of wood-fiber boards Moscow: Higher School, 1989. 231 p. (In Russ.)

Nikulin S.S. Polymer materials based on polybutadiene production waste. *Production and use of elastomers*, 2005, no. 5, pp. 8-13. (In Russ.)

Pchelintsev V.V. Thermooxidative destruction of diene rubbers. M.: Tsniiteneftekhim, 1986. 52 p. (In Russ.)

Pirgach A.A., Somova A.I., Stekhun A.I. The use of hydrophobic and strengthening additives in the production of wood-fiber boards. M.: VNIPEllesprom, 1987. 40 p. (In Russ.)

Plotnikov S.M. Formation and processing of chipboard carpet in the production of wood slabs. Krasnoyarsk: SibSTU, 2014. 165 p. (In Russ.)

Sorokin M.F., Kochnova Z.A., Shode L.G. Chemistry and technology of film-forming substances. M.: Chemistry, 1989. 446 p. (In Russ.)

Sangregorio A., Muralidhara A., Guigo N., Thygesen L.G., Marlair G., Angelici C., Jong E. de, Sbirrazzuoli N. Humin based resin for wood modification and property improvement. *Green Chemistry*, 2020, vol. 22, no. 9, pp. 2786–2798. DOI: 10.1039/C9GC03620B.

Ugolev B.N. Wood science and forest commodity science. M.: MSFU, 2007. 351 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 22.12.2023

Никулина Н.С., Дмитренков А.И., Никулин С.С. Модификация древесноволокнистых плит олигомером на основе отходов нефтехимии и полистирола // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 252. С. 372–381. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.372-381

В настоящее время в промышленных масштабах освоен выпуск низкомолекулярных полимеров (олигомеров), которые нашли свое применение в производстве лакокрасочных материалов, а также в композиционных составах различного назначения. Разработаны и исследованы новые составы на основе отходов нефтехимии и полистирола для модифицирования древесноволокнистых плит с целью повышения их гидрофобных свойств и прочностных показателей. Для модификации древесноволокнистых плит использовали состав на основе олигомера, приготовленного из побочных продуктов производства полибутадиена

(содержание связанного стирола 50%, алюмосиликатный катализатор, 160 °C, 24 ч) в сочетании с вторичным полистиролом. Молекулярная масса приготовленного олигомерного состава изменялась от 4000 до 7000 с повышением содержания вторичного полистирола в композите с 10 до 40%. Введение олигомерного продукта в древесные плиты проводили в виде толуольного раствора с добавкой нафтенового сиккатива. Из пропитанных образцов древесноволокнистых плит удаляли растворитель и проводили высокотемпературную обработку модифицированных плит при температуре 160–165 °C. При высокотемпературной обработке происходила дополнительная отгонка остатков растворителя и других низкомолекулярных фракций. Это обеспечивало экологичность получаемым модифицированным плитам, а присутствие сиккатива обеспечивало протекание процессов структурирования олигомера с образованием древесно-полимерного каркаса. Протекающие при этом окислительные процессы обеспечивали усиление связи между древесными волокнами и молекулами олигомера за счет межмолекулярного взаимодействия между полярными группами древесного вещества и модификатора. Это позволяет обеспечить модифицированным плитам повышенные физико-механические показатели и существенно снизить их водопоглощение и разбухание.

Ключевые слова: древесноволокнистые плиты, отходы, олигомеры, модификация, водопоглощение, разбухание.

Nikulina N.S., Dmitrenkov A.I., Nikulin S.S. Modification of fiberboard with an oligomer based on petrochemical and polystyrene waste. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 252, pp. 372–381 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.372-381

Currently, the production of low molecular weight polymers (oligomers) has been mastered on an industrial scale, which have found their application in the production of paints and varnishes, as well as in composite compositions for various purposes. New compositions based on petrochemical waste and polystyrene have been developed and investigated for modifying wood-fiber boards in order to increase their hydrophobic properties and strength indicators. To modify the fiber-wood slabs, an oligomer-based composition prepared from polybutadiene by-products (50% styrene bound content, aluminosilicate catalyst, 160 °C, 24 h) in combination with secondary polystyrene was used. The molecular weight of the prepared oligomeric composition varied from 4000 to 7000, with an increase in the content of secondary polystyrene in the composite from 10 to 40%. The introduction of the oligomeric product into wood slabs was carried out in the form of a toluene solution with the addition of naphthenic siccative. Solvent was removed from impregnated samples of wood-fiber boards and high-temperature treatment of modified boards was carried out at a temperature of 160-165 °C. During high-temperature processing, additional distillation of solvent residues and other low-molecular fractions took place. This ensured the environmental friendliness of the modified plates obtained, and the presence of a siccative ensured the flow of the oligomer structuring processes with

the formation of a wood-polymer frame. The oxidative processes occurring in this case provided an increase in the bond between wood fibers and oligomer molecules due to the intermolecular interaction between the polar groups of the woody substance and the modifier. This makes it possible to provide modified plates with increased physical and mechanical properties and significantly reduce their water absorption and swelling.

К e y w o r d s : fiberboard, waste, oligomers, modification, water absorption, swelling.

НИКУЛИНА Надежда Сергеевна – старший преподаватель кафедры пожарной безопасности Воронежского института повышения квалификации сотрудников ГПС МЧС России, кандидат технических наук. ORCID: 0000-0003-2586-7738.

394052, ул. Краснознаменная, д. 231, г. Воронеж, Россия. E-mail: nad.nikulina2013@yandex.ru

NIKULINA Nadezhda S. – PhD (Technical), Senior Lecturer of the Department of Fire Safety, Voronezh Institute for Advanced Training of Employees of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia. ORCID: 0000-0003-2586-7738.

394052. Krasnoznamennaya str. 231. Voronezh. Russia. E-mail: nad.nikulina2013@yandex.ru

ДМИТРЕНКОВ Александр Иванович – доцент кафедры химии Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, кандидат технических наук. ORCID: 0000-0001-9296-1762.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: dmitrenkov2109@mail.ru

DMITRENKOV Aleksandr I. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Chemistry, Voronezh State Forestry Engineering University. ORCID: 0000-0001-9296-1762.

394087. Timiryazeva str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: dmitrenkov2109@mail.ru

НИКУЛИН Сергей Саввович – профессор кафедры технологии органического синтеза, переработки полимеров и техносферной безопасности Воронежского государственного университета инженерных технологий, доктор технических наук. ORCID: 0000-0002-7093-3274.

394018, пр. Революции, д. 19, г. Воронеж, Россия. E-mail: nikulin.nikuli@yandex.ru

NIKULIN Sergey S. – DSc (Technical), Professor of the Department of Technology of Organic Synthesis, Polymer Processing and Technosphere Safety, Voronezh State University of Engineering Technologies. ORCID: 0000-0002-7093-3274.

394018. Revolution av. 19. Voronezh. Russia. E-mail: nikulin.nikuli@yandex.ru

Г.И. Мальцев, Ю.Л. Юрьев

ПРИМЕНЕНИЕ БУТАДИЕН-НИТРИЛЬНЫХ ЛАТЕКСОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ БУМАГОПОДОБНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Введение. Технологические процессы производства целлюлозы и бумаги, а также волокнистых бумагоподобных материалов связаны с потреблением больших количеств воды ($150\text{--}500 \text{ м}^3/\text{т}$) и относятся к числу наиболее экологически опасных, поскольку сопровождаются образованием сложных по составу загрязненных сточных вод, содержащих трудноокисляемые вещества и токсичные соединения, сброс которых вызывает устойчивое загрязнение природных водоемов [Sharma et al., 2023; Bagchi et al., 2024; Steephen et al., 2024].

Для уменьшения антропогенного воздействия на окружающую среду предприятий целлюлозно-бумажной промышленности необходимо осуществление комплекса природоохранных мероприятий, включающих разработку экологически чистых (малоотходных и безотходных) технологических процессов, применение нового оборудования и видов сырья, обезвреживание и ликвидацию опасных отходов [Axelrod et al., 2023; Yang et al., 2023; Romaní et al., 2024].

Ключевой задачей при создании экологически чистых производств является разработка и внедрение принципиально новых, нетрадиционных технологических процессов и оборудования. Новые технологии позволяют решать проблемы комплексного использования сырьевых и энергетических ресурсов, существенно снижать материоемкость, энергоемкость и трудоемкость производства за счет широкого использования современных положений физической и коллоидной химии, трактующих процессы взаимодействия ингредиентов волокнистой суспензии – целлюлозных и асbestовых волокон – с дисперсиями синтетических латексов и реагентов на основе канифоли, в частности, с использованием теории устойчивости лиофобных коллоидов Дерягина–Ландау–Фервея–Овербека (ДЛФО) [Дерягин и др., 1985].

При разработке экологически безопасных технологий изготавливают новые конструктивные материалы, в частности, асbestовый картон различного технического назначения (покровные материалы для защиты теплоизоляции трубопроводов и оборудования; биологически стойкая подоснова для линолеума и кровельных материалов; облицовочный ламинат и др.), обладающий высокой негорючностью, устойчивостью в воде и агрессивных средах [Modica et al., 1983; Elovenko, Kräusel, 2019; Obmiński, 2020]. Разра-

батываемые технологии позволяют утилизировать ограниченно используемый низкосортный коротковолокнистый хризотил-асбест, по запасам которого Российской Федерации занимает второе место в мире [Tan et al., 2021; Akylbekov et al., 2023; Avataneo et al., 2023]. Предусматривается использование в качестве регуляторов агрегативной и сорбционной устойчивости дисперсной фазы проклеивающих агентов (синтетические латексы, реагенты на основе канифоли) – смешанных Al-Fe- и Fe-содержащих коагулянтов, полученных из природных видов сырья (нефелины, бокситы, каолины, альбиты) и промышленных отходов (красные шламы производства глинозема, некондиционные железные руды, высокожелезистые бокситы, колчеданные огарки). Они являются альтернативой дорогим сульфату алюминия и гидроксиду алюминия – полупродукту производства металлического алюминия [Sengil A., 1995; Chen et al., 2020; Bakatovich et al., 2022; Zeng et al., 2022; Castoldi et al., 2023; Geng et al., 2023; Yi et al., 2024].

Проклейка – процесс придания бумаге и картону заданной впитывающей способности, являющейся результатом сложных коллоидно-химических взаимодействий волокнистых, гидрофобизирующих, наполняющих и коагулирующих материалов [Губарев, 2000]. Большое влияние на потребительские свойства фабrikата оказывают условия проклейки: агрегативная и адсорбционная устойчивость дисперсий; поверхностное натяжение; вязкость; температура; pH; жесткость производственной воды; степень гидрофобности поверхности частиц и др. [Москвитин, 1974; Энгельгардт и др., 1975; Фляте, 1986].

При изготовлении бумаги и картона из органических волокон механическую прочность листа обусловливают межволоконные связи в бумаге, в первую очередь водородные связи, обеспечивающие три четверти общей прочности межволоконных связей. Наряду с водородными связями известную роль играют силы Ван-дер-Ваальса, а также силы трения между волокнами [Машинь, ... 1973; Дубовый, 2000].

При использовании асbestовых волокон, которые сами по себе не образуют прочных межволоконных связей, для придания прочности готовым изделиям в качестве связующего обычно используют синтетические латексы. Проклейка асbestового волокна латексом – сложный процесс, зависящий от многих факторов, связанных между собой. Главное условие высоких показателей асболатексных бумаг и картонов – равномерность осаждения полимера латекса на волокне и высокие адгезионные качества связующего, способствующие образованию прочной связи в системе «волокно–полимер» [Еркова, Чечик, 1983].

Материалы и методика исследования. Цель исследования – влияние концентрации и природы синтетических латексов на физико-механические свойства бумагоподобного материала – асbestового картона. В качестве

связующих рассмотрена возможность применения бутадиен-нитрильных латексов БСНК, БН-30, СКН-40-1ГП, СКН-40ИХ, БН-30К-2, БН-26НГП для проклейки асбестового волокна сорта М-4-20; в качестве коагулянта использовали сульфат алюминия. Бутадиен-нитрильные сополимеры и вулканизаты обладают повышенной адгезией к разным материалам, поэтому их латексы в качестве клеев используют для проклейки волокон. Введение относительно полярного акрилонитрила ($\text{CH}_2 = \text{CH} - \text{CN}$) в состав неполярной бутадиеновой цепи приводит к нерастворимости полимера в алифатических углеводородах. С ростом концентрации в цепи нитрильных звеньев растет энергия когезии полимера, что повышает температуру стеклования. В отличие от неполярных бутадиен-стирольных сополимеров соединения бутадиена с полярным акрилонитрилом совместимы со смолами (продукты конденсации альдегидов с фенолами) и с поливинилхлоридом. Введение в эластомерные композиции смол, поливинилхлорида повышает прочность и жесткость резин. Смолы являются антиоксидантами, а поливинилхлорид придает соединениям огнестойкость.

Навеску 100 г хризотил-асбеста распускали при перемешивании в 0,5 дм³ воды в течение 5 мин, затем добавляли 10–60 г латекса, после чего через 5 мин вводили раствор коагулянта, содержащий 3–10 г сульфата алюминия. После окончания проклейки в течение 10 мин волокнистую суспензию помещали в лабораторный листоотливной аппарат ТАРРИ. Полученную отливку сушили до постоянного веса, затем определяли основные физико-механические показатели образца асбокартона: разрывная длина (L , м); сопротивление раздирианию (E , мН); сопротивление продавливанию (P_o , кПа); впитываемость при одностороннем смачивании (G , г/м²); капиллярная впитываемость (B , мм); степень проклейки (C , с/мм).

Результаты исследования. Прочностные свойства отливок с бутадиен-нитрильными латексами, за исключением БН-26НГП, близки друг к другу: $L_{max} = 377$ –516 м при малых концентрациях (3 мас.ч.) коагулянта (рис. 1). При большей концентрации (6 мас.ч.) сульфата алюминия прочность выше у образцов с СКН-40-1ГП ($L_{max} = 427$ м) и БН-30К-2 ($L_{max} = 559$ м), что объясняется присутствием третьего сомономера – метакриловой кислоты. Для карбоксил-бутадиен-нитрильных латексов карбоксил-содержащий мономер, более равномерно входящий в состав сополимера, чем бутадиен или бутадиен-стирол, повышает адгезию полимера к различным субстратам и создает трехмерную сетку, в частности, у СКН-40-1ГП. Последнее свойство реализуется образованием солевых связей при введении в латекс оксидов поливалентных металлов, полиаминов, а также участием полимера в трехмерной сетке, создаваемой при конденсации введенных в латекс смол – формальдегидных, эпоксидных и др.

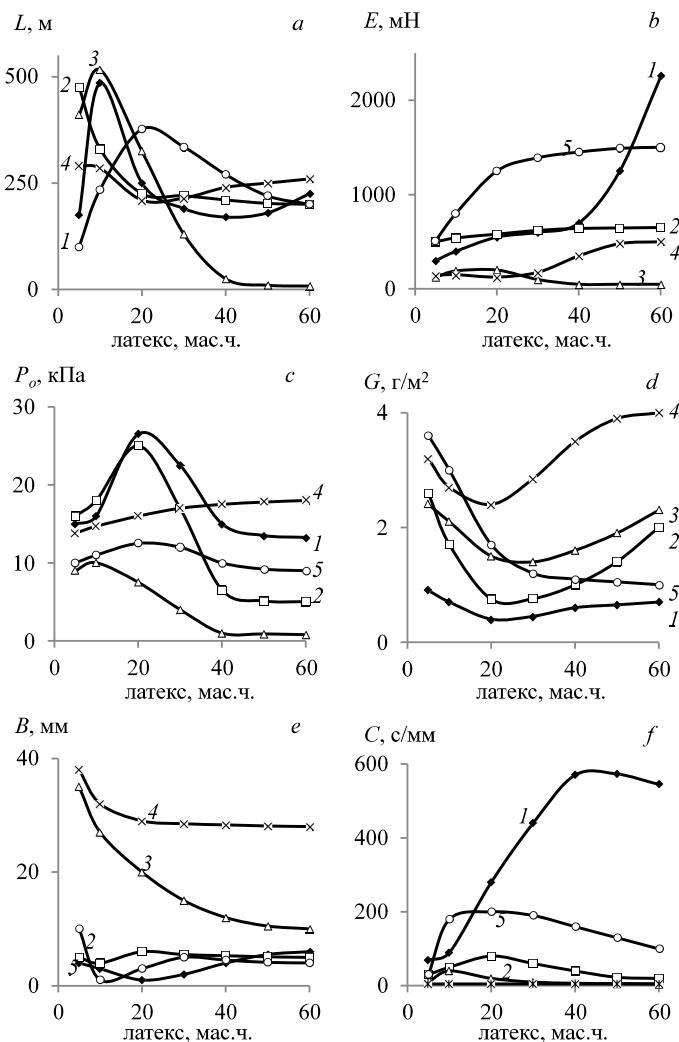


Рис. 1. Зависимость показателей асбокартона от содержания латексов при $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (3 мас.ч.): БН-30 (1); СКН-40-1ГП (2); БН-30К-2 (3); БН-26НГП (4); БСНК (5)

Fig. 1. Dependence of the indicators of asbestos cardboard on the latex content at $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (3 wt.h.): BN-30 (1); SKN-40-1GP (2); BN-30K-2 (3); BN-26NGP (4); BSNK (5)

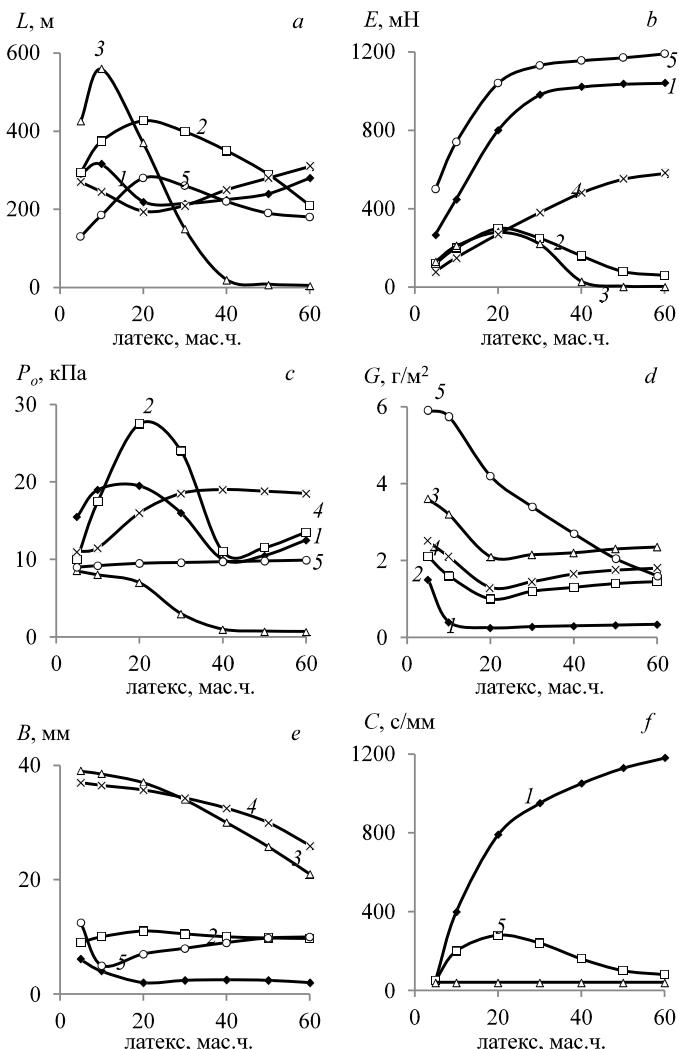


Рис. 2. Зависимость показателей асбокартона от содержания латексов при $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (6 мас.ч.):
БН-30 (1); СКН-40-1ГП (2); БН-30К-2 (3); БН-26НГП (4); БСНК (5)

Fig. 1. Dependence of the indicators of asbestos cardboard on the latex content at $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (6 wt.h.):
BN-30 (1); SKN-40-1GP (2); BN-30K-2 (3); BN-26NGP (4); BSNK (5)

Максимальные значения L (рис. 1 a , 2 a) выявлены при содержании латексов 10–20 мас.ч., кроме БН-26НГП, стабилизированного неионогенным эмульгатором ОП-10, для которого получено минимальное $L_{min} = 325/195$ м при содержании связующего 20 мас.ч. и коагулянта 3/6 мас.ч., что обусловлено различным механизмом коагуляции латексов, стабилизированных ионогенными и неионогенными ПАВ, когда коагулирующее действие электролита связано не со снижением барьера электростатического отталкивания, а с дегидратацией и высаливанием эмульгатора в адсорбционных слоях. Взаимодействие дегидратированных адсорбционных слоев ведет к агрегации частиц и коагуляции латекса. Наличие экстремальной зависимости значений L от содержания бутадиен-нитрильных латексов, проходящей через максимум, связано с достаточно равномерным осаждением связующих на волокне при малых концентрациях латексов (5–20 мас.ч.) и коагулянта (3–6 мас.ч.). При содержании в композиции БН-30К-2 выше 20 мас.ч., стабилизированного бензилсульфаниловым калием, происходит интенсивная гомокоагуляция латекса и комкование бумажной массы, что делает невозможным отлив асбокартона.

Сопротивление раздирианию E увеличивается при возрастании концентрации бутадиен-нитрильных латексов в исходной массе (кривые 1 b , 2 b). С увеличением плотности бумаги и уменьшением ее растяжения сила (работа) для раздириания листа уменьшается из-за концентрации силы. При увеличении содержания связующего, гомокоагуляции латекса и комковании массы структура асбокартона разупорядочивается, удельный объем (пухлость) листа растет за счет увеличения грубости волокон, которые лучше распределяют прилагаемое к испытуемому образцу усилие, и E возрастает. $E_{max} = 1312\text{--}1560$ мН для БСНК, содержащего в сополимере 32 мас.ч. стирола, что согласуется с данными о повышении прочностных свойств невулканизированных пленок при введении стирола в структуру бутадиен-нитрильного сополимера.

Прочность образцов на продавливание P_o согласуется с прочностью на разрыв L : при увеличении количества латексов до 20 мас.ч. растет число межволоконных связей, средняя длина волокон и значения P_o (кривые 1 -3 , 5 рис. 1 c ; кривые 1,2 рис. 2 c). При большом количестве связующего P_o уменьшается, как и L , вследствие преобладания гомокоагуляции латексов и комкования массы. Лучшими показателями P_o обладают отливки с латексами (20 мас.ч.), кПа: 20–27 – БН-30; 25–28 – СН-40-1ГП.

Показатели гидрофобности асбокартона G (кривые 1–4 рис. 1 d ; кривые 1,2,4 рис. 2 d) и B (кривые 1,4,5 рис. 1 e ; кривые 1,5 рис. 2 e) уменьшаются до

минимума в интервале содержания связующего 5–20 мас.ч. не только из-за уменьшения пухлости отливок, но и за счет равномерного осаждения латекса на волокне, G_{min} , г/м² / B_{min} , мм: 0,1–0,3/1,2–1,8 – БН-30; 1,7–4,2/0,4–4 – БСНК. При содержании >20 мас.ч. нитрильных латексов, имеющих в составе сополимера полярные сомономеры (акрилонитрил, метакрилат) и увеличивающих сродство к воде, гидрофобность изделий ухудшается. Степень проклейки C возрастает с увеличением содержания (5–20 мас.ч.) нитрильных латексов, достигая максимума, с/мм: 292 – БСНК; 983 – БН-30. Итак, все нитрильные латексы, кроме БН-26НГП с ОП-10, можно использовать для получения асбокартона с высокими прочностными и гидрофобными свойствами, по совокупности которых лучшие показатели установлены для БН-30 и БСНК. Латекс БН-30 с низкой агрегативной устойчивостью эмульгирован парафинатом калия и в небольших количествах способен равномерно осаждаться на минеральном волокне. Латекс БСНК придает асбокартону низкую влагоемкость и высокое сопротивление продавливанию P_o , что обусловлено присутствием стирола в бутадиен-нитрильном сополимере, повышающем прочность невулканизированных пленок.

Выводы. Прочностные свойства отливок с бутадиен-нитрильными латексами, кроме БН-26НГП, стабилизированного неионогенным эмульгатором ОП-10, близки друг к другу: $L_{max} = 377$ –516 м при малых концентрациях (3 мас.ч.) коагулянта. При большей концентрации (6 мас.ч.) сульфата алюминия прочность выше у образцов с СКН-40-1ГП ($L_{max} = 427$ м) и БН-30К-2 ($L_{max} = 559$ м), что объясняется присутствием третьего сомономера – метакриловой кислоты.

Наличие экстремальной зависимости значений L от содержания латексов, проходящей через максимум, связано с достаточно равномерным осаждением связующих на волокне при малых концентрациях связующих (5–20 мас.ч.) и коагулянта (3–6 мас.ч.). При содержании в композиции латекса БН-30К-2 в количестве выше 20 мас.ч., стабилизированного бензилсульфаниловым калием, происходит интенсивная гомокоагуляция латекса и комкование бумажной массы, что делает невозможным качественный отлив асбокартона.

Показатели гидрофобности асбокартона G (кривые 1–4 рис. 1d; кривые 1,2,4 рис. 2d) и B (кривые 1,4,5 рис. 1e; кривые 1,5 рис. 2e) уменьшаются до минимума в интервале содержания связующего 5–20 мас.ч. не только из-за уменьшения пухлости отливок, но и за счет равномерного осаждения латекса на волокне. G_{min} , г/м² / B_{min} , мм: 0,1–0,3/1,2–1,8 – БН-30; 1,7–4,2/0,4–4 – БСНК. При содержании >20 мас.ч. нитрильных латексов, имеющих в со-

ставе сополимера полярные сомономеры (акрилонитрил, метакрилат) и увеличивающих сродство к воде, гидрофобность изделий ухудшается.

Исследованные нитрильные латексы, кроме БН-26НГП с ОП-10, можно использовать для получения асбокартона с высокими прочностными и гидрофобными свойствами, по совокупности которых лучшие показатели установлены для БН-30 и БСНК. Латекс БН-30 с низкой агрегативной устойчивостью эмульгирован парафинатом калия и в небольших количествах способен равномерно осаждаться на минеральном волокне. Латекс БСНК придает асбокартону низкую влагоемкость и высокое сопротивление прдавливанию P_o , что обусловлено присутствием стирола в бутадиен-нитрильном сополимере, повышающем прочность невулканизированных пленок.

Вклад авторов. Мальцев Г.И. – формулировка задачи исследований, выполнение экспериментов, анализ и обобщение полученных данных (70%); Юрьев Ю.Л. – проведение анализов по определению физико-механических показателей опытных отливок асбокартона (30%).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Губарев А.А. Проклейка бумаги и картона в нейтральной среде с использованием сернокислого алюминия: автореф. дис... канд. техн. наук. Минск: БГТУ, 2000. 23 с.

Дерягин Б.В., Чураев М.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. М.: Наука, 1985. 398 с.

Дубовый В.К. Бумагоподобные композиционные материалы на основе минеральных волокон: дис. ... д-ра техн. наук. СПб.: СПбГЛТУ, 2000. 370 с.

Еркова Л.Н., Чечик О.С. Латексы. Л.: Химия, 1983. 224 с.

Машины, процессы и оборудование целлюлозно-бумажных производств: Сборник статей. Вып. 29. Л.: ЛТИ ЦБП, 1973. 185 с.

Москвитин Н.И. Физико-химические основы процессов склеивания и прилипания. М.: Лесн. пром-сть, 1974. 192 с.

Флятед М.М. Свойства бумаги. М.: Лесн. пром-сть, 1986. 680 с.

Энгельгардт Г., Границ К., Риттер К. Проклейка бумаги. М.: Лесн. пром-сть, 1975. 224 с.

Akylbekov Y., Shevko V., Karatayeva G. Thermodynamic prediction of the possibility of comprehensive processing chrysotile-asbestos waste // Case Studies in Chemical and Environmental Engineering. 2023. Vol. 8. Art. no. 100488. DOI: 10.1016/j.cscee.2023.100488

Avataneo C., Petriglieri J.R., Capella S. Chrysotile asbestos migration in air from contaminated water: An experimental simulation // Journal of Hazardous Materials. 2022. Vol. 424. Part C. Art. no. 127528. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.127528

Axelrod L., Charron P., Tahir I. The effect of pulp production times on the characteristics and properties of hemp-based paper // Materials Today Communications. 2023. Vol. 34. Art. no. 104976. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.104976

Bagchi S.K., Patnaik R., Rawat I. Beneficiation of paper-pulp industrial wastewater for improved outdoor biomass cultivation and biodiesel production using *Tetradesmus obliquus* (Turpin) Kützing // Renewable Energy. 2024. Vol. 222. Art. no. 119848. DOI: 10.1016/j.renene.2023.119848

Bakatovich A., Gaspar F., Boltrushevich N. Thermal insulation material based on reed and straw fibres bonded with sodium silicate and rosin // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 352. Art. no. 129055. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129055

Castoldi R.S., Liebscher M., Souza L.M.S. Effect of polymeric fiber coating on the mechanical performance, water absorption, and interfacial bond with cement-based matrices // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 404. Art. no. 133222. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133222

Chen J., Li X., Cai W. High-efficiency extraction of aluminum from low-grade kaolin via a novel low-temperature activation method for the preparation of poly-aluminum-ferric-sulfate coagulant // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 257. Art. no. 120399. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120399

Elovenko D., Kräusel V. The study of thermal conductivity of asbestos cardboard and fire clay powder to assess the possibility of their application in prefabricated structures of cylindrical housings of pressure vessels // Materials Today: Proceedings. 2019. Vol. 19. Part 5. P. 2389–2395. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.08.041

Geng Y., Nie Y., Du H. Coagulation performance and floc characteristics of Fe–Ti–V ternary inorganic coagulant for organic wastewater treatment // Journal of Water Process Engineering. 2023. Vol. 56. Art. no. 104344. DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.104344

Modica G., Giuffre L., Montoneri E. Electrolytic separators from asbestos cardboard: A flexible technique to obtain reinforced diaphragms or ion-selective membranes // International Journal of Hydrogen Energy. 1983. Vol. 8, iss. 6. P. 419–435. DOI: 10.1016/0360-3199(83)90163-5

Obmiński A. Asbestos in building and its destruction // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 249. Art. no. 118685. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118685

Romaní A., Del-Río P.G., Rubira A. Co-valorization of discarded wood pinchips and sludge from the pulp and paper industry for production of advanced biofuels // Industrial Crops and Products. 2024. Vol. 209. Art. no. 117992. DOI: 10.1016/j.indcrop.2023.117992

Sengil A. The utilization of alunite ore as a coagulant aid // Water Research. 1995. Vol. 29, iss. 8. P. 1988–1992. DOI: 10.1016/0043-1354(94)00534-E

Sharma D., Sahu S., Singh G. An eco-friendly process for xylose production from waste of pulp and paper industry with xylanase catalyst // Sustainable Chemistry for the Environment. 2023. Vol. 3. Art. no. 100024. DOI: 10.1016/j.scenv.2023.100024

Steephen A., Preethi V., Annenewmy B. Solar photocatalytic hydrogen production from pulp and paper wastewater // International Journal of Hydrogen Energy. 2024. Vol. 52. Part A. P. 1393–1404. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.381

Tan Y., Zou Z., Qu J. Mechanochemical conversion of chrysotile asbestos tailing into struvite for full elements utilization as citric-acid soluble fertilizer // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 283. Art. no. 124637. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124637

Yang M., Li J., Wang S. Status and trends of enzyme cocktails for efficient and ecological production in the pulp and paper industry // *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 418. Art. no. 138196. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138196

Yi J., Chen Z., Xu D. Preparation of a coagulant of polysilicate aluminum ferric from foundry dust and its coagulation performance in treatment of swine wastewater // *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 434. Art. no. 140400. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.140400

Zeng H., Tang H., Sun W. Deep dewatering of bauxite residue via the synergy of surfactant, coagulant, and flocculant: Effect of surfactants on dewatering and settling properties // *Separation and Purification Technology*. 2022. Vol. 302. Art. no. 122110. DOI: 10.1016/j.seppur.2022.122110

References

Akylbekov Y., Shevko V., Karatayeva G. Thermodynamic prediction of the possibility of comprehensive processing chrysotile-asbestos waste. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2023, vol. 8, art. no. 100488. DOI: 10.1016/j.cscee.2023.100488

Avataneo C., Petriglieri J.R., Capella S. Chrysotile asbestos migration in air from contaminated water: An experimental simulation. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, vol. 424, part C, art. no. 127528. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.127528

Axelrod L., Charron P., Tahir I. The effect of pulp production times on the characteristics and properties of hemp-based paper. *Materials Today Communications*, 2023, vol. 34, art. no. 104976. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.104976

Bagchi S.K., Patnaik R., Rawat I. Beneficiation of paper-pulp industrial wastewater for improved outdoor biomass cultivation and biodiesel production using *Tetradesmus obliquus* (Turpin) Kützing. *Renewable Energy*, 2024, vol. 222, art. no. 119848. DOI: 10.1016/j.renene.2023.119848

Bakatovich A., Gaspar F., Boltrushevich N. Thermal insulation material based on reed and straw fibres bonded with sodium silicate and rosin. *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 352, art. no. 129055. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129055

Castoldi R.S., Liebscher M., Souza L.M.S. Effect of polymeric fiber coating on the mechanical performance, water absorption, and interfacial bond with cement-based matrices. *Construction and Building Materials*, 2023, vol. 404, art. no. 133222. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133222

Chen J., Li X., Cai W. High-efficiency extraction of aluminum from low-grade kaolin via a novel low-temperature activation method for the preparation of poly-aluminum-ferric-sulfate coagulant. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 257, art. no. 120399. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120399

- Deryagin B.V., Churaev M.V., Muller V.M. Surface forces. Moscow: Nauka, 1985. 398 p. (In Russ.)
- Dubov V.K. Paper-like composite materials based on mineral fibers: Dis. ... Doctor of Technical Sciences. St. Petersburg: SPbSFTU, 2000. 370 p. (In Russ.)
- Elovenko D., Kräusel V. The study of thermal conductivity of asbestos cardboard and fire clay powder to assess the possibility of their application in prefabricated structures of cylindrical housings of pressure vessels. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 19, part 5, pp. 2389–2395. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.08.041
- Engelhardt G., Border K., Ritter K. Paper sizing. Moscow: Forest industry, 1975. 224 p. (In Russ.)
- Flyate D.M. Properties of paper. Moscow: Forest industry, 1986. 680 p. (In Russ.)
- Geng Y., Nie Y., Du H. Coagulation performance and floc characteristics of Fe–Ti–V ternary inorganic coagulant for organic wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 2023, vol. 56, art. no. 104344. DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.104344
- Gubarev A.A. Gluing of paper and cardboard in a neutral environment using aluminum sulfate: author's abstract. Diss.... Candidate of Technical Sciences. Minsk: BSTU, 2000. 23 p. (In Russ.)
- Machines, processes and equipment of pulp and paper industries: collection of articles. Issue 29. Leningrad: LTI CBP, 1973. 185 p. (In Russ.)
- Modica G., Giuffre L., Montoneri E. Electrolytic separators from asbestos cardboard: A flexible technique to obtain reinforced diaphragms or ion-selective membranes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1983, vol. 8, iss. 6, pp. 419–435. DOI: 10.1016/0360-3199(83)90163-5
- Moskytin N.I. Physico-chemical bases of gluing and sticking processes. M.: Forest industry, 1974. 192 p. (In Russ.)
- Obmiński A. Asbestos in building and its destruction. *Construction and Building Materials*, 2020, vol. 249, art. no. 118685. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118685
- Romaní A., Del-Rio P.G., Rubira A. Co-valorization of discarded wood pinchips and sludge from the pulp and paper industry for production of advanced biofuels. *Industrial Crops and Products*, 2024, vol. 209, art. no. 117992. DOI: 10.1016/j.indcrop.2023.117992
- Sengil A. The utilization of alunite ore as a coagulant aid. *Water Research*, 1995, vol. 29, iss. 8, pp. 1988–1992. DOI: 10.1016/0043-1354(94)00534-E
- Sharma D., Sahu S., Singh G. An eco-friendly process for xylose production from waste of pulp and paper industry with xylanase catalyst. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 2023, vol. 3, art. no. 100024. DOI: 10.1016/j.scenv.2023.100024
- Steephen A., Preethi V., Annenewmy B. Solar photocatalytic hydrogen production from pulp and paper wastewater. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, vol. 52, part A, pp. 1393–1404. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.381
- Tan Y., Zou Z., Qu J. Mechanochemical conversion of chrysotile asbestos tailing into struvite for full elements utilization as citric-acid soluble fertilizer. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 283, art. no. 124637. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124637

Yang M., Li J., Wang S. Status and trends of enzyme cocktails for efficient and ecological production in the pulp and paper industry. *Journal of Cleaner Production*, 2023, vol. 418, art. no. 138196. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138196

Yerkova L.N., Chechik O.S. Latexes. Leningrad: Chemistry, 1983. 224 p. (In Russ.)

Yi J., Chen Z., Xu D. Preparation of a coagulant of polysilicate aluminum ferric from foundry dust and its coagulation performance in treatment of swine wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 2024, vol. 434, art. no. 140400. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.140400

Zeng H., Tang H., Sun W. Deep dewatering of bauxite residue via the synergy of surfactant, coagulant, and flocculant: Effect of surfactants on dewatering and settling properties. *Separation and Purification Technology*, 2022, vol. 302, art. no. 122110. DOI: 10.1016/j.seppur.2022.122110

Материал поступил в редакцию 31.01.2024

Мальцев Г.И., Юрьев Ю.Л. Применение бутадиен-нитрильных латексов при изготовлении бумагоподобных материалов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 252. С. 382–395. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.382-395

Цель исследования – влияние концентрации и природы синтетических бутадиен-нитрильных латексов на физико-механические свойства бумагоподобного материала на основе минеральных волокон. Методология проведения работы заключалась в изготовлении и испытании лабораторных образцов отливок асбестового картона, полученных из композиции состава, мас. ч.: 100 – асбестовое волокно сорта М-4-20; 5–60 – бутадиен-нитрильные латексы БСНК, БН-30, СКН-40-1ГП, СКН-40ИХ, БН-30К-2, БН-26НГП; 3–6 – сульфат алюминия в качестве коагулянта для проклейки асбестового волокна сорта М-4-20. Механические и гидрофобные свойства полученного материала характеризуют физико-механические показатели: разрывная длина (L , м); сопротивление раздиранию (E , мН); сопротивление продавливанию (P_o , кПа); впитываемость при одностороннем смачивании (G , г/м²); капиллярная впитываемость (B , мм); степень проклейки (C , с/мм). Результаты работы: прочностные свойства отливок с бутадиен-нитрильными латексами, за исключением БН-26НГП, близки друг к другу: $L_{max} = 377$ –516 м при малых концентрациях (3 мас.ч.) коагулянта. При большей концентрации (6 мас.ч.) сульфата алюминия прочность выше у образцов с СКН-40-1ГП ($L_{max} = 427$ м) и БН-30К-2 ($L_{max} = 559$ м), что объясняется присутствием третьего сомономера – метакриловой кислоты. Для карбоксил-бутадиен-нитрильных латексов карбоксил-содержащий мономер, более равномерно входящий в состав сополимера, чем бутадиен или бутадиен-стирол, повышает адгезию полимера к различным субстратам и создает трехмерную сетку, в частности, СКН-40-1ГП. Последнее свойство реализуется

образованием солевых связей при введении в латекс оксидов поливалентных металлов, полиаминов, а также участием полимера в трехмерной сетке. Исследованные нитрильные латексы можно использовать для получения асбокартона с высокими прочностными и гидрофобными свойствами, по совокупности которых лучшие показатели установлены для БН-30 и БСНК.

Ключевые слова: латекс, асбестовый картон, разрывная длина, сопротивление раздирианию, сопротивление продавливанию, впитываемость при одностороннем смачивании и капиллярная, степень проклейки.

Maltsev G.I., Yuryev Yu.L. The use of butadiene-nitrile latexes in the manufacture of paper-like materials. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 252, pp. 382–395 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.382-395

The aim of the study is to influence the concentration and nature of synthetic butadiene–nitrile latexes on the physical and mechanical properties of a paper-like material based on mineral fibers. The methodology of the work consisted in the manufacture and testing of laboratory samples of asbestos cardboard castings obtained from the composition of the composition, wt. h.: 100 – asbestos fiber grade M-4-20; 5–60 – butadiene-nitrile latexes BSNK, BN-30, SKN-40-1GP, SKN-40IH, BN-30K-2, BN-26NGP; for sizing M-4-20 grade asbestos fiber; 3–6 – aluminum sulfate as a coagulant. The mechanical and hydrophobic properties of the resulting material characterize the physico-mechanical parameters: breaking length (L , m); tear resistance (E , mN); penetration resistance (P_0 , kPa); absorbency with unilateral wetting (G , g/m²); capillary absorbency (B , mm); degree of sizing (C , s/mm). Results of the work: the strength properties of castings with butadiene-nitrile latexes, with the exception of BN-26NGP, are close to each other: $L_{\max} = 377$ –516 m, at low concentrations (3 wt.h.) of coagulant. At a higher concentration (6 wt.h.) of aluminum sulfate, the strength is higher in samples with SCN-40-1GP ($L_{\max} = 427$ m) and BN-30K-2 ($L_{\max} = 559$ m), which is explained by the presence of a third comonomer, methacrylic acid. For carboxyl-butadiene-nitrile latexes, carboxyl-containing monomer, which is more evenly part of the copolymer than butadiene or styrene-butadiene, increases the adhesion of the polymer to various substrates and creates a three-dimensional grid, in particular SKN-40-1GP. The latter property is realized by the formation of salt bonds when polyvalent metal oxides and polyamines are introduced into latex, as well as the participation of the polymer in a three-dimensional grid. **Conclusions:** the studied nitrile latexes can be used to produce asbestos cardboard with high strength and hydrophobic properties, according to which the best indicators were established for BN-30 and BSNK.

Keywords: latex, asbestos cardboard, breaking length, tearing resistance, punching resistance, absorbency during unilateral wetting and capillary, degree of sizing.

МАЛЬЦЕВ Геннадий Иванович – профессор кафедры химической технологии древесины, биотехнологии и наноматериалов Уральского государственного лесотехнического университета, доктор технических наук, профессор. ORCID: 0000-0002-0750-0070.

620100, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: maltsewg@yandex.ru

MALTSEV Gennady I. – DSc (Technical), Professor of the Department of Chemical Technology of Wood, Biotechnology and Nanomaterials, Ural State Forestry University. ORCID: 0000-0002-0750-0070.

620100. Siberian tract str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: maltsewg@yandex.ru

ЮРЬЕВ Юрий Леонидович – заведующий кафедрой химической технологии древесины, биотехнологии и наноматериалов Уральского государственного лесотехнического университета, доктор сельскохозяйственных наук, профессор. ORCID: 0000-0002-1187-7401.

620100, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: charekat@mail.ru

YURIEV Yuri L. – DSc (Agricultural), Professor, Head of the Department of Chemical Technology of Wood, Biotechnology and Nanomaterials, Ural State Forestry University. ORCID: 0000-0002-1187-7401.

620100. Siberian tract str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: charekat@mail.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	5
1. ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО	
<i>Егоров С.А., Крючков С.Н., Солонкин А.В., Соломенцева А.С., Горбушова Д.А.</i> Подбор основных древесных видов для создания объектов постоянной лесосеменной базы в засушливой зоне	6
<i>Трещевская Э.И., Тихонова Е.Н., Голядкина И.В., Трещевская С.В., Бобрешиов К.В., Галстян Н.В.</i> Защитные лесные полосы как составная часть мероприятий по биологической рекультивации техногенно нарушенных земель	22
<i>Данчева А.В., Залесов С.В., Рапопорт К.Э., Янишева А.Р.</i> Особенности лесовосстановительного процесса гарей малых площадей в лесостепной и таежной зонах Тюменской области	40
<i>Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П.</i> Количественные параметры хвои сосны горной при интродукции в Нижегородскую область	55
<i>Нешатаев В.Ю., Скворцов К.И., Никчемный М.Е., Нешатаева В.Ю.</i> Типологическое разнообразие каменноберёзовых лесов на юге Корякского нагорья (Камчатский край)	80
<i>Бондаренко А.С., Жигунов А.В.</i> Влияние густоты посадки на результаты оценки семей плюсовых деревьев в испытательных культурах ели европейской	106
<i>Минь Ань Хоанг, Грязкин А.В., Беляева Н.В., Волдаев Л.К., Комауз Джонас.</i> Сырьевые растения под пологом ельников Ленинградской области	125
<i>Лисотова Е.В., Сунцова Л.Н., Инишаков Е.М.</i> Влияние атмосферного загрязнения на морфометрические показатели древесных растений в условиях г. Красноярска	140
<i>Филатова М.Ю., Крупская Л.Т., Леоненко А.В.</i> Перспективы плантационного лесовыращивания на рекультивированных землях Дальневосточного федерального округа	155
<i>Штрахов С.Н., Данилов Д.А., Зайцев Д.А.</i> Особенности смоловыделения в древостоях сосны (<i>Pinus sylvestris</i> L.) разного состава и товарной структуры в черничном типе леса	170
<i>Черниховский Д.М.</i> Оценка возможностей применения материалов спутниковой съемки Sentinel-2 для определения преобладающих древесных пород при таксации лесов	188
<i>Габделхаков А.К.</i> Динамика текущего прироста древостоя липы мелколистной (<i>Tilia cordata</i> Mill.)	211

Шевелина И.В., Нагимов З.Я., Сальникова И.С., Нагимов В.З. Оценка запасов надземной фитомассы и углерод депонирующей способности сосновых древостоев в городских лесах г. Екатеринбурга	229
Ярмашко В.Т., Игнатьева О.В. Реакции старовозрастных сосен (<i>Pinus sylvestris</i> L.) на изменение окружающей среды на Кольском севере	244
Исаков И.Ю., Шестибратов К.А. Фенотипическая пластичность и селекционно-репродуктивные особенности биоресурсной коллекции рода <i>Betula</i> L. в Воронежской области	260
2. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ЛЕСОЗАГОТОВОВОК	
Куликов А.А., Иванова И.В., Дюкова И.Н. Энергия давления индивидуальной жидкой частицы	278
Царев Е.М., Рукомойников К.П., Анисимов И.С., Анисимов Н.С., Багаутдинов И.Н., Макаров В.Е. Сменные модульные рабочие органы лесозаготовительных машин	289
Трофимов А.В., Зверев И.А., Тарадин Г.С., Аввакумов М.С. О методике разработки маршрута технологического процесса изготовления изделий лесного машиностроения	304
Королько Н.С., Свойкин Ф.В., Рего Г.Э., Королько А.С., Россихин К.В., Кретинин В.И. Оптимальная схема разработки лесосеки канатной трелёвочной установкой	317
3. ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ, ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЕРЕВОПЕРЕРАБОТКИ	
Иванов Н.Г., Артеменков А.М. О возможности использования дистанционных систем контроля параметров режима и текущей влажности древесины в качестве градиентомера	335
4. ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ. БИОТЕХНОЛОГИЯ	
Леонович А.А., Замазий Л.В. Особенности древесных композиционных материалов в связи с нарушением сплошности синтетической полимерной фазы	346
Топтунов Е.А., Севастьянова Ю.В., Саврасова Ю.А., Ивахнов А.Д. Использование целлюлозы и продуктов ее переработки для получения аэрогелей	360
Никулina Н.С., Дмитренков А.И., Никulin С.С. Модификация древесноволокнистых плит олигомером на основе отходов нефтехимии и полистирола	372
Мальцев Г.И., Юрьев Ю.Л. Применение бутадиен-нитрильных латексов при изготовлении бумагоподобных материалов	382

CONTENTS

Preface	5
1. FORESTRY	
<i>Egorov S.A., Kryuchkov S.N., Solonkin A.V., Solomentseva A.S., Gorbushova D.A.</i> Selection of the main tree species for the creation of permanent forest seed base in the arid zone	6
<i>Treshchevskaya E.I., Tikhonova E.N., Golyadkina I.V., Treschevskaya S.V., Bobreshov K.V., Galstyan N.V.</i> Forest Shelterbelts as an integral part of the land reclamation on post-technogenic areas	22
<i>Dancheva A.V., Zalesov S.V., Rapoport K.E., Yanysheva A.R.</i> Features of the reforestation process of small-area burned area in the forest-steppe and taiga zone of the Tyumen region	40
<i>Besschetnova N.N., Besschetnov V.P.</i> Quantitative parameters of mountain pine needles during introduction to the Nizhny Novgorod region	55
<i>Neshataev V.Yu., Skvortsov K.I., Nikchemny M.E., Neshataeva V.Yu.</i> Typological diversity of stone-birch forests in the south of the Koryak Upland (Kamchatka Territory)	80
<i>Bondarenko A.S., Zhigunov A.V.</i> Influence of tree density on the results of evaluating families of plus trees in the progeny tests of Norway spruce	106
<i>Minh Anh Hoang, Gryazkin A.V., Belyaeva N.V., Voldaev L.K., Komaue D.</i> Raw plants under the canopy of spruce forests in the Leningrad region	125
<i>Lisotova E.V., Suntsova L.N., Inshakov E.M.</i> The influence of atmospheric pollution on the morphometric parameters of woody plants in the conditions of Krasnoyarsk	140
<i>Filatova M.Yu., Krupskaya L.T., Leonenko A.V.</i> Prospects of plantation forest cultivation on reclaimed lands of the Far Eastern Federal District	155
<i>Shtrakhov S.N., Danilov D.A., Zaytsev D.A.</i> Specific aspects of resin production in pine (<i>Pinus sylvestris</i> L.) stands of different stand composition and commodity structure in the blueberry forest type	170
<i>Chernikhovskii D.M.</i> Assessment of the possibilities of using Sentinel-2 satellite imagery materials to determine the predominant tree species in forest taxation	188
<i>Gadelkhakov A.K.</i> Dynamics of the current growth of the small-leaved linden tree stand (<i>Tilia cordata</i> Mill.)	211
<i>Shevelina I.V., Nagimov Z.Ya., Salnikova I.S., Nagimov V.Z.</i> Assessment of reserves of aboveground phytomass and carbon depositing capacity of pine stands in urban forests of Yekaterinburg	229

<i>Yarmishko V.T., Ignatyeva O.V.</i> Reactions of old-growth pines (<i>Pinus sylvestris</i> L.) to environmental changes in the Kola North	244
<i>Isakov I.Yu., Shestibratov K.A.</i> Phenotypic plasticity and breeding reproductive features in the bioresource collection of the genus <i>Betula</i> L. in the Voronezh region	260
2. TECHNOLOGY AND EQUIPMENT OF LOGGING INDUSTRIES	
<i>Kulikov A.A., Ivanova I.V., Dyukova I.N.</i> The pressure energy of an individual liquid particle	278
<i>Tsarev E.M., Rukomoinikov K.P., Anisimov I.S., Anisimov N.S., Bagautdinov I.N., Makarov V.E.</i> Replaceable modular working parts of forestry machines	289
<i>Trofimov A.V., Zverev I.A., Taradin G.S., Avvakumov M.S.</i> About the methodology for developing the route of the technological process of manufacturing forest engineering products	304
<i>Korolko N.S., Svoikin F.V., Rego G.E., Korolko A.S., Rossikhin K.V., Kretinin V.I.</i> Optimal scheme for developing a cutting area using a rope skidding installation	314
3. WOOD SCIENCE. MECHANICAL WOODWORKING INDUSTRY	
<i>Ivanov N.G., Artemenkov A.M.</i> On the possibility of using remote control systems for the parameters of the regime and the current wood moisture content as a gradiometer	335
4. CHEMICAL TECHNOLOGY OF WOOD. BIO TECHNOLOGY	
<i>Leonovich A.A., Zamaziy L.V.</i> Features of wood composite materials with a violation of the continuity of the synthetic polymer phase	346
<i>Toptunov E.A., Sevastyanova Yu.V., Savrasova Yu.A., Ivakhnov A.D.</i> Application of cellulose and its processed products for the production of aerogels	360
<i>Nikulina N.S., Dmitrenkov A.I., Nikulin S.S.</i> Modification of fiberboard with an oligomer based on petrochemical and polystyrene waste	372
<i>Maltsev G.I., Yuryev Yu.L.</i> The use of butadiene-nitrile latexes in the manufacture of paper-like materials	382

Научное издание

ИЗВЕСТИЯ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОЙ
ЛЕСОТЕХНИЧЕСКОЙ
АКАДЕМИИ

Выпуск 252

Издаются с 1886 года

Редактор В.Н. Добронравина

Компьютерная верстка Е.А. Корнуковой

Подписано в печать с оригинал-макета 20.03.2025. Выход в свет 22.04.2025. Формат 150*210.
Печать цифровая. Уч.-изд. л. 25.0. Печ. л. 25,0. Тираж 500 экз. Заказ № 100 С 212. Свободная цена

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет
имени С.М. Кирова

Издательско-полиграфический отдел СПбГЛТУ
194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., 5, литер У