

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 249

*Издаются с 1886 года*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2024

## 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. Евтигии**, д-р хим. наук, профессор, Университет Авеибу (Португалия),

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

**С.В. Залесов**, д-р с.-х. наук, проф., УГЛТУ,

**М.Е. Игнатьева**, канд. с.-х. наук, проф., Университет Западной Австралии (Австралия),

**А.А. Леонович**, д-р техн. наук, проф., СПбГЛТУ,

**С.С. Макаров**, д-р с.-х. наук, РГАУ-МСХА им. Тимирязева,

**М.Ю. Мандельштам**, д-р биол. наук, доц., СПбГЛТУ,

**Д.Л. Мусолин**, д-р биол. наук, доц., Европейская и Средиземноморская организации по карантину и защите растений (Франция),

**В.Ю. Нешатаев**, д-р биол. наук, доц., СПбГЛТУ,

**В.Н. Петров**, д-р экон. наук, проф., СПбГЛТУ,

**Е.К. Потокина**, д-р биол. наук, проф., СПбГЛТУ, СПбНИИЛХ,

**А.В. Пранович**, д-р биол. наук, Академия Або,

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

**А.С. 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., СПбГПУ, 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, СПбГПУ,

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

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

Адрес редакции, издатель:

типорграфии: 194021, г. Санкт-Петербург, Институтский пер., д. 5, литер У. Сайт организации: [www.spbftu.ru](http://www.spbftu.ru)

Факс: (812) 670-93-90.

Сайт издания: [izvestia.spbftu.ru](http://izvestia.spbftu.ru)

E-mail: [izvestiya.spbftu@mail.ru](mailto:izvestiya.spbftu@mail.ru)

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

УДК 630

**Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии:** Вып. 249. Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2024. – 356 с. – ISBN 978-5-9239-1483-2, 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 2024 г. Изд. № 205

ISBN 978-5-9239-1483-2

ISSN-р: 2079-4304, ISSN-е: 2658-5871

© Санкт-Петербургский государственный

лесотехнический университет имени С.М. Кирова

(СПбГЛТУ), 2024

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 249

*Published since 1886*

SAINT PETERSBURG  
2024

## 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. Evtugyn**, PhD, University of Aveiro (Aveiro),

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

**S.V. Zalesov**, DSc (Agriculture), Ural State Forest Engineering University (Ekaterinburg),

**M.E. Ignateva**, PhD, University of Western Australia (Perte),

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**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.*

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

*Serial's website: izvestia.spbftu.ru*

*E-mail: izvestiya.spbla@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 Lesotehnicheskoy Akademii:** Iss. 249. Saint-Petersburg: SPbFTU, 2024. – 356 p. – ISBN 978-5-9239-1483-2, ISSN-p: 2079-4304, ISSN-e: 2658-5871.

The next release of «*Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy 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 2024 r. Izd. N 205

ISBN 978-5-9239-1483-2

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

© Saint Petersburg State Forest Technical University (SPbFTU), 2024

## 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](http://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](mailto:izvestiya.spblta@mail.ru).

*Редакция*

# 1. ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

---

УДК 630.232:634.237

П.Н. Проездов, В.А. Тарбаев, П.В. Тарасенко, А.В. Розанов

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ РОСТА *ULMUS PUMILA* L. И *FRAXINUS LANCEOLATA* BORKH. В ПОЛЕЗАЩИТНЫХ ЛЕСНЫХ ПОЛОСАХ В ОРОШАЕМОМ СУХОСТЕПНОМ ЗАВОЛЖЬЕ

*Введение.* Согласно стратегии ФНЦ агроэкологии РАН вяз приземистый (*Ulmus pumila* L.) и ясень ланцетный (*Fraxinus lanceolata* Borkh.) являются одними из основных древесных пород, которые применяются в защитном лесоразведении в сухостепной и полупустынной зонах Российской Федерации [Кулик и др., 2018].

В статье А.П. Иозуса и др. [2022] указано, что распространенными древесными породами в государственных полезащитных лесных полосах сухой степи являются и интродуцированный (приземистый – *Ulmus pumila* L.), и аборигенные вязы (граболистный – *Ulmus carpinifolia* Suckow; берест – *Ulmus minor* Mill.). Произрастая совместно на лесных площадях, они могут спонтанно скрещиваться и образовывать межвидовые гибриды с эффектом гетерозиса. Графиоз – главная причина, которая сдерживает широкое использование рода вяз. Климатические факторы оказывают большее воздействие на рост и долговечность вяза, чем типы скрещивания.

В монографии А.М. Степанова [1987] представлена динамика роста древесных пород в зависимости от условий увлажнения на каштановых почвах сухостепного Поволжья, согласно которой преимущество в росте в высоту древесных пород (вяз – на 32,1%; ясень – 28,7%) обеспечивается за счет дополнительного, по сравнению с естественным фоном, увлажнения почвогрунтов, подпитываемых фильтрационными потерями воды из канала.

Н.М. Макаровой и др. [2020] рассмотрено влияние мелиоративных условий Аксайского района Ростовской области на повышение устойчивости лесных полос к болезням и вредителям. Установлено, что с повышением возраста вяза и ухудшением условий увлажнения земель (на воз-

вышенных участках рельефа) увеличивается площадь под пораженными деревьями: при возрастании до 30 лет таких площадей не обнаружено; при возрастании более 55 лет утраченная устойчивость составила 71,4%. Авторы рекомендуют реконструкцию насаждений, включающую разработку проекта и проведение работ по выкорчевке старых деревьев и посадке новых.

Изучая состояние полезащитных лесных полос Динского района Краснодарского края, Н.В. Примаков и Н.Г. Цалоева [2022] отмечают:

- лучшие показатели бонитета в чистых насаждениях робинии лжеакации (4 класс, 55 лет) и смешанных ясения ланцетного с гледичией трёхколючковой (4 класс, 65 лет) при сохранности насаждений, соответственно 83 и 74%;
- ухудшение продуктивности насаждений до 5 класса бонитета в широких лесных полосах с количеством рядов 24 (48 м) и сохранностью деревьев 58% в связи с конкурентной борьбой за влагу. Эти ученые рекомендуют полезащитные лесные полосы ажурной конструкции с шириной 10–12 м (5–6 рядов) с участием в качестве главных пород робинии лжеакации и ясения ланцетного, сопутствующих – гледичии трёхколючковой и абрикоса обыкновенного.

В статье А.С. Манаенкова и др. [2022] изложены результаты исследования долговечности и приростов в высоту и по диаметру вяза обыкновенного и других пород на каштановых почвах Западной Сибири. Установлено, что рост и долговечность древостоев находятся в большой зависимости от режима атмосферного увлажнения. Приведен анализ реакции текущего прироста в высоту и по диаметру вяза обыкновенного на флуктуации суммы атмосферных осадков за гидрологический год, холодный и теплый период. Авторы рекомендуют шире использовать чистые ряды вяза обыкновенного и своевременно проводить приемы агротехнической мелиорации и рубок ухода.

*Объект, цель, задачи и методика исследований.* Опыт проводился в сухостепном Заволжье, в ВолжНИИГиМ Энгельского района Саратовской области, на орошаемых темно-каштановых почвах средне- и тяжелосуглинистого гранулометрического состава.

Объект исследований (рис. 1) – опыт (I–IV: ПП1; ПП2; ПП3; ПП4) с лесными полосами плотной конструкции возрастом 62 года, расположенным по периметру участка, орошаемого дождевальными машинами «Фрегат» различной модификации. Тип посадки – древесно-теневой. Глав-

ная порода – вяз приземистый (*Ulmus pumila* L.), сопутствующая – ясень ланцетный (*Fraxinus lanceolate* Borkh.).

Целью исследования было установление закономерностей роста вяза приземистого и ясения ланцетного в полезащитных лесных полосах орошаемого сухостепного Заволжья в зависимости от их удаленности от оросительного канала с расходом  $18 \text{ м}^3/\text{с}$ .

В задачи исследования входило:

- определение лесоводственно-таксационных показателей вяза и ясения: диаметра, высоты, напряженности роста, продуктивности древесной ткани, конкурентных отношений, бонитета, сохранности;
- установление регрессионно-корреляционных зависимостей роста и развития вяза и ясения в полезащитных лесных полосах.

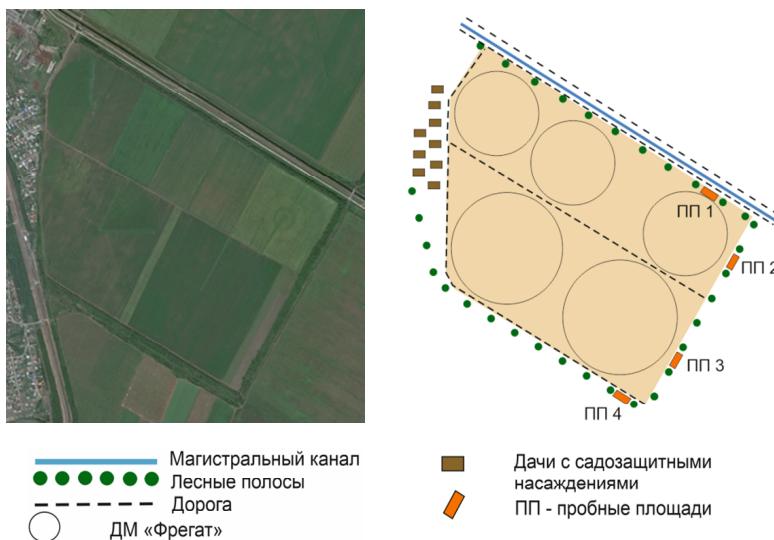


Рис. 1. Спутниковая и тематическая (пояснительная) карта опытных полей ВолжНИИГиМ

Fig. 1. Satellite and thematic (explanatory) map of experimental fields of VolzhNIIGiM

Методология исследования основывалась на: теории, принципах, организации и практике классического лесоведения, агролесомелиорации, лесной таксации, стандартных и частных методик планирования и проведения экспериментов.

Пробные площади закладывались согласно рекомендациям: ОСТ 56-69-83, Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова [Минаев и др., 2022], Е.С. Павловского, М.И. Долгилевича [Методика системных исследований лесоагарных ландшафтов, 1985].

Зависимость высоты вяза и ясения от возраста получена по ростовой функции А. Митчерлиха:

$$H = a_1 \cdot [1 + \xi \cdot \exp(-a_2 \cdot (t - a_3))]^{-1/\xi}, \quad (1)$$

где  $H$  – высота древесной породы, м;  $a_1$   $a_2$   $a_3$  – параметры; S-образной кривой;  $t$  – возраст породы, лет;  $\xi$  – степень кривизны кривой;  $a_1$  – предельное значение высоты породы, при которой древостой прекращает прирост и отмирает;  $a_2$  – наклон кривой роста в ее центральной части, определяемый скоростью прироста;  $a_3$  – начало роста по шкале времени;  $\xi$  – параметр, определяющий положение точки перегиба на центральной части кривой роста; если точка перегиба находится в центре линейной части кривой роста, то  $\xi = 1$ .

Идентификация и подгонка величин параметров S-образной кривой ( $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $\xi$ ), аппроксимирующей зависимость средней высоты вяза и ясения  $H$  от времени  $t$ , проводилась на основе минимизации сумм квадратов отклонений реальных и модельных значений высоты  $P$  средствами специальной настройки «Поиск решения» табличного процессора MS Excel с использованием эволюционного алгоритма нелинейной оптимизации.

Для изучения взаимоотношений между древесными породами в полезащитных лесных полосах применялась методика К.К. Высоцкого [1962], с помощью которой определялись следующие количественные показатели:

- показатель напряженности роста (ПНР) – отношение высоты дерева к площади поперечного сечения на высоте груди;
- коэффициент конкурентных отношений (ККО) – отношение напряженности роста породы, имеющей лучший рост (наименьший ПНР) к напряженности роста каждой другой породы в том же насаждении.

Показатель напряженности роста древесной породы в насаждении определяли по формуле (2) [Высоцкий, 1962]:

$$E = 4H/\pi D^2, \quad (2)$$

где  $E$  – показатель напряженности роста вяза и ясения в лесных полосах,  $\text{см}/\text{см}^2$ ;  $H$  – высота древесной породы, см;  $D$  – диаметр породы, см.

При определении продуктивности камбальной ткани использовали сложную методику, предложенную С.С. Пятницким [1963], которую преобразовали, используя зависимость [Проездов и др., 2021]:

$$\Pi = 1,68h + 3,65d - 0,05, \quad (3)$$

где  $\Pi$  – продуктивность камбия – отношение прироста древесины по объему за некоторый период времени к площади поверхности камбальной ткани,  $\text{дм}^3/\text{м}^2$ ;  $h$  – средний прирост древесной породы по высоте, м;  $d$  – средний прирост древесной породы по диаметру, см.

Различие вычислений продуктивности камбия древесных пород по зависимостям С.С. Пятницкого [1963] и авторов статьи [Проездов и др., 2021], не превышали 9–10%.

Экспериментальные данные обрабатывались по методике Б.А. Доспехова [1985] с использованием компьютерных программ Statistica, Scilab и «Пакет анализа табличного процессора» MSEExcel.

*Результаты исследования.* На рост и развитие древесных пород в полезащитных лесных насаждениях влияют многие природные и антропогенные факторы, совокупность которых представляет собой многомерную гиперповерхность со сложной структурой. Нами использовались математические модели и методы, которые позволяли учитывать воздействие на рост вяза и ясения наиболее значимых из факторов, допускающих доступное для применения математическое описание – диаметра, показателя напряженности роста, продуктивности камбия:

$$H = b_0 + b_1D + b_2E + b_3\Pi + b_4DE + b_5D\Pi + b_6E\Pi + b_7D E \Pi, \quad (4)$$

где  $H$  – высота породы, м;  $D$  – диаметр породы на высоте груди, см;  $E$  – показатель напряженности роста,  $\text{см}/\text{см}^2$ ;  $\Pi$  – продуктивность камбия,  $\text{дм}^3/\text{м}^2$ ,  $b_0$ – $b_7$  – коэффициенты множественной регрессии.

Слагаемые зависимости (4)  $b_4DE + b_5D\Pi + b_6E\Pi + b_7D E \Pi$  имеют незначительное влияние на рост древесных пород, потому ими можно пренебречь.

Канал Энгельской оросительной системы, построенный в 30-е годы прошлого века в земляном русле в полузыемке-полунасыпи, в 70-е годы был облицован плитами; в настоящее время требует капитального ремонта, особенно соединительные швы между плитами. Из-за изношенности облицовки оросительного канала наблюдаются значительные потери воды на фильтрацию через дно и стенки канала, что приводит к растеканию филь-

трационной воды по обе стороны канала за счет командного положения (полувыемка-полунасыпь). Вода растекается по суглинкам в виде верховодки на расстоянии от канала до 1500 м, на что указывает влажность почвогрунта в слое 1,5 м, равная наименьшей влагоемкости. На расстоянии от канала более 1 км влажность снижается и достигает показателей, зафиксированных при естественном увлажнении.

Анализ динамики в высоту 62-летних вяза приземистого и ясения ланцетного в зависимости от расстояния до оросительного канала констатирует существенные различия таксационных показателей. С возрастом отмечается снижение бонитета обеих древесных пород, причем чем дальше от канала, тем значительнее, на расстоянии 750 и 1300 м до двух классов. Высота по вязу с удалением от оросительного канала в 23 года уменьшается в 2,2 раза, в 62 года – до 2,7 раза. С момента посадки до сегодняшнего дня установлен опережающий рост вяза по сравнению с ясением в зависимости от расстояния до канала: в возрасте 23 года до 10,2%, в возрасте 62 года – до 7,1% (табл. 1, 2).

Таблица 1

**Рост в высоту (м) вяза приземистого и ясения ланцетного на темно-каштановой почве**

**Height growth (m) of common elm and lanceolate ash on dark chestnut soil**

| Расстояние от оросительного канала, м.<br>№ пробной площади | Порода | Годы таксации         |                 |                 |                |                 |
|---|--------|-----------------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|
|   |        | 1960<br>0 лет, сеянец | 1983<br>23 года | 2004<br>44 года | 2011<br>51 год | 2022<br>62 года |
| 50<br>ПП1   | Вяз    | 0,3                   | 11,9/1a         | 17,8/1          | 19,7/1         | 22,8/1          |
|   | Ясень  | 0,3                   | 10,8/1a         | 15,9/1          | 18,4/1         | 20,9/1          |
| 150<br>ПП2  | Вяз    | 0,3                   | 8,6/1           | 14,3/2          | 16,6/2         | 18,4/2          |
|   | Ясень  | 0,3                   | 8,0/1           | 13,4/2          | 15,3/2         | 17,1/2          |
| 750<br>ПП3  | Вяз    | 0,3                   | 6,7/2           | 12,2/3          | 13,7/3         | 12,8/4          |
|   | Ясень  | 0,3                   | 6,1/2           | 11,7/3          | 12,1/3         | 11,9/4          |
| 1300<br>ПП4   | Вяз    | 0,3                   | 5,3/3           | 8,9/4           | 9,0/5          | 8,8/5           |
|   | Ясень  | 0,3                   | 5,1/3           | 8,4/4           | 8,5/5          | 8,6/5           |

*Примечание.* Числитель – высота, знаменатель – бонитет.

Таблица 2

**Лесоводственное описание лесных полос и таксационные показатели вяза и ясения (2022 г.)**

**Silvicultural description of forest belts and taxation indicators of elm and ash (2022)**

| Описание ЛП                            | Схема смешения | Ширина ЛП, м. Число рядов | Расстояние от оросит. канала, м. № пробной площади | Средние |              |      |      | Е    | П    | Z    | Сохранность, % | Бонитет |   |
|--|----------------|---------------------------|--|---------|--------------|------|------|------|------|------|----------------|---------|---|
|  |                |                           |  | Порода. | Возраст, лет | Д    | Н    | d    | h    |      |                |         |   |
| Вп-<br>Ял-<br>Вп-<br>Ял-<br>Вп-<br>Ял- | 18<br>6        | 50<br>ПП1                 | Вп. 62   | 83,3    | 22,8         | 0,92 | 0,37 | 1,98 | 2,83 | 0,63 | 63             | 1       | 1 |
|  |                |                           | Ял. 62   | 29,1    | 20,9         | 0,47 | 0,34 | 3,14 | 2,24 |      |                | 1       |   |
|  |                | 150<br>ПП2                | Вп. 62   | 27,9    | 18,4         | 0,45 | 0,30 | 3,01 | 2,10 | 0,63 | 51             | 2       | 2 |
|  |                |                           | Ял. 62   | 21,3    | 17,1         | 0,34 | 0,28 | 4,80 | 1,66 |      |                | 2       |   |
|  |                | 750<br>ПП3                | Вп. 62   | 17,9    | 12,8         | 0,29 | 0,21 | 5,09 | 1,36 | 0,74 | 39             | 4       | 4 |
|  |                |                           | Ял. 62   | 14,8    | 11,9         | 0,24 | 0,19 | 6,92 | 1,14 |      |                | 4       |   |
|  |                | 1300<br>ПП4               | Вп. 62   | 11,9    | 8,4          | 0,19 | 0,14 | 7,56 | 0,88 | 0,76 | 24             | 5       | 5 |
|  |                |                           | Ял. 62   | 10,1    | 8,0          | 0,16 | 0,13 | 9,99 | 0,75 |      |                | 5       |   |

*Примечание.* Вп – вяз приземистый; Ял – ясень ланцетный; Д – диаметр, см; Н – высота, м; d – средний прирост по диаметру, см/год; h – средний прирост по высоте, м/год; Е – показатель напряженности роста, см/см<sup>2</sup>; П – продуктивность камбия, дм<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>; Z – коэффициент конкурентных отношений.

Впоследствии это определило другую схему смешения древесных пород в полезащитных лесных полосах.

Ход роста в высоту у вяза приземистого в зависимости от возраста на различном расстоянии от оросительного канала показан на рис. 2.

Для всех четырех регрессионных кривых по ростовой функции А. Митчерлиха (1) параметр  $\xi$  равен 1, параметры  $a_2 = 0,2$ ,  $a_3 = 50$ . Значения параметра  $a_1$  для кривых №1, 2, 3 и 4 равны соответственно 22,8; 18,4; 12,8; 8,4. Величина коэффициента детерминации  $R^2$  для каждой из кривых на рис. 2 не менее 0,96.

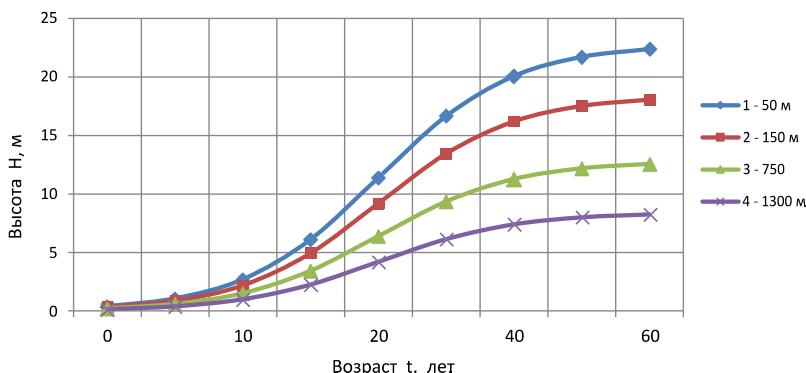


Рис. 2. Аппроксимация хода роста в высоту вяза в зависимости от возраста и расстояния от оросительного канала на основе обобщенной логистической функции

Fig. 2. Approximation of the progress of growth in elm height depending on age and distance from the irrigation canal based on a generalized logistic function

Показатель напряженности роста у обеих древесных пород увеличивается с удалением от оросительного канала до 3,8 раза: у вяза на  $5,58 \text{ см/см}^2$ , у ясения – на  $6,85 \text{ см/см}^2$ . Продуктивность камбальной ткани, наоборот, уменьшается у пород с увеличением расстояния от лесной полосы до канала до 3,2 раза. Коэффициент конкурентных отношений между породами с удалением от оросительного канала возрастает до 20,6%. Сохранность древесных пород вяза и ясения имеет тенденцию снижения до 39% в зависимости от расстояния до канала: в 50 м – 63% (2100 шт.), 1300 м – 24% (800 шт.). Результирующей оценкой состояния вяза и ясения в полезащитных лесных полосах является бонитет, который снижается на класс с удалением от оросительного канала на 50 и 150 м и на два класса – соответственно на 750 и 1300 м (табл. 1, 2).

Лучшие таксационные показатели древесных пород по мере приближения к каналу связаны с процессом фильтрации воды и образованием верховодки на суглинках, что является результатом подпитывания влагой поверхностно-пальчатой корневой системы вяза и ясения. Идентичное влияние на корни оказывает орошение лесных полос дождевальными машинами с оросительной нормой для севооборота [Степанов, 1987].

На расстоянии от канала 1300 м лесная полоса находится под влиянием естественного увлажнения, поэтому в сухой степи защитные насаждения из вяза приземистого и ясения ланцетного недолговечны, имеют низкую сохранность и класс бонитета.

Таблица 3

**Зависимость высоты вяза приземистого от показателя напряженности  
роста и продуктивности камбия  
на различных расстояниях от оросительного канала**

**Dependence of the height of the common elm on the growth intensity  
and cambium productivity  
at various distances from the irrigation canal**

| Расстояние от оросительного канала, м | Возраст, лет | Высота, м | Показатель напряженности роста, см/см <sup>2</sup> | Продуктивность камбия, дм <sup>3</sup> /м <sup>2</sup> |
|---------------------------------------|--------------|-----------|--|--|
| 50                                    | 0            | 0         | 0  | 0  |
|                                       | 23           | 11,9      | 0,11   | 3,69   |
|                                       | 51           | 19,7      | 1,70   | 3,14   |
|                                       | 62           | 22,8      | 1,98   | 2,83   |
| 1300                                  | 0            | 0         | 0  | 0  |
|                                       | 23           | 5,3       | 3,21   | 2,03   |
|                                       | 51           | 8,6       | 5,96   | 1,12   |
|                                       | 62           | 8,8       | 7,56   | 0,88   |

Отмечается отсутствие заболевания графиозом у вяза приземистого в лесных полосах на расстоянии от оросительного канала 50 и 150 м, в отличие от защитных насаждений в условиях естественного увлажнения. Это связано с более высоким иммунитетом породы, выработанным при лучшем водообеспечении.

Регрессивный анализ показал, что из множества природно-антропогенных факторов, влияющих на рост в высоту вяза и ясения, значительное влияние оказывает показатель напряженности роста, связанный с диаметром пород, и продуктивностью камбия, зависящий от приростов по диаметру и высоте (табл. 3). Коэффициенты детерминации составляют 0,97(5) и 0,96 (6), что указывает на тесную взаимосвязь изучаемых признаков (рис. 3, 4).

$$H = 175,66 + 0,24 * E - 0,02 * E^2 - 84,2 * \Pi + 10,8 * \Pi^2; R^2 = 0,97. \quad (5)$$

$$H = 8,72 + 0,14 * E + 0,02 * E^2 - 1,95 * \Pi + 0,21 * \Pi^2; R^2 = 0,96. \quad (6)$$

*Обсуждение.* Проведенные исследования подтвердили положительную роль использования вяза приземистого и ясения ланцетного на орошаемых землях в защитных лесных насаждениях сухостепной зоны. Результаты исследования внедрены в хозяйствах Ровенского и Энгельсского районов Саратовской области, расположенных на орошаемых каштановых почвах сухостепного Заволжья, с главными породами вязом приземистым и ясенем ланцетным. Площадь внедрения – 17 га полезащитных лесных полос на орошаемых землях, защищающих 693 га полей севооборота с листостью 2,4%, что позволило повысить урожайность сельскохозяйственных культур до 15%.

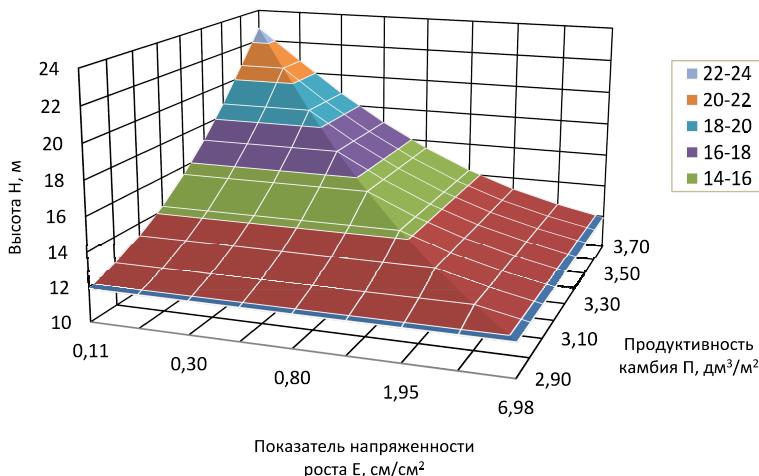


Рис. 3. Зависимость высоты вяза приземистого от показателя напряженности роста и продуктивности камбия на расстоянии 50 м от оросительного канала

Fig. 3. Dependence of the height of the common elm on the growth intensity and cambium productivity at a distance of 50 m from the irrigation canal

*Заключение и рекомендации производству.* Анализ роста вяза приземистого (Вп) и ясения ланцетного (Ял) отмечает лучшие таксационные показатели, прежде всего по высоте до 9,1%, у вяза. Поэтому рекомендуется применять в полезащитных лесных полосах схему смешения Ял – Вп – Вп – Ял вместо существующей Вп – Ял – Вп – Ял – Вп – Ял. Как главную породу в насаждениях можно применять ясень ланцетный.

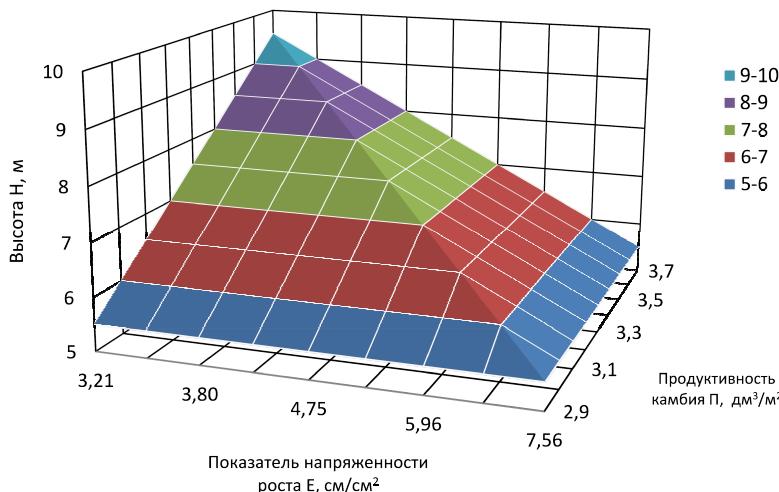


Рис. 4. Зависимость высоты вяза приземистого от показателя напряженности роста  $E$ ,  $\text{см}/\text{см}^2$  и продуктивности камбия на расстоянии 1300 м от оросительного канала

Fig. 4. Dependence of the height of the common elm on the growth intensity and cambium productivity at a distance of 1300 m from the irrigation canal

Вклад авторов: П.Н. Проездов – 10%, В.А. Тарбаев – 70%, П.В. Тарасенко – 10%, А.В. Розанов – 10%.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

#### Библиографический список

Высоцкий К.К. Закономерности строения смешанных древостоев. М.: Гослесбумиздат, 1962. 177 с.

Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). 5-е изд., доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

Иозус А.П., Завьялов А.А., Крючков С.Н. Гибридизация вязов *Ulmus* L. в сухой степи юго-востока России // Успехи современного естествознания. 2022. № 7. С. 14–19.

Макарова Н.М., Балакай Г.Т., Макаров А.В. Повышение мелиоративной роли защитных лесных насаждений на сельскохозяйственных землях юга России // Научный журнал Российской НИИ проблем мелиорации. 2020. № 1 (37). С. 122–139.

Манаенков А.С., Подгаецкая П.М., Подгаецкий М.Е. Особенности роста малорядных лесных полос на каштановых почвах // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2022. № 3. С. 134–142.

Методика системных исследований лесоаграрных ландшафтов / под ред. Е.С. Павловского и М.И. Долгилевича. М.: ВАСХНИЛ, 1985. 112 с.

Минаев В.Н., Леонтьев Л.П., Ковязин В.Ф. Таксация леса: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2022.

Примаков Н.В., Цалоева Е.Г. Состояние агролесоландшафтов ООО «АгроРальянс» Краснодарского края // Успехи современного естествознания. 2022. № 3. С. 16–21.

Проездов П.Н., Есков Д.В., Маштаков Д.А. Автономов А.Н., Розанов А.В. Закономерности роста дуба черешчатого (*Quercus Robur L.*, 1753) в защитных зонах степи и лесостепи Приволжской возвышенности. URL: <https://www.researchsq.unige.com/researchers/preprints>; опубл. 10.08.2021. DOI: doi.prg/10.21203/rs-773724/v1

Пятницкий С.С., Коваленко М.П., Лохматов Н.А. Вегетативный лес. М.: Сельхозиздат, 1963. 448 с.

Степанов А.М. Агролесомелиорация орошаемых земель. М.: Агропромиздат, 1987. 207 с.

Стратегия развития защитного лесоразведения в Российской Федерации до 2025 года. Волгоград: ФНЦ агроэкологии РАН, 2018. 36 с.

## References

Dospekhov B.A. Methodology of field experience (with the basics of statistical processing of research results). 5th ed., supplement and revision. M.: Agropromizdat, 1985. 351 p. (In Russ.)

Iozus A.P., Zavyalov A.A., Kryuchkov S.N. Hybridization of elms *Ulmus L.* in the dry steppe of southeastern Russia. *Successes of modern natural science*, 2022, no. 7, pp. 14–19. (In Russ.)

Makarova N.M., Balakai G.T., Makarov A.V. Increasing the reclamation role of protective forest plantations on agricultural lands of southern Russia. *Scientific Journal of the Russian Research Institute of Land Reclamation Problems*, 2020, no. 1 (37), pp. 122–139. (In Russ.)

Manaenkov A.S., Podgaetskaya P.M., Podgaetskiy M.E. Features of growth of low – order forest strips on chestnut soils. *Bulletin of the Moscow University*, Ser. 5. Geography, 2022, no. 3. pp. 134–142. (In Russ.)

Methodology of system research of forest – agrarian landscapes / Ed. by Е.С. Pavlovsky and M.I. Dolgilevich. M.: VASHNIL, 1985. 112 p. (In Russ.)

Minaev V.N., Leontiev L.L., Kovyazin V.F. Forest taxation. St. Petersburg: Lan, 2022. (In Russ.)

Primakov N.V., Tsaloeva E.G. The state of agroforestry landscapes of Agroalliance LLC of Krasnodar Krai. *Successes of modern natural science*, 2022, no. 3, pp. 16–21. (In Russ.)

*Proezdov P.N., Eskov D.V., Mashtakov D.A. Avtonomov A.N., Rozanov A.V.*  
Regularities of the growth of the pedunculate oak (*Quercus Robur L.*, 1753) in the protective zones of the steppe and forest – steppe of the Volga upland. URL: <https://www.researchsquare.com/researchers/preprints>, published on August 10 2021.  
DOI: doi.prg/10.21203/rs-773724/v1. (In Russ.)

*Pyatnitsky S.S., Kovalenko M.P., Lokhmatov N.A.* Vegetative forest. M.: Agricultural Publishing House, 1963. 448 p. (In Russ.)

*Stepanov A.M.* Agroforestry of irrigated lands. M.: Agropromizdat, 1987. 207 p. (In Russ.)

Strategy for the development of protective afforestation in the Russian Federation until 2025. Volgograd: FSC of agroecology RAS, 2018. 36 p. (In Russ.)

*Vysotsky K.K.* Regularities of the structure of mixed stands. M.: Goslesbumizdat, 1962. 177 p. (In Russ.)

*Материал поступил в редакцию 02.11.2023*

---

**Проездов П.Н., Тарбаев В.А., Тарасенко П.В., Розанов А.В.**  
Закономерности роста *Ulmus pumila* L. и *Fraxinus lanceolata* Borkh. в полезащитных лесных полосах в орошающем сухостепном Заволжье // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 249. С. 6–21.  
DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.6-21

Статья посвящена актуальным исследованиям состояния и закономерностям роста основных древесных пород (62-летних вяза приземистого и ясения ланцетного), применяемых в защитном лесоразведении сухостепной и полупустынной зон РФ. Авторы представили аналитический обзор, согласно которому положительное влияние на рост, повышение устойчивости лесных полос к болезням (где графиоз – главная причина, сдерживающая широкое использование вяза) и вредителям оказывает улучшение водного режима почвы. Целью исследований было установление закономерностей роста вяза приземистого и ясения ланцетного в полезащитных лесных полосах орошающего сухостепного Заволжья, расположенных по периметру орошаемого участка. В основе исследований был опыт на 4 пробных площадях лесных полос, размещенных в зависимости от их удаленности относительно оросительного канала, где из-за изношенности облицовки наблюдаются значительные потери воды на фильтрацию через дно и стенки канала, оказывающие влияние на рост и развитие древесных пород. Насаждения изучались методами лесной таксации согласно ОСТ 56-69-83, методике ВНИАЛМИ и учебному пособию Санкт-Петербургского лесотехнического университета. Отдельные таксационные показатели изучались по К.К. Высоцкому, С.С. Пятницкому. Экспериментами выявлен опережающий рост вяза и ясения в лесных полосах по мере приближения к

оросительному каналу. На расстоянии 50 и 150 м от канала корнедоступные почвенные влагозапасы, за многолетний период исследования, составили 75–70% наименьшей влагоемкости (НВ), соответственно 750 и 1300 м – 55–50%, при значении влажности завядания 48% НВ. Снижение влажности почвы – результат меньшего поступления воды с фильтрационными потерями из оросительного канала в виде верховодки. В зависимости от расстояния до канала показатель напряженности роста у вяза ниже чем у ясения до 59,5%, а продуктивность камбимальной ткани выше до 26,5%. Бонитет вяза и ясения увеличивается на класс и более при приближении лесной полосы к каналу. При улучшении водного питания у вяза было отмечено отсутствие графиоза. Коэффициенты детерминации связи роста в высоту вяза и ясения, проиразтающих в лесных полосах, показателями возраста, напряженности роста, продуктивности камбия составили 0,96–0,97, что указывает на тесную взаимосвязь. Авторы рекомендуют использовать вяз приземистый и ясень ланцетный (в качестве главной породы) в защитных лесных насаждениях сухостепной зоны, особенно на орошаемых землях по схеме смешения Ял-Вп-Вп-Ял, вместо существующей Вп-Ял-Вп-Ял-Вп-Ял.

**Ключевые слова:** сухостепное Заволжье, темно-каштановая почва, орошение, лесные полосы, вяз приземистый, ясень ланцетный, лесоводственно-таксационные показатели, моделирование.

**Proezdov P.N., Tarbaev V.A., Tarasenko P.V., Rozanov A.V.** Patterns of growth of *Ulmus pumila* L. and *Fraxinus lanceolata* Borkh. in protective forest strips in the irrigated dry-steppe Zavolzhye. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 249, pp. 6–21 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.6-21

The article is devoted to topical studies of the state and growth patterns of the main tree species (62-year-old squat elm and lanceolate ash) used in protective afforestation of the dry-steppe and semi-desert zones of the Russian Federation. The authors presented an analytical review, according to which the improvement of the soil water regime has a positive effect on growth, increasing the resistance of forest strips to diseases (where graphiosis is the main reason constraining the widespread use of elm) and pests. The purpose of the research was to establish the growth patterns of squat elm and lanceolate ash in the protective forest strips of the irrigated dry-steppe Volga region located along the perimeter of the irrigated area. The research was based on the experience on 4 trial sites of forest strips, placed depending on their distance from the irrigation canal, where due to the deterioration of the lining, significant water losses are observed for filtration through the bottom and walls of the canal and affecting the growth and development of tree species. The plantings were studied by forest taxation methods according to OST 56-69-83, the VNIALMI methodology and the textbook of the St. Petersburg Forestry University. Individual taxation indicators were studied according to K.K. Vysotsky, S.S. Pyatnitsky. Experiments have revealed the

outstripping growth of elm and ash in forest strips as they approach the irrigation canal. At a distance of 50 and 150 m from the canal, the root-accessible soil moisture reserves, over the long-term study period, amounted to 75–70% of the lowest moisture capacity (HB), respectively 750 and 1300 m – 55–50%, with a wilting humidity value of 48% HB. The decrease in soil moisture is the result of less water intake with filtration losses from the irrigation channel in the form of a headwater. Depending on the distance to the canal, the growth intensity index of elm is lower than that of ash by up to 59.5%, and the productivity of cambial tissue is higher by up to 26.5%. The bonus of elm and ash is ahead by a class or more when approaching the forest strip to the channel. With the improvement of water nutrition, the absence of graphiosis was noted in the elm. The coefficients of determination of the relationship between the height of elm and ash growing in forest strips from the indicators of age, growth intensity, productivity of cambium were 0.96–0.97, which indicates a close relationship. The authors recommend using squat elm and lanceolate ash (as the main species) in protective forest plantations of the dry steppe zone, especially on irrigated lands in the following mixing scheme: Yal-Vp-Vp-Yal – instead of the existing one: Vp-Yal-Vp-Yal-Vp-Yal.

**Ключевые слова:** dry-steppe Zavolzhye, dark chestnut soil, irrigation, forest strips, squat elm, lanceolate ash, forestry and taxation indicators, modeling.

---

**ПРОЕЗДОВ Петр Николаевич** – профессор кафедры лесное хозяйство и ландшафтное строительство Вавиловского университета, профессор, доктор сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 8889-6020. ORCID: 0000-0003-3541-3174.

410012, пр. им. Петра Столыпина, зд. 4, стр. 3, г. Саратов, Россия. E-mail: tox\_a\_19@mail.ru

**PROEZDOV Petr N.** – DSc (Agriculture), Professor of the Department of Forestry and Landscape Construction at Vavilov University, Professor. SPIN-code: 8889-6020. ORCID: 0000-0003-3541-3174.

410012. Petr Stolypin av. 4. Build. 3. Saratov. Russia. E-mail: tox\_a\_19@mail.ru

**ТАРБАЕВ Владимир Александрович** – заведующий кафедрой землеустройство и кадастры Вавиловского университета, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент. SPIN-код: 1468-9468. ORCID: 0000-0002-0388-7706

410012, пр. им. Петра Столыпина, зд. 4, стр. 3, г. Саратов, Россия. E-mail: tarbaev1@mail.ru

**TARBAEV Vladimir A.** – PhD (Agriculture), Head of the Department «Land Management and Cadasters» of Vavilov University, Associate Professor. SPIN-code: 1468-9468. ORCID: 0000-0002-0388-7706

410012. Petr Stolypin av. 4. Build. 3. Saratov. Russia. E-mail: tarbaev1@mail.ru

**ТАРАСЕНКО Петр Владимирович** – профессор кафедры землеустройство и кадастры Вавиловского университета, доктор сельскохозяйственных наук, доцент. SPIN-код: 1577-2603. ORCID: 0009-0004-8586

410012, пр. им. Петра Столыпина, зд. 4, стр. 3, г. Саратов, Россия. E-mail: petrvt60@gmail.com

**TARASENKO Petr V.** – DSc (Agriculture), Professor of the Department of Land Management and Cadasters of Vavilov University, Associate Professor. SPIN-code: 1577-2603. ORCID: 0009-0004-8586

410012. Petr Stolypin av. Build. 4. Build. 3. Saratov. Russia. E-mail: petrvt60@gmail.com

**РОЗАНОВ Александр Владимирович** – доцент кафедры цифровое управление процессами в АПК Вавиловского университета, кандидат физико-математических наук, доцент. SPIN-code: 5330-6012. ORCID: 0000-0002-2144-4255.

410012, пр. им. Петра Столыпина, зд. 4, стр. 3, г. Саратов, Россия. E-mail: arosanov@yandex.ru

**ROZANOV Alexander V.** – PhD (Physical and Mathematical), Associate Professor of the Department of Digital Process Control in the Agro-Industrial Complex of Vavilov University, Associate Professor. SPIN-code: 5330-6012. ORCID: 0000-0002-2144-4255.

410012. Petra Stolypin av. 4. Build. 3. Saratov. Russia. E-mail: arosanov@yandex.ru

**А.С. Ильинцев, Е.Н. Наквасина**

**ВЛИЯНИЕ ПОКРЫТИЯ ВОЛОКОВ ПОРУБОЧНЫМИ ОСТАТКАМИ  
НА ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ ПОЧВ  
ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЛЕСОСЕК В СЕВЕРНОЙ ПОДЗОНЕ ТАЙГИ**

*Введение.* В настоящее время на севере Русской равнины ведется рубка лесов, часто произрастающих в условиях временного избыточного поверхностного увлажнения, что связано с двучленными почвообразующими породами, широко распространенными в регионе. Пасечная технология разработки лесосек предусматривает проходы лесозаготовительной техники по волокам (технологическим коридорам), что приводит к разным видам нарушений почвенно-растительного покрова, ухудшает естественное возобновление и увеличивает мозаичность формирующихся после рубки условий [Cambi et al., 2015; Ilintsev et al., 2020; Ilintsev, Nakvasina, 2021]. Для разработки щадящих (природосберегающих) методов заготовки древесины и пересмотра технологических процессов в рамках устойчивого лесопользования и снижения уровня воздействия на лесные экосистемы [Зайкин и др., 2018] требуются исследования при разных условиях рубки и технологиях разработки лесосек.

Современные технологии разработки лесосек предусматривают многократные проезды техники по волокам (до 16) [Куляшов, Колотилин, 1993]. Недавние исследования [Nazari et al., 2023], проведенные в различных лесорастительных условиях, показали, что большое количество проездов техники ( $> 20$  раз) приводит к максимальному повреждению почвы, хотя это противоречит общему мнению, что серьезные нарушения почвы происходят в течение первых нескольких проездов [Сюнев и др., 2008; Naghdi et al., 2017]. Число проездов, при которых происходит стабилизация воздействия на свойства верхних слоев почвы, на волоках, покрытых хвостяной подушкой из порубочных остатков, составляет от 1 до 5 [Катаров и др., 2012], а на волоках без покрытия – 8–9 [Сюнев, Давыдков, 2001; Ильинцев, Наквасина, 2021]. Метаанализ [Ampoorter et al., 2012] показал, что существенной связи между степенью уплотнения и интенсивностью движения не наблюдалось, а разная восприимчивость почв к повреждению определялась ее типом [Shabani, 2017]. Именно тип почвы, строение верх-

них горизонтов, их гранулометрический состав определяет степень ее повреждения при проходе груженой техники, прежде всего, колеевобразования [Sirén et al., 2019], которое зависит от принятых мер защиты волока и покрытия его хвостяной подушкой. Необходимый объем хвостяной подушки для защиты почв на волоках зависит от влажности и гранулометрического состава почв, определяющих ее несущую способность, и составляет для гусеничных тракторов –  $0,012 \text{ м}^3/\text{м}^2$ , для колесных –  $0,023 \text{ м}^3/\text{м}^2$  [Галактионов и др., 2009]. Технология защиты волоков аппроксимируется с типами леса [Галактионов, Кузнецов, 2011], что позволяет заранее организовать корректировку технологических параметров разработки лесосеки и предусмотреть превентивные меры защиты почвенного покрова.

Для условий лесосек с избыточным увлажнением почв важно определить возможности их защиты хвостяной подушкой из порубочных остатков, укладываемых на волоки, при разработке низкобонитетных древостоев V класса бонитета. По нашим данным, в черничном типе леса в северной подзоне тайги при запасе древостоев, поступающих в рубку,  $115 \text{ м}^3/\text{га}$  объем порубочных остатков составляет в среднем  $14,5 \text{ м}^3/\text{га}$  [Шинтсев et al., 2022]. При принятых технологических параметрах (ширина волока 4 м и пасека 18 м) объем порубочных остатков составляет  $0,008 \text{ м}^3/\text{м}^2$ , что ниже установленных ранее оптимальных значений [Галактионов и др., 2009]. Возрастает актуальность изучения устойчивости к действию лесозаготовительной техники специфичных для Европейского Севера почв на двучленных отложениях [Скляров, Шарова, 1970], особенностями которых являются их мелкий профиль и сложное и неоднозначное строение по гранулометрическому составу: верхняя часть профиля представлена супесью, нижняя (почвообразующая порода) в процессе эволюции и развития глеевых процессов – средним суглинком, подстилаемым тяжелосуглинистой мореной. Провоцируемый сложением почв застой влаги вызывает переувлажнение почв и снижает продуктивность насаждений. В то же время верхняя часть профиля имеет запас песчаных частиц, поддерживающих несущую способность почв.

Цель исследований – провести сравнительный анализ нарушений свойств почвы на волоках с покрытием порубочными остатками и без покрытия ими (с одинаковым числом проездов техники) в ельниках черничных низких бонитетов, произрастающих на избыточно увлажненных почвах в северотаежных лесах для корректировки технологических параметров разработки лесосек.

*Материалы и методика исследования.* Исследования проводили на лесосеке арендного участка ООО «Двинлеспром», территориально расположенного в междуречье С. Двины и Пинеги (Архангельская область, северо-восточный лесной район европейской части РФ). Лесосека разрабатывалась комплексом лесозаготовительной техники, состоящим из харвестера Volvo EC210 и форвардера Ponsse Buffalo King, по общепринятой сортиментной технологии с покрытием волоков порубочными остатками. Длина гона техники на лесосеке составляла 70–100 м, что соответствовало 4 проездам техники. На 3 пасеках шириной 18 м обеспечили сравнительные варианты проезда форвардера, груженого 20 м<sup>3</sup> еловых и березовых сортиментов (масса достигала около 39 т), с аналогичным числом проходов.

Исходный участок леса представлен ельником черничным V класса бонитета, состав 8Е2Б+С. Подрост на пасеках – ель (в среднем 733 шт./га) и редко встречающаяся береза, подлесок – шиповник, можжевельник, ива (в среднем 610 шт./га). В напочвенном покрове преобладают черника (из 10 представленных в травяно-кустарниковом ярусе видов) и зеленые мхи с проективным покрытием 79%. Проективное покрытие травяно-кустарникового яруса на пасеках, по сравнению со стеной леса (40%), снижено за счет повреждения напочвенного покрова при разработке лесосеки до 14%.

Почва на участке представлена подзолом грубогумусным поверхностью-осветленным иллювиально-железистым контактно-осветленным на двуячленных моренных отложениях (тяжелосуглинистая морена, перекрытая покровными оглеенными супесями). Верхние горизонты (E, BHF) представлены супесью и легким суглинком, нижние, начинающиеся с 30 см (BCg и C) – оглеенной до среднего суглинка супесью и тяжелым суглинком.

При проведении исследований на волоках в местах проезда лесозаготовительной техники обращали внимание на образование колейности, строение и физические свойства дна колеи/мест проезда. Провели детальное изучение строения колей, замеряя расстояние и просадку от условного уровня 30 см, маркируемого колышками и натянутой металлической лентой от уровня пасеки. В дне колеи/месте прохождения техники вскрывали почвогрунт и делали описание горизонтов/слоев почвы в соответствии с классификацией почв СССР 1977 г., а затем отбирали образцы ненарушенной лесной подстилки (на волоках с покрытием порубочными остатками) и почвы с глубин 0–10 см и 10–20 см для определения влажности и плотности сложения [Наквасина и др., 2007]. Для определения твердости использо-

зовали твердомер Голубева. В качестве контроля отбирали подобные образцы на пасеке. Всего обработали 68 точек опробования. В камеральных условиях определяли плотность твердой фазы (пикнометрически) и рассчитывали скважности (общую и аэрации) [Наквасина, Любова, 2016].

Все статистические анализы выполняли на 5%-ном уровне вероятности. Для установления различий между исследуемыми вариантами применяли тест Kruskal-Wallis ANOVA с последующим множественным сравнением средних рангов всех пар групп. Все данные анализировались с помощью программы Statistica версии 12.0 (StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA).

*Результаты и обсуждение.* На волоках, покрытых и не покрытых порубочными остатками, прежде всего обращает на себя внимание формирование колейности. При покрытии волока порубочными остатками проседание почвы и образование колей не просматривается, что отмечалось и другими авторами при подобных исследованиях [Катаров и др., 2012].

В то же время при отсутствии покрытия формируется типичная колея, имеющая среднюю ширину 81,4 см и глубину 9,6 см (от уровня пасеки). При этом четко просматривается образование межколейного пространства и маркирующих края колеи валиков, сложенных из смеси лесной подстилки, растительности и минеральной почвы. За счет образования валиков реальная глубина колеи составляет в среднем 23 см (от верха валика до дна колеи). Валик на краю колеи состоит из раздробленных, перетертых трелевкой частиц и лишен структуры, быстро пересыхает. При выпадении даже небольшого количества осадков он расплывается, проседает и обрушивается [Григорьев и др., 2008]. Валики увеличивают перепады высот колейности, но в то же время могут играть и положительную роль в выравнивании колейности и расселении растительности со временем. Они насыщены органическим веществом, достаточно рыхлые и будут создавать благоприятные условия для поселения растительности. Твердость валика составляет  $4,6 \pm 0,32$  мПА и соответствует твердости верхних слоев почвы на пасеке ( $4,94 \pm 0,24$ ), тогда как твердость дна колеи достоверно выше ( $6,1 \pm 0,21$  мПА).

При 4 проездах техники по волоку без покрытия формируется неровное дно колеи. При переезде через пни или в результате проседания задней груженой части машины могут образовываться углубления до 32 см, или, наоборот, микроповышения выше уровня пасеки за счет натаскивания почвы гусеничными лентами и цепями. Срез верхнего слоя почвы происходит из-за буксования лесозаготовительных агрегатов с механическими

трансмиссиями [Дручинин, 2017]. Занос почвы, особенно тяжелого гранулометрического состава с низкой несущей способностью, будет отрицательно сказываться на проходимости тяжелой техники [Вадбольская, Азаренок, 2015], нарушать строение почвы, вести к изменениям ее свойств и препятствовать восстановлению до естественного состояния [Ezzati et al., 2012].

В результате выявлено несколько вариантов строения дна колеи, учтена их представленность и глубина повреждения колеи на изученных волоках, не покрытых порубочными остатками:

- органогенный горизонт Оао (лесная подстилка) перемешан с растительностью и порубочными остатками, толща смешанного горизонта составляет в среднем 5–6 (местами 2…12) см и лежит на подзолистом горизонте, слабо задетым перемешиванием в верхней части; доля таких повреждений дна колеи составляет 54%;

- горизонт Оао полностью перемешан с горизонтами Е и ВНФ, а также к нему примешана растительность и порубочные остатки. Горизонт Е полностью затронут перемешиванием гусеницами и не просматривается. Перемешанный горизонт (толщиной 2–12 см) может лежать на не перемешанных горизонтах ВНФ и С; доля таких повреждений составляет 17%;

- на перемешанные горизонты привнесена почва с других участков, сдвинутая гусеничными лентами и цепями при проходе техники. При этом сдвинутая почва чаще среднесуглинистого гранулометрического состава (горизонт Сг), может слоем до 4 см покрывать перемешанный слой или быть смешана с ним, повреждается толща дна на глубину 9–14 см; доля таких повреждений составляет 12%.

При 4 проходах техники по не защищенному порубочными остатками волоку только 17% площади на месте контакта с гусеницами остаются неповрежденными.

В то же время на волоках, покрытых порубочными остатками, перемешивания горизонтов не происходит, ниже лесной подстилки строение исходной почвы (Оае+Е+ВНФ) сохраняется. Однако наблюдается уплотнение верхнего подстилочного горизонта, что приводит к изменению его плотности сложения и полевой влажности (табл. 1).

В первую очередь наблюдается снижение мощности подстилки в местах прохода гусениц техники, различия с толщиной подстилочного горизонта на пасеке достоверны ( $p = 0,01$ ) и достигают 40% (табл. 2). Уплотнение лесной подстилки наблюдается и в межколейном пространстве ( $p = 0,03$ ), что может быть вызвано свободными проездами техники по покрытому волоку, без приуроченности к ранее проложенным колеям.

Таблица 1

**Физические свойства лесной подстилки (горизонт Оао) на волоках, покрытых порубочными остатками, и пасеке**

**Physical properties of forest floor (Oao horizon) on strip roads covered with felling residues and cutting strips**

| Вариант                  | Мощность, см              | Полевая влажность, %        | Плотность сложения, г/см <sup>3</sup> |
|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| Пасека                   | 4,6±0,28                  | 417,9±45,89                 | 0,06±0,004                            |
| Колея                    | <u>2,7±0,18</u><br>-40,6* | <u>396,1±130,94</u><br>-5,2 | <u>0,11±0,007</u><br>+83,3            |
| Межколейное пространство | <u>3,6±0,18</u><br>-21,3  | <u>387,1±13,98</u><br>-7,3  | <u>0,08±0,005</u><br>+25,0            |

Примечание: \* – % в сравнении с пасекой.

Таблица 2

**Результаты теста Крускала-Уоллиса при множественных сравнениях физических свойств лесной подстилки на разных участках**

**Results of the Kruskal-Wallis test for multiple comparisons of the physical properties of the forest floor at different sites**

| Физические свойства                   | Вариант | Парные (апостериорные) сравнения |     |                                     |     |                                    |     |      |   |
|---------------------------------------|---------|----------------------------------|-----|-------------------------------------|-----|------------------------------------|-----|------|---|
|                                       |         | Пасека vs. Колея                 |     | Пасека vs. Межколейное пространство |     | Колея vs. Межколейное пространство |     |      |   |
|                                       |         | H                                | p   | Z                                   | p   | Z                                  | p   | Z    | p |
| Мощность, см                          | 20,5    | 0,01                             | 4,5 | 0,01                                | 1,9 | 0,15                               | 2,4 | 0,04 |   |
| Полевая влажность, %                  | 0,1     | 0,96                             | –   | –                                   | –   | –                                  | –   | –    |   |
| Плотность сложения, г/см <sup>3</sup> | 24,0    | 0,01                             | 4,9 | 0,01                                | 2,6 | 0,03                               | 2,1 | 0,09 |   |

Примечание: H – значение критерия Крускала-Уоллиса; Z – значение критерия при парных сравнениях; p – уровень значимости.

Уплотнение подстилки сказалось на ее плотности сложения в сторону увеличения ( $p = 0,01$ ), как на местах прохода техники, так и в центре волока. С другой стороны, покрытие волока порубочными остатками предохраняет подстилку от высыхания и нивелирует ее влажность ( $p = 0,96$ ), что может быть благоприятным для ее последующего разложения и отразиться

в насыщении верхних горизонтов почвы органическим веществом в дополнение к разлагаемому детриту.

В благоприятных условиях увлажнения организмы лесной подстилки будут способствовать деструкции мортмассы порубочных остатков, обеспечивая на определенном этапе восстановительной сукцессии поселение и рост лесных растений.

Наличие или отсутствие покрытия волоков порубочными остатками (еловые сучья) оказывается на физических свойствах 20-сантиметрового слоя почвы, изменяет ее водно-воздушный режим в местах прямого воздействия техники – следах (табл. 3).

Таблица 3

**Физические свойства почвы в колеях с разным обеспечением покрытия волоков при 4 проходах техники**

**Physical properties of the soil in ruts with different coverage of the felling residues after 4 passes of machinery**

| Вариант  | Полевая влажность, %      | Плотность сложения, г/см <sup>3</sup> | Скваж-ность общая, %       | Скваж-ность аэрации, %    | % образцов с почвой без воздушной фазы |
|--|---------------------------|---------------------------------------|----------------------------|---------------------------|--|
| 0–10 см  |                           |                                       |                            |                           |  |
| Пасека   | 27,9±1,78                 | 1,45±0,047                            | 47,6±1,69                  | 10,2±1,82                 | 0                                      |
| Волок с порубочными остатками                    | <u>26,9±1,58</u><br>-3,7* | <u>1,49±0,036</u><br>+2,8             | <u>46,2±1,31</u><br>-2,9   | <u>8,1±1,44</u><br>-20,6  | 10                                     |
| Волок без порубочных остатков                    | <u>29,3±1,93</u><br>+5,0  | <u>1,54±0,051</u><br>+6,2             | <u>40,4±1,98</u><br>-15,3  | <u>3,6±1,77</u><br>-64,7  | 64                                     |
| Межколейное пространство с порубочными остатками | <u>33,6±2,71</u><br>+20,3 | <u>1,33±0,053</u><br>-8,3             | <u>51,9±1,92</u><br>+9,0   | <u>9,7±2,06</u><br>-4,9   | 7                                      |
| 10–20 см   |                           |                                       |                            |                           |  |
| Пасека   | 29,1±1,83                 | 1,41±0,066                            | 47,9±2,430                 | 12,4±1,67                 | 0                                      |
| Волок с порубочными остатками                    | <u>30,5±1,91</u><br>+4,9  | <u>1,42±0,039</u><br>+0,7             | <u>47,5±1,402</u><br>-0,9  | <u>8,2±1,246</u><br>-33,8 | 20                                     |
| Волок без порубочных остатков                    | <u>24,8±1,74</u><br>-14,6 | <u>1,65±0,047</u><br>+13,8            | <u>42,0±1,649</u><br>-12,3 | <u>3,8±0,60</u><br>-69,4  | 21                                     |
| Межколейное пространство с порубочными остатками | <u>35,4±2,71</u><br>+21,6 | <u>1,31±0,060</u><br>-7,1             | <u>51,5±2,219</u><br>+7,4  | <u>7,7±1,85</u><br>-37,6  | 7                                      |

Примечание: \* – % в сравнении с пасекой.

Покрытие волока порубочными остатками при 4 проходах тяжелой техники предохраняет почву с супесчаным гранулометрическим составом от уплотнения – плотность сложения в толще 0–20 см меняется незначительно по сравнению с пасекой ( $p = 0,5–1$ , табл. 4). Без покрытия волока порубочными остатками, несмотря на перемешивание почвы с лесной подстилкой, растительностью, происходит заметное уплотнение почвы (на 6–14%,  $p = 0,01–0,03$ ), особенно в нижнем слое (10–20 см), менее механически нарушенном гусеничными лентами форвардера.

Таблица 4

**Результаты теста Крускала-Уоллиса при множественных сравнениях физических свойств почвы на разных участках**

**Results of the Kruskal-Wallis test for multiple comparisons of the physical properties of the soil at different sites**

| Физические свойства                   | Вариант | Парные (апостериорные) сравнения |     |                          |     |                              |     |                               |     |                                   |     |                                     |     |
|---------------------------------------|---------|----------------------------------|-----|--------------------------|-----|------------------------------|-----|-------------------------------|-----|-----------------------------------|-----|-------------------------------------|-----|
|                                       |         | Пасека vs. Волок с п/о           |     | Пасека vs. Волок без п/о |     | Пасека vs. Межколейное с п/о |     | Волок с п/о vs. Волок без п/о |     | Волок с п/о vs. Межколейное с п/о |     | Волок без п/о vs. Межколейное с п/о |     |
|                                       |         | H                                | p   | Z                        | p   | Z                            | p   | Z                             | p   | Z                                 | p   | Z                                   | p   |
| 0–10 см                               |         |                                  |     |                          |     |                              |     |                               |     |                                   |     |                                     |     |
| Полевая влажность, %                  | 4,8     | 0,19                             | –   | –                        | –   | –                            | –   | –                             | –   | –                                 | –   | –                                   | –   |
| Плотность сложения, г/см <sup>3</sup> | 13,6    | 0,01                             | 1,7 | 0,48                     | 2,8 | 0,03                         | 0,3 | 1                             | 1,1 | 1                                 | 2,1 | 0,19                                | 3,2 |
| Скважность общая, %                   | 18,3    | 0,01                             | 0,7 | 1                        | 2,8 | 0,03                         | 1,3 | 1                             | 2,2 | 0,15                              | 2,0 | 0,29                                | 4,1 |
| Скважность аэрации, %                 | 6,3     | 0,09                             | –   | –                        | –   | –                            | –   | –                             | –   | –                                 | –   | –                                   | –   |
| 10–20 см                              |         |                                  |     |                          |     |                              |     |                               |     |                                   |     |                                     |     |
| Полевая влажность, %                  | 13,3    | 0,01                             | 0,3 | 1                        | 2,0 | 0,24                         | 1,4 | 0,9                           | 2,4 | 0,09                              | 1,2 | 1                                   | 3,5 |
| Плотность сложения, г/см <sup>3</sup> | 19,0    | 0,01                             | 0,3 | 1                        | 3,2 | 0,01                         | 0,8 | 1                             | 3,0 | 0,02                              | 1,1 | 1                                   | 3,8 |
| Скважность общая, %                   | 13,9    | 0,01                             | 0,4 | 1                        | 2,5 | 0,07                         | 0,7 | 1                             | 2,1 | 0,19                              | 1,1 | 1                                   | 3,1 |
| Скважность аэрации, %                 | 13,1    | 0,01                             | 1,7 | 0,50                     | 3,6 | 0,01                         | 1,9 | 0,33                          | 1,9 | 0,36                              | 0,2 | 1                                   | 1,6 |

Примечание: Н – значение критерия Крускала-Уоллиса; Z – значение критерия при парных сравнениях; р – уровень значимости.

Аналогично плотности сложения меняется и общая скважность почвы в этих вариантах. Повышение плотности сложения вызывает закономерное снижение общей пористости почвы до 40–42%, что неблагоприятно для роста корней растений. При этом при уплотнении почвы происходит перераспределение крупных и мелких пор в сторону увеличения последних, что нарушает водно-воздушный режим и, прежде всего, сказывается на обеспеченности почвы воздухом.

На открытых лесосеках скважность аэрации почв пасеки в летнее время находится на предельных значениях (ниже 15%). Покрытие волока порубочными остатками способствует ее поддержанию, особенно в верхнем слое 0–10 см под лесной подстилкой. Ниже (слой 10–20 см) влажность почвы может несколько увеличиваться за счет выжимания ее из горизонта BHF, влажность которого составляла на время исследований более 40% за счет высокой пористости (62%).

В дне колеи, на волоках, не покрытых порубочными остатками, водно-воздушный режим почвы нарушается весьма заметно (все поры заняты водой, и расчетная скважность аэрации достигает отрицательных значений). Это связано с уплотнением почвы, нарушением системы крупных пор и выдавливанием влаги, в том числе из нижележащих горизонтов. Количество таких проб почвы (с преобладанием доли пор, занятых влагой) достигало 64 и 21% в верхнем и нижнем слое изучаемой толщи (10–20 см). На возможность сильного снижения пористости аэрации почвы в толще до 30 см на технологических волоках в условиях ельников черничных (на суглинистых почвах) до значений в 1–2% указывали [Серый и др., 1991]. Такое снижение аэрированности и повышение плотности сложения почвы критично, так как для роста корней растений требуется не менее 10% скважности аэрации от общего объема почвы, микробная активность и развитие корней могут быть серьезно ограничены, а продуктивность участка может снизиться [Siegel-Issem et al., 2005; Latterini et al., 2023]. На избыточно увлажненных почвах эти процессы выражены заметнее из-за насыщенности почвы влагой в середине почвенного профиля.

**Заключение.** При разработке лесосек по современной технологии с применением комплекса лесозаготовительных машин (харвестер и форвардер) в условиях ельников V класса бонитета на избыточно увлажненных почвах в северной подзоне тайги большое значение имеет применение мер защиты технологических волоков путем укладки порубочных остатков. Их применение при минимальном числе проездов техники не исключает негативных последствий повреждения почвенно-растительного покрова, однако способно минимизировать их. Негативное воздействие проявляется в уплотнении

лесной подстилки, однако хворостяная подушка из порубочных остатков предохраняет 20-сантиметровую толщу почвы от уплотнения и нарушения водно-воздушного режима, по сравнению с колеями, формирующимиися при проезде по непокрытым хворостяной подушкой волокам.

При разработке подобных лесосек целесообразно следить за поддержанием волоков (пасечных, магистральных) в покрытом порубочными остатками состоянии. Однако, при большем числе проездов, имеющейся толщи порубочных остатков может не хватить, и повреждения могут быть выше. Это требует организации системных исследований на длинных волоках с разным числом проездов техники и рекомендаций производству при планировании лесосек отдавать предпочтение лесосекам с короткими волоками, что предусматривает снижение числа проездов и минимизацию повреждения почвенного покрова.

*Сведения о финансировании исследования и благодарности.* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-01014, <https://rscf.ru/projekt/23-76-01014/>. Авторы выражают благодарность начальнику отдела лесоуправления ООО «Регион-лес» А.В. Студенцову, инженеру по лесопользованию ООО «Двинлеспром» А.Л. Лябину и работникам ООО «Двинлеспром», принимавшим участие в планировании и постановке эксперимента на лесосеке, а также С.А. Рай и Е.А. Рай за помощь в постановке модельного эксперимента.

*Конфликт интересов.* Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### **Библиографический список**

*Вадбольская Ю.Е., Азаренок В.А.* Снижение воздействия лесных машин на почву при рубках ухода // Леса России и хозяйство в них. 2015. № 3 (54). С. 36–40.

*Галактионов О.Н., Кузнецов А.В.* Формирование структуры лесотранспортных путей лесосеки на лесотипологической основе // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2011. № 8. С. 81–84.

*Галактионов О.Н., Кузнецов А.В., Пискунов М.А.* Характеристики настила из лесосечных отходов и состояние грунта на трелевочном волоке // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2009. № 7. С. 90–95.

*Григорьев И.В., Жукова А.И., Григорьева О.И., Иванов А.В.* Средоощадящие технологии разработки лесосек в условиях Северо-Западного региона Российской Федерации: монография. СПб: Изд-во СПбГЛТА, 2008. 317 с.

*Дручинин Д.Ю.* Повреждение лесной почвенно-растительной среды при проведении лесозаготовительных работ // Лесозаготовительное производство: проблемы и решения: матер. Междунар. науч.-технич. конф.. Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2017. С. 84–87.

*Заикин А.Н., Никитин В.В., Щербаков Е.Н., Муковнина М.В.* Методика снижения объемов техногенного воздействия лесосечных машин на лесные экосистемы // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2016. № 1. С. 10–16.

стемы на основе математического моделирования режимов их работы // Лесной вестник. 2018. Т. 22. № 5. С. 54–61. DOI: 10.18698/2542-1468-2018-5-54-61

Ильинцев А.С., Наквасина Е.Н. Образование колейности при проходе лесозаготовительной техники в ельниках на двучленных породах // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2021. Вып. 237. С. 168–182. DOI: 10.21266/2079-4304.2021.237.168-182

Катаров В.К., Сюнёв В.С., Ратькова Е.И., Герасимов Ю.Ю. Влияние форвардеров на лесные грунты // Resources and Technology. 2012. № 9 (2). С. 73–81.

Куляшов А.П., Колотилин В.Е. Экологичность движителей транспортно-технологических машин. М.: Машиностроение, 1993. 286 с.

Наквасина Е.Н., Любова С.В. Почвоведение: учеб. пособие. Архангельск: САФУ, 2016. 146 с.

Наквасина Е.Н., Серый В.С., Семенов Б.А. Полевой практикум по почвоведению. Архангельск: АГТУ, 2007. 124 с.

Серый В.С., Аникеева В.А., Вялых Н.И., Кубрак Н.И. Изменение лесорастительных условий вырубок при современных лесозаготовках // Экологические исследования в лесах Европейского Севера: сб. науч. трудов. Архангельск, 1991. С. 3–15.

Скляров Г.А., Шарова А.С. Почвы лесов Европейского Севера. М.: Наука, 1970. 269 с.

Сюнёв В.С., Соколов А.П., Коновалов А.П., Катаров В.К., Селиверстов А.А., Герасимов Ю.Ю., Карвинен С., Вяльккю Э. Сравнение технологий лесосечных работ в лесозаготовительных компаниях Республики Карелия. Йоэнсуу: НИИ Леса Финляндии, 2008. 126 с.

Ampoorter E., Schrijver A., Nevel L., Hermy M., Verheyen K. Impact of mechanized harvesting on compaction of sandy and clayey forest soils: results of a meta-analysis // Annals of Forest Science. 2012. Vol. 69. P. 543–562. DOI: 10.1007/s13595-012-0199-y

Cambi M., Certini G., Fabiano F., Foderi C., Laschi A., Picchio R. Impact of wheeled and tracked tractors on soil physical properties in a mixed conifer stand // iForest. 2015. Vol. 9. P. 89–94. DOI: 10.3832/ifor1382-008

Ezzati S., Najafi A., Rab M.A., Zenner E.K. Recovery of soil bulk density, porosity and rutting from ground skidding over a 20-year period after timber harvesting in Iran // Silva Fennica. 2012. Vol. 46, no. 4. P. 521–538. DOI: 10.14214/sf.908

Ilintsev A., Bogdanov A., Nakvasina E., Amosova I., Koptev S., Tretyakov S. The natural recovery of disturbed soil, plant cover and trees after clear-cutting in the Boreal Forests, Russia // iForest. 2020. Vol. 13. P. 531–540. DOI: 10.3832/ifor3371-013

Ilintsev A., Nakvasina E., Tretyakov S., Koptev S., Bogdanov A. The impact of modern logging on the forest environment of felling site in the context of climate change [Electronic resource]. Building a green, healthy and resilient future with forests : XV World Forestry Congress; 2–6 May 2022, Seoul, Republic of Korea. URL: [https://drive.google.com/file/d/190XjPT5JO83nfr-aQl-UWhW1MkE9qG7D/](https://drive.google.com/file/d/190XjPT5JO83nfr-aQl-UWhW1MkE9qG7D/view?usp%20target=) (accessed November 10, 2023).

*Ilintsev A.S., Nakvasina E.N., Högbom L.* Methods of protection forest soils during logging operations // ИВУЗ. Лесной журнал. 2021. № 5. С. 92–116. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-92-116

*Latterini F., Dyderski M.K., Horodecki P., Rawlik M., Stefanoni W., Högbom L., Venanzi R., Picchio R., Jagodziński A.M.* A Meta-analysis of the effects of ground-based extraction technologies on fine roots in forest soils // Land Degradation and Development. 2023. P. 1–13. DOI: 10.1002/ldr.4902

*Naghdi R., Solgi A., Zenner E., Najafi A., Salehi A., Nikooy M.* Compaction of forest soils with heavy logging machinery // Silva Balcanica. 2017. Vol. 18. P. 25–39.

*Nazari M., Arthur E., Lamandé M., Keller T., Bilyera N., Bickel S.* A meta-analysis of soil susceptibility to machinery-induced compaction in forest ecosystems across global climatic zones // Current Forestry Reports. 2023. P. 1–12. DOI: 10.1007/s40725-023-00197-y

*Shabani S.* Modelling and mapping of soil damage caused by harvesting in Caspian forests (Iran) using CART and RF data mining techniques // Journal of Forest Science. 2017. Vol. 63. P. 425–432. DOI: 10.17221/125/2016-JFS

*Siegel-Issem C.M., Burger J.A., Powers R.F., Ponder F., Patterson S.C.* Seedling root growth as a function of soil density and water content // Soil Science Society of America Journal. 2005. Vol. 69. P. 215–226. DOI: 10.2136/sssaj2005.0215

*Sirén M., Ala-Ilomäki J., Lindeman H., Uusitalo J., Kiilo K.E.K., Salmivaara A., Ryynänen A.* Soil disturbance by cut-to-length machinery on mid-grained soils // Silva Fennica. 2019. Vol. 53. No. 2. P. 1–24. DOI: 10.14214/sf.10134

## References

*Amboorter E., Schrijver A., Nevel L., Hermy M., Verheyen K.* Impact of mechanized harvesting on compaction of sandy and clayey forest soils: results of a meta-analysis. *Annals of Forest Science*, 2012, vol. 69, pp. 543–562. DOI: 10.1007/s13595-012-0199-y

*Cambi M., Certini G., Fabiano F., Foderi C., Laschi A., Picchio R.* Impact of wheeled and tracked tractors on soil physical properties in a mixed conifer stand. *iForest*, 2015, vol. 9, pp. 89–94. DOI: 10.3832/ifor1382-008

*Druchinin D.Yu.* Povrezhdenie lesnoj pochvenno-rastitel'noj sredy pri provedenii lesozagotovitel'nyh rabot [Damage to the forest soil and plant environment after logging operations]. *Lesozagotovitel'noe proizvodstvo: problemy i resheniya: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii [Logging production: problems and solutions: materials of the International Scientific and Technical Conference]*. Minsk: BGTU, 2017. pp. 84–87. (In Russ.)

*Ezzati S., Najafi A., Rab M.A., Zenner E.K.* Recovery of soil bulk density, porosity and rutting from ground skidding over a 20-year period after timber harvesting in Iran. *Silva Fennica*, 2012, vol. 46, no. 4, pp. 521–538. DOI: 10.14214/sf.908

*Galaktionov O.N., Kuznetsov A.V.* Formirovaniye struktury lesotransportnyh putej lesoseki na lesotipologicheskoy osnove. *Uchenye zapiski petrozavodskogo state university*, 2011, no. 8, pp. 81–84. (In Russ.)

Galaktionov O.N., Kuznetsov A.V., Piskunov M.A. Harakteristiki nastila iz lesosechnykh othodov i sostoyanie grunta na trelevochnom voloke. *Uchenye Zapiski petrozavodskogo state university*, 2009, no. 7, pp. 90–95. (In Russ.)

Grigor'ev I.V., Zhukova A.I., Grigor'eva O.I., Ivanov A.V. Sredoschchadyashchie tekhnologii razrabotki lesosek v usloviyah Severo- Zapadnogo regiona Rossijskoj Federacii: monografiya. SPb.: Izd-vo SPbGLTA, 2008. 317 p. (In Russ.)

Ilintsev A., Bogdanov A., Nakvasina E., Amosova I., Koptev S., Tretyakov S. The natural recovery of disturbed soil, plant cover and trees after clear-cutting in the Boreal Forests, Russia. *iForest*, 2020, vol. 13, pp. 531–540. DOI: 10.3832/ifor3371-013

Ilintsev A., Nakvasina E., Tretyakov S., Koptev S., Bogdanov A. The impact of modern logging on the forest environment of felling site in the context of climate change [Electronic resource]. *Building a green, healthy and resilient future with forests: XV World Forestry Congress; 2–6 May 2022, Seoul, Republic of Korea*. URL: <https://drive.google.com/file/d/190XjPT5JO83nfr-aQl-UWhW1MkE9qG7D/view?usp%20target=> (accessed November 10, 2023)

Ilintsev A.S., Nakvasina E.N. Rut formation after the passage of logging machinery in spruce forests on binomial soils. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2021, iss. 237, pp. 168–182. DOI: 10.21266/2079-4304.2021.237.168-182 (In Russ.)

Ilintsev A.S., Nakvasina E.N., Högbom L. Methods of protection forest soils during logging operations. *IVUZ. Lesnoy Zhurnal*, 2021, no. 5, pp. 92–116. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-92-116

Katarov V.K., Syunyov V.S., Rat'kova E.I., Gerasimov Yu. Vliyanie forvarderov na lesnye pochvo-grunty. *Resources and Technology*, 2012, no. 9 (2), pp. 73–81. (In Russ.)

Kulyashov A.P., Kolotilin V.E. Ekologichnost' dvizhitelej transportno-tehnologicheskikh mashin [Environmental friendliness of movers of transport and technological machines.]. M.: Mashinostroenie Publ., 1993. 286 p. (In Russ.)

Latterini F., Dyderski M.K., Horodecki P., Rawlik M., Stefanoni W., Högbom L., Venanzi R., Picchio R., Jagodziński A.M. A Meta-analysis of the effects of ground-based extraction technologies on fine roots in forest soils. *Land Degradation and Development*, 2023, pp. 1–13. DOI: 10.1002/ldr.4902

Naghdi R., Solgi A., Zenner E., Najafi A., Salehi A., Nikooy M. Compaction of forest soils with heavy logging machinery. *Silva Balcanica*, 2017, vol. 18, pp. 25–39.

Nakvasina E.N., Lyubova S.V. Pochvovedenie: ucheb. posobie. [Soil science: textbook]. Arkhangelsk: SAFU Publ., 2016. 146 p. (In Russ.)

Nakvasina E.N., Seryj V.S., Semenov B.A. Polevoj praktikum po pochvovedeniyu [Field workshop on soil science]. Arkhangelsk: Arkhang. State Technical University Publ., 2007. 127 p. (In Russ.)

Nazari M., Arthur E., Lamandé M., Keller T., Bilyera N., Bickel S. A meta-analysis of soil susceptibility to machinery-induced compaction in forest ecosystems across global climatic zones. *Current Forestry Reports*, 2023, pp. 1–12. DOI: 10.1007/s40725-023-00197-y

*Seryj V.S., Anikeyeva V.A., Vyalykh N.I., Kubrak N.I. Izmenenie lesorastitel'nyh uslovij vyrubok pri sovremennyh lesozagotovkah [Changing Forest Site of Cuttings in Modern Logging]. Proceedings of Environmental Studies in the Forests of the European North, Arkhangelsk, AILiLK Publ., 1991 pp. 3–15. (In Russ.)*

*Shabani S. Modelling and mapping of soil damage caused by harvesting in Caspian forests (Iran) using CART and RF data mining techniques. Journal of Forest Science, 2017, vol. 63, pp. 425–432. DOI: 10.17221/125/2016-JFS*

*Siegel-Issem C.M., Burger J.A., Powers R.F., Ponder F., Patterson S.C. Seedling root growth as a function of soil density and water content. Soil Science Society of America Journal, 2005, vol. 69, pp. 215–226. DOI: 10.2136/sssaj2005.0215*

*Sirén M., Ala-Illomäki J., Lindeman H., Uusitalo J., Kiilo K.E.K., Salmivaara A., Ryynänen A. Soil disturbance by cut-to-length machinery on mid-grained soils. Silva Fennica, 2019, vol. 53, no. 2, pp. 1–24. DOI: 10.14214/sf.10134*

*Sklyarov G.A., Sharova A.S. Pochvy lesov Evropejskogo Severa [Forest soils of the European North]. M.: Nauka Publ., 1970. 269 p. (In Russ.)*

*Syunyov V., Sokolov A., Konovalov A., Katarov V., Seliverstov A., Gerasimov Yu., Karvinen S., Vyal'kyu E. Sravnenie tekhnologij lesosechnyh rabot v lesozagotovitel'nyh kompaniyah Respubliki Kareliya [Comparison of wood harvesting methods in the Republic of Karelia]. Joensuu: NII Lesa Finlyandii, 2008. 126 p. (In Russ.)*

*Vadbol'skaya Yu.E., Azarenok V.A. Snizhenie vozdejstviya lesnyh mashin na pochvu pri rubkah uhoda [The reducing negative impacts of forest machinery on soils thinnings]. Lesa Rossii i hozyajstvo v nih, 2015, no. 3 (54), pp. 36–40. (In Russ.)*

*Zaikin A.N., Nikitin V.V., Shcherbakov E.N., Mukovnina M.V. Metodika snizheniya ob''emov tekhnogenного vozdeystviya lesosechnykh mashin na lesnye ekosistemy na osnove matematicheskogo modelirovaniya rezhimov ikh raboty [Method of decrease of forest machinery technogenic impact on forest ecosystems based on operating modes simulating]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2018, vol. 22, no. 5, pp. 54–61. DOI: 10.18698/2542-1468-2018-5-54-61. (In Russ.)*

*Материал поступил в редакцию 03.11.2023*

---

**Ильинцев А.С., Наквасина Е.Н.** Влияние покрытия волоков порубочными остатками на повреждаемость почв при разработке лесосек в северной подзоне тайги // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 249. С. 22–37. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.22-37

Для условий лесосек с избыточным увлажнением почв важно определить возможности их защиты хвостостяной подушкой из порубочных остатков, укладываемых на волоки, при разработке низкобонитетных древостоев. Это необходимо для корректировки технологических параметров разработки лесосек в северной подзоне тайги (Архангельская область) в связи с уязвимостью

почвенно-растительного покрова. В пределах лесосеки, разрабатываемой комплексом лесозаготовительной техники, подбрали участки с 4 проездами форвардера, груженого 20 м<sup>3</sup> еловых и березовых сортиментов. Исходный участок леса представлен ельником черничным V класса бонитета, состава 8Е2Б+С, произрастающим на почвах с двучленными отложениями (верх профиля – супесчаный, низ – тяжелосуглинистый). Провели детальное изучение строения колей, вскрывали почвогрунт и делали описание горизонтов/слоев почвы, определили влажность, твердость и плотность сложения в толще 0–20 см. В качестве контроля отбирали подобные образцы на пасеке. В камеральных условиях определили плотность твердой фазы и рассчитали скважности общую и аэрации (F). Установили, что применение порубочных остатков в объеме 0,008 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>, что характерно для данного типа леса, при минимальном числе проездов техники не исключает негативных последствий повреждения почвенно-растительного покрова, однако способно минимизировать их. Прежде всего, исключается образование колейности в местах проезда груженой техники. Негативное воздействие проявляется в уплотнении лесной подстилки, однако хвостостяная подушка из порубочных остатков предохраняет 20-сантиметровую толщу почвы от уплотнения и нарушения водно-воздушного режима, по сравнению с колеями, формирующимиися при проезде по непокрытым хвостостяной подушкой волокам. При большем числе проездов имеющейся толщи порубочных остатков может не хватить, и повреждения могут быть выше.

**Ключевые слова:** лесозаготовительная техника, волока, почва, уплотнение, защита порубочными остатками.

**Ilintsev A.S., Nakvasina E.N.** Effects of felling residues reinforcement of the strip roads on soil damage after logging operations in the northern taiga subzone. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2024, iss. 249, pp. 22–37 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.22-37

For the conditions of cutting areas with excessive soil moisture, it is important to determine the possibilities of protecting them with a brush mats of felling residues on strip roads when felling low-bonity tree stands. This is necessary to adjust the technological parameters of the development of cutting areas in the northern taiga subzone (Arkhangelsk region) due to the vulnerability of the soil and vegetation cover. Within the boundaries of the cutting area, which was developed by a complex of logging machinery, we selected plots with 4 forwarder passages loaded with 20 m<sup>3</sup> of spruce and birch assortments. The initial area of the forest was represented by blueberry spruce of the V class of bonitet, the stand composition was 80 percent represented by spruce, 20 percent by birch, and pine was a single, growing on soils with binomial deposits (the top of the profile is sandy loam, the bottom is silty clay). We conducted a detailed study of the structure of the ruts, opened the soil and made a description of the horizons / soil layers, determined the moisture, penetration resistance and bulk density in the thickness of 0–20 cm. As a control, we selected

similar samples at the cutting strips. The laboratory determined the particle density and calculated the total porosity and porosity of aeration. It was found that the use of felling residues in the amount of  $0.008 \text{ m}^3/\text{m}^2$ , which is typical for this forest type, with a minimum number of vehicle passes does not exclude the negative consequences of damage to the soil and vegetation cover, but is able to minimize them. First of all, this excludes the formation of ruts in the places where loaded vehicles passed. The negative impact is manifested in the compaction of the forest floor, however, a brush mats of felling residues protects the 20-cm – thickness of the soil from compaction and disturbance of the water-air regime, compared with the ruts on strip roads without felling residues. With a larger number of vehicle passes, the available thickness of the felling residues may not be enough, and the damage may be higher.

**К e y w o r d s :** logging machinery, strip roads, soil, compaction, protection by felling residues.

---

**ИЛЬИНЦЕВ Алексей Сергеевич** – старший научный сотрудник Северного научно-исследовательского института лесного хозяйства, кандидат сельскохозяйственных наук. WoS Resercher ID: N-6286-2019, ORCID: 0000-0003-3524-4665, SPIN-код: 1299-7037, AuthorID: 849116.

163062, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия. E-mail: a.ilintsev@narfu.ru

**ILINTSEV Aleksey S.** – PhD (Agriculture), Senior researcher, Northern Research Institute of Forestry; WoS ResercherID: N-6286-2019, ORCID: 0000-0003-3524-4665, SPIN-код: 1299-7037, AuthorID: 849116.

163062. Nikitova str. 13. Arkhangelsk. Russia. E-mail: a.ilintsev@narfu.ru

**НАКВАСИНА Елена Николаевна** – профессор Северного (Арктического) Федерального университета имени М.В. Ломоносова, доктор сельскохозяйственных наук. WoS ResercherID: A-5165-2013 ORCID: 0000-0002-7360-3975, ScopusID: 35389250000, SPIN-код: 6797-9434 AuthorID: 132027.

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: e.nakvasina@narfu.ru

**NAKVASINA Elena N.** – DSc (Agriculture), Professor, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. WoS ResercherID: A-5165-2013, ORCID: 0000-0002-7360-3975, ScopusID: 35389250000, SPIN-code: 6797-9434, AuthorID: 132027.

163062. Severnaya Dvina emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: e.nakvasina@narfu.ru

**Авла Харди Какакхан Авла, А.С. Алексеев**

**ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА РОСТА ЛЕСОВ  
В ИРАКСКОМ КУРДИСТАНЕ  
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА МЕТЕОКЛИМАТИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

*Введение.* Известно, что климат существенно влияет на состояние лесов, формирование прироста и запаса насаждений древесных растений. Он в значительной мере определяет средний уровень продуктивности лесов, ее межгодовую изменчивость и пространственную структуру. Неблагоприятные метеоклиматические явления в форме, например, засух представляют собой серьезную природную угрозу, влияющую на лесные экосистемы, что может приводить к обезвоживанию древесных растений и влиять на величину площади лесного растительного покрова. Современные изменения климата, происходящие как на местном, так и на глобальном уровне, как произошедшие, так и прогнозируемые, оказывают значительное влияние на частоту чрезвычайных климатических ситуаций, в том числе засух. Для наблюдения за возникновением и интенсивностью засух были созданы многочисленные методы, такие как технологии дистанционного зондирования Земли, позволяющие контролировать влажность почвы и состояние растительности на обширных территориях [Gaznayee et al., 2021; Авла, Алексеев, 2022; Авла, Алексеев, 2024]. Важной задачей для лесного хозяйства является определение потенциальной продуктивности лесов, в том числе когда они могут в данный момент отсутствовать на изучаемом месте обитания или измениться в результате происходящих изменений климата [Benavides, Roig, Osoro, 2009; Diodato, Bellocchi, 2020; Wen-Qiang Gao et al., 2020; Лебедев, 2023].

Важное значение при изучении потенциальной продуктивности лесов имеет периодический закон географической зональности [Григорьев, Бузыко, 1956; Григорьев, 1957], согласно которому в основе разделения поверхности Земли на зоны лежат: 1) количество поглощаемой солнечной энергии, возрастающее от полюсов к экватору и характеризуемое годовыми величинами радиационного баланса земной поверхности;

2) количество поступающей влаги, испытывающее ряд колебаний на фоне общего роста в том же направлении и характеризуемое годовыми суммами осадков; 3) соотношение тепла и влаги, точнее отношение радиационного баланса к количеству тепла, необходимому для испарения годовой суммы осадков. Последняя величина, именуемая радиационным индексом сухости, колеблется от 0 до 5, трижды между полюсом и экватором проходя через значения, близкие к единице: в зонах лиственных лесов умеренного пояса, дождевых лесов субтропического пояса и экваториальных лесов, переходящих в светлые тропические леса. Вследствие возрастания в направлении экватора абсолютных величин радиационного баланса и осадков, каждое прохождение индекса сухости через единицу происходит при всё более высоком притоке тепла и влаги. Это приводит к увеличению от высоких широт к низким широтам интенсивности природных процессов и особенно продуктивности растительного покрова. По некоторым данным метеоклиматические факторы определяют продуктивность мест обитания более чем на 60% [Hägglund, 1981].

В основе периодического закона географической зональности лежит индекс радиационной сухости, характеризующий соотношение тепла и увлажнения. Наиболее известным климатическим индексом роста лесов, также учитывающим соотношение тепла и влаги, является индекс CVP (Climate, Vegetation, Productivity) Патерсона [Paterson, 1956; Мелехов, 1980], который был разработан для прогнозирования максимального потенциала роста лесов с точки зрения возможного прироста объема древесины [Hägglund, 1981; Johnston et al. 1967]. Традиционно этот индекс использовался для больших территорий и даже в глобальном масштабе [Lemieux, 1961; Palomares, Serrano, 2000]. Тем не менее, с помощью новых технологий и наличия большего количества и более качественных наборов и баз данных этот индекс может применяться в региональном масштабе. Несмотря на свои ограничения, он может быть полезен для сравнения территорий, расположенных в пределах одного региона, независимо от наличия или отсутствия деревьев, возраста древостоев или их видового состава [Vanclay, 1994; Rahman, Acter, 2015].

Еще одним примером широко применяемого климатического индекса является гидротермический коэффициент Селянинова, также основанный на соотношении тепла и увлажнения изучаемой территории [Селянинов, 1928; Ионова, Лиховидова, Лобунская, 2019].

Целью настоящей статьи является оценка потенциальной продуктивности лесов Иракского Курдистана на основе анализа гидрометеорологических данных, расчетов индекса CVP Паттерсона и гидротермического коэффициента (ГТК) Селянинова и изучения связей между этими индексами.

*Объекты и методика исследования.* Исследование проводилось в провинции Эрбиль на севере Ирака, занимающей площадь около 14 471 км<sup>2</sup>. Климат в районе исследований преимущественно континентальный, субтропический и полузасушливый, в горных районах – средиземноморский. Осадки выпадают в основном с октября по май, среднегодовое количество осадков составляет в зависимости от расположения от менее чем 100 мм/год на юго-западе изучаемой территории до более 1200 мм/год в горных районах на северо-востоке. В течение года дневная температура обычно колеблется от 5 °C зимой до 35 °C летом. Однако в южных частях региона температура может превышать 50 °C [Integrated drought risk management, 2014].

На рис. 1 представлена характеристика района исследований. По данным рис. 1 видно, что изучаемая территория находится в северо-восточной части Ирака, метеорологические станции расположены на всей этой территории, годовые осадки закономерно снижаются с северо-востока на юго-запад, от горных районов к равнинным, в соответствии с высотой над уровнем моря, описываемой цифровой моделью рельефа. Анализ гидрометеорологических данных выявил сильные засухи в 1999, 2000, 2008, 2012 и 2021 годах, которые привели к соответствующим сокращениям растительного покрова, с наибольшими последствиями в районах Чоман и Хабат в 2008 году. Обильные осадки на всей территории были зарегистрированы в 2019 году, что оказало положительное воздействие на растительный покров. На северо-востоке региона выпадали более постоянные осадки, а на юго-западе наблюдались большие пространственные вариации их величины.

Сельское хозяйство в этом регионе основано как на дождевых осадках, так и на дополнительном орошении [Gaznayee et al., 2023]. Наличие сельского хозяйства в данном регионе подтверждает возможности роста здесь и древесных растений, так как их потребность в воде значительно ниже [Лир, Польстер, Фидлер, 1974]. Основными древесными породами в изучаемом регионе являются сосна калабрийская, кипарис вечнозеленый, дуб, фисташка, тuya западная и мелия ацедарах.

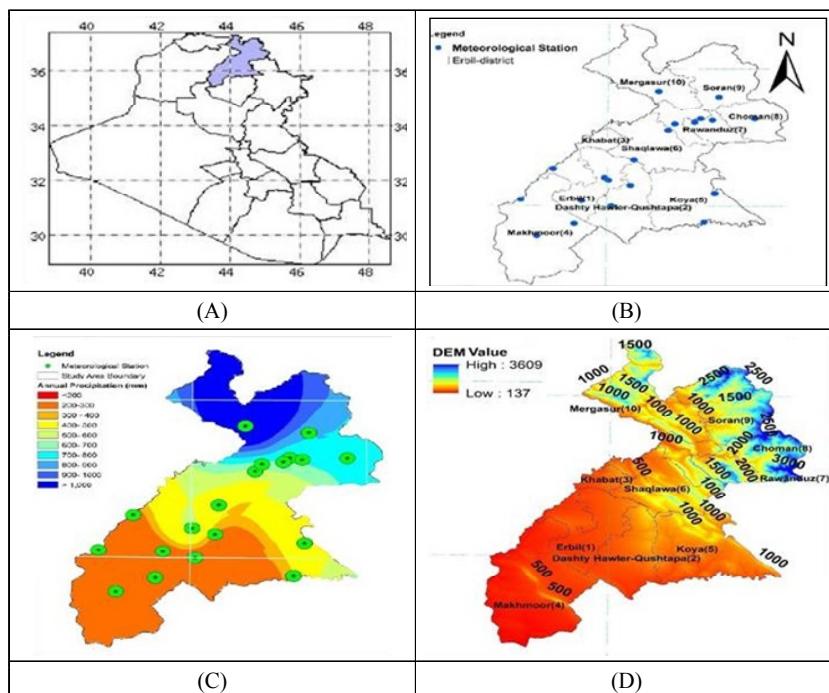


Рис. 1. Карты характеристик исследуемой территории. (А) расположение провинции Эрбиль (В); расположение метеорологических станций, (С); географическое распределение годовых осадков (мм/год) в провинции Эрбиль в период 1995–2021 гг.; (Д) цифровая модель рельефа провинции Эрбиль

Fig. 1. Maps with characteristics of the studied area. (A) the Erbil area on the map of Iraq; (B) the locations of meteorological stations; (C) the geographical distribution of annual precipitation (mm/year) in Erbil province for the period 1995–2021; (D) a digital elevation model of Erbil province

Растительность занимает относительно небольшую долю площади изучаемой территории, в среднем 10,85% и колеблется от 6,45% в районе Хабат до 21,65% в районе Мергасур (рис. 1).

Для оценок потенциальной продуктивности лесов на изучаемой территории рассчитывался климатический индекс Патерсона CVP по следующей формуле:

$$CVP = \frac{T_v * P * G * E}{T_a * 12 * 100},$$

где  $T_V$  – средняя температура наиболее теплого месяца в году, °C;  $T_a$  – разность средних температур самого теплого и холодного месяцев, °C;  $P$  – годовая сумма осадков, мм;  $G$  – продолжительность вегетационного периода, месяцы;  $E$  – индекс эвапотранспирации (редукционный коэффициент на транспирацию и испарение), %. Индекс эвапотранспирации определяется по количеству падающей световой энергии:

$$E = 100 * Rp / Rs, \quad (2)$$

где  $Rp$  – количество падающей световой энергии на полюсе;  $Rs$  – количество падающей световой энергии в изучаемом районе.

Климатический индекс CVP от полюса до экватора варьирует от 0 до 20000 и более. В районах, где CVP меньше или равен 25, существование растительности невозможно.

Оценка гидротермических условий для роста лесов осуществлялась с помощью гидротермического коэффициента (ГТК) Селянинова:

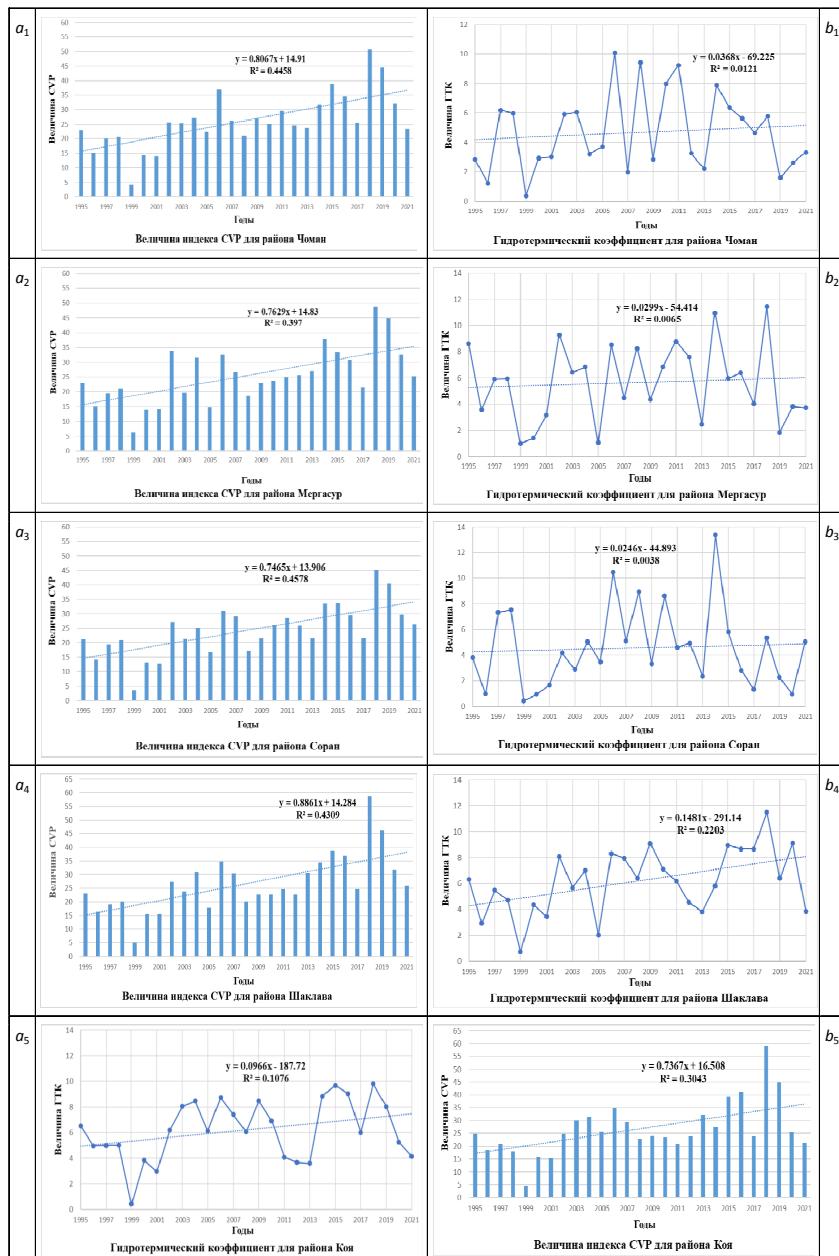
$$\text{ГТК} = (\text{сумма осадков за год}) / (\text{сумма температур выше } 10 \text{ }^{\circ}\text{C за этот же период, уменьшенная в 10 раз}). \quad (3)$$

Обработка гидрометеорологических данных, изучение связей между индексами CVP и ГТК осуществлялись методами математической статистики с применением пакета прикладных программ STATGRAPHICS 19.0.

*Результаты и обсуждение.* На рис. 2 представлены результаты расчетов индексов CVP и ГТК для 7 административных районов изучаемой территории: Чоман, Мергасур, Соран, Шаклава, Койя, Хабат, Эрбиль центральный. Данные представлены за период с 1995 по 2021 годы.

Данные рис. 2. показывают наличие тенденции к увеличению обеих индексов за изучаемый период. Более выражена количественно тенденция к увеличению индекса CVP. Кроме этого графики показывают наличие значительных колебаний (отклонений) индексов от трендов. Для изучения выявленных колебаний индексов была проверена гипотеза об их случайном характере с помощью медианного теста, во всех случаях было доказано, что колебания индексов имеют случайный характер с 95%-ным уровнем доверительной вероятности.

В табл. 1 и 2 приведены статистические характеристики индексов CVP и ГТК для всех изучаемых районов за период с 1995 по 2021 годы: среднее значение, доверительный интервал среднего при уровне доверительной вероятности 95%, коэффициент вариации, минимальное значение, максимальное значение и разница между ними (размах колебаний).



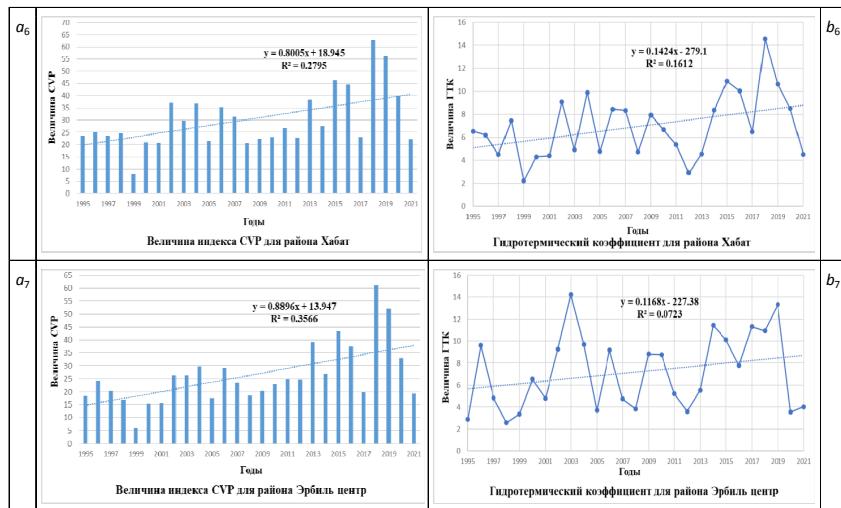


Рис. 2. Изменение во времени индексов СВР (a<sub>1</sub>–a<sub>7</sub>) и ГТК (b<sub>1</sub>–b<sub>7</sub>) по районам изучаемой территории за период с 1995 по 2021. Районы провинции: 1 – Чоман, 2 – Мергасур, 3 – Соран, 4 – Шаклава, 5 – Кон, 6 – Хабат, 7 – Эрбиль центр

Fig. 2. Time change of CVP (a<sub>1</sub>–a<sub>7</sub>) and HTC (b<sub>1</sub>–b<sub>7</sub>) indices by regions of the studied area for the period from 1995 to 2021. Province districts: 1 – Choman, 2 – Mergasur, 3 – Soran, 4 – Shaqlawa, 5 – Koya, 6 – Kabat, 7 – Erbil center

Таблица 1

**Статистические характеристики индекса СВР по районам изучаемой территории за период с 1995 по 2021 годы**

**Statistical characteristics of the CVP index for the districts of the studied area for the period from 1995 to 2021**

| Н<br>п/п           | Район        | Среднее<br>за период | Доверительный<br>интервал | Коэффициент<br>вариации, % | Min  | Max   | Max-<br>Min |
|--------------------|--------------|----------------------|---------------------------|----------------------------|------|-------|-------------|
| 1.                 | Чоман        | 26,20                | 3,79                      | 35,9                       | 4,26 | 50,67 | 46,41       |
| 2.                 | Мергасур     | 25,51                | 3,80                      | 37,0                       | 6,20 | 48,80 | 42,60       |
| 3.                 | Соран        | 24,36                | 3,46                      | 35,3                       | 3,63 | 45,24 | 41,61       |
| 4.                 | Шаклава      | 26,69                | 4,24                      | 39,4                       | 5,01 | 58,78 | 53,77       |
| 5.                 | Койа         | 26,82                | 4,19                      | 38,8                       | 4,58 | 59,23 | 54,65       |
| 6.                 | Хабат        | 30,15                | 4,75                      | 39,1                       | 8,00 | 62,70 | 54,70       |
| 7.                 | Эрбиль центр | 26,40                | 4,68                      | 44,0                       | 6,11 | 61,08 | 54,97       |
| Среднее по районам |              | 26,59                | 4,13                      | 38,5                       | 5,40 | 55,21 | 49,81       |

Из данных табл. 1 следует, что средние за период 1995–2021 гг. величины индекса Патерсона CVP не очень сильно различаются по районам изучаемой территории, об этом же свидетельствует и небольшая величина 95%-го доверительного интервала. Однако коэффициент вариации и большие различия между минимальным и максимальным значениями (размах колебаний) указывают на то, что величины индекса CVP сильно варьируют по годам изучаемого периода. Так, в среднем по всем районам максимальное значение индекса превосходит минимальное более чем в 10 раз, это же справедливо и отдельно для районов Чоман, Соран, Шаклава, Койя и Эрбиль центр, то есть для 5 районов из 7. Исключение составляют районы Мергасур и Хабат, где максимальное значение индекса CVP превосходит минимальное приблизительно в 8 раз, что тоже не мало.

*Таблица 2*

**Статистические характеристики индекса ГТК  
по районам изучаемой территории за период с 1995 по 2021 годы**

**Statistical characteristics of the HTC index for the districts  
of the studied area for the period from 1995 to 2021**

| N<br>п/п           | Район        | Среднее<br>за год | Доверитель-<br>ный интервал | Коэффициент<br>вариации, % | Min  | Max   | Max-<br>Min |
|--------------------|--------------|-------------------|-----------------------------|----------------------------|------|-------|-------------|
| 1.                 | Чоман        | 4,67              | 1,05                        | 55,8                       | 0,35 | 10,08 | 9,73        |
| 2.                 | Мергасур     | 5,65              | 1,16                        | 51,1                       | 1,01 | 11,42 | 10,41       |
| 3.                 | Соран        | 4,57              | 1,26                        | 68,2                       | 0,42 | 13,38 | 12,96       |
| 4.                 | Шаклава      | 6,21              | 0,99                        | 39,6                       | 0,76 | 11,53 | 10,77       |
| 5.                 | Койя         | 6,21              | 0,92                        | 36,9                       | 0,43 | 9,80  | 9,37        |
| 6.                 | Хабат        | 6,92              | 1,11                        | 39,9                       | 2,21 | 14,53 | 12,32       |
| 7.                 | Эрбиль центр | 7,17              | 1,36                        | 47,2                       | 2,56 | 14,22 | 11,66       |
| Среднее по районам |              | 5,91              | 1,12                        | 48,4                       | 1,11 | 12,14 | 11,03       |

Данные табл. 2 в целом подтверждают выводы, сделанные из табл. 1, о высокой погодичной изменчивости ГТК по всем районам изучаемой территории за указанный промежуток времени. Более того, коэффициент вариации индекса ГТК выше индекса CVP на 10%. Существует следующая шкала градаций коэффициента вариации: если он < 10%, изменчивость показателя оценивается как незначительная, 10–20% – изменчивость средняя,

20–33% – изменчивость значительная, > 33% – изменчивость высокая. Если пользоваться этой шкалой, то изменчивость индексов СВР и ГТК, которые равны 38,5 и 48,4% соответственно, следует оценить как высокую. Существует классификация территорий по величине индекса ГТК: влажная – 1,6–1,3; слабо засушливая – 1,3–1,0; засушливая – 1,0–0,7; очень засушливая – 0,7–0,4; сухая – <0,4 [Evarte-Bundere, Evarts-Bunders, 2012; Ионова, Лиховидова, Лобунская, 2019; Кочугова, 2022]. Данные табл. 2 указывают на высокую контрастность изучаемой территории по степени увлажнения, минимальные значения индекса показывают ее принадлежность к засушливым и сухим категориям, в то время как максимальные – к влажным.

Таким образом, метеоклиматические условия для роста лесов в изучаемом районе являются крайне нестабильными.

Для расчетов потенциальной производительности лесов изучаемого района была использована следующая шкала соответствия величин индекса СВР и текущего прироста древесных растений по запасу (<https://helpiks.org/7-58126.html> табл. 3):

Таблица 3

**Шкала соответствия величин индекса СВР и текущего прироста древесных растений по запасу**

**The correspondence between the values of the CVP index and the current increment of woody plants growing stock**

| Величина индекса СВР                      | 0–25 | 25–100 | 101–300 | 301–1000 | 1001–5000 | >5000 |
|---|------|--------|---------|----------|-----------|-------|
| Потенциальный прирост, м <sup>3</sup> /га | 0    | 0–3    | 3–6     | 6–9      | 9–12      | >12   |

На основе данных табл. 3 для проведения расчетов потенциального прироста древесных растений на основе данных о конкретных величинах индекса СВР было получено уравнение связи прироста и величины индекса и построена калибровочная кривая в следующем виде:

$$y = K * (1 - e^{-a*x}), \quad (3)$$

где  $y$  – величина потенциального текущего прироста, м<sup>3</sup>/га·год,  $x$  – величина индекса СВР,  $K$  и  $a$  – параметры. Оценка параметров с помощью метода нелинейной регрессии дала следующие результаты:  $K = 12,717$ ,  $a = 0,002$ , коэффициент детерминации уравнения равен 94,5%.

Результаты расчетов потенциальной продуктивности лесов на изучаемой территории приведены в табл. 4.

*Таблица 4***Потенциальная продуктивность лесов на изучаемой территории по районам****Potential productivity of forests on the studied area by region**

| N п/п              | Регион       | Потенциальный прирост, м <sup>3</sup> /га·год |         |              |
|--------------------|--------------|---|---------|--------------|
|                    |              | минимальный                                   | средний | максимальный |
| 1.                 | Чоман        | 0   | 0,7     | 1,3          |
| 2.                 | Мергасур     | 0   | 0,6     | 1,2          |
| 3.                 | Соран        | 0   | 0,6     | 1,1          |
| 4.                 | Шаклава      | 0   | 0,7     | 1,4          |
| 5.                 | Койя         | 0   | 0,7     | 1,5          |
| 6.                 | Хабат        | 0   | 0,8     | 1,5          |
| 7.                 | Эрбиль центр | 0   | 0,7     | 1,5          |
| Среднее по районам |              | 0   | 0,7     | 1,5          |

Данные табл. 4 показывают, что потенциальный прирост лесов на изучаемой территории невысок – максимально возможные значения составляют 1,5 м<sup>3</sup>/га·год – и, более того, может совсем отсутствовать в связи с неблагоприятными гидрометеорологическими условиями.

Была изучена связь между величинами индексов СВР и ГТК, оказалось, что они тесно связаны между собой простой пропорциональной зависимостью СВР = 4,00582 ГТК с коэффициентом детерминации 86,0%. Так как получить информацию для расчетов индекса ГТК проще, то он может быть использован для оценки потенциальной продуктивности лесов на изучаемой территории.

**Заключение.** В результате проведенного исследования установлено, что индексы СВР и ГТК, определяющие потенциальную продуктивность растительного покрова, в том числе и лесов, на изучаемой территории имеют высокую годичную изменчивость для всех рассмотренных районов. Средние коэффициенты вариации индексов СВР и ГТК равны 38,5 и 48,4%, соответственно. Изучение изменений индексов по годам показало наличие линейной тенденции (тренда) к их увеличению за изучаемый период. Более выражена количественно, по величине коэффициента детерминации, тенденция к увеличению индекса СВР. Кроме этого графики из-

менений индексов показали наличие значительных колебаний (отклонений) индексов от трендов. Гипотеза об их случайном характере была проверена с помощью медианного теста и во всех случаях получила подтверждение.

Для расчетов потенциального прироста древесной растительности на основе литературных данных получено уравнение связи величины прироста и индекса СВР с высоким коэффициентом детерминации, равным 94,5%. С помощью этого уравнения проведены расчеты потенциального прироста древесной растительности для всех районов на изучаемой территории. Расчеты показали, что в результате высокой изменчивости индексов СВР и ГТК по годам изучаемого периода потенциальная продуктивность лесов на изучаемой территории в целом невысокая и составляет в среднем 0,7 м<sup>3</sup>/га·год. В благоприятные годы максимальные значения прироста могут достигать 1,5 м<sup>3</sup>/га·год, а в неблагоприятные прирост может падать до нуля, ставя таким образом древесную растительность на грань выживания.

Установлена прямая пропорциональная связь между величинами индексов СВР и ГТК с коэффициентом детерминации 86,0% для изучаемой территории, что позволяет использовать один индекс вместо другого в случае такой необходимости.

В целом, гидротермические условия для роста лесов в районе г. Эрбиль следует оценить как неблагоприятные, несмотря на выявленную положительную тенденцию к увеличению индексов СВР и ГТК, положительное влияние увеличения которых почти полностью может быть уничтожено наличием экстремальных случайных колебаний.

*Конфликт интересов.* Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Библиографический список.**

*Авла Х.К.А., Алексеев А.С. Анализ состояния растительного покрова Иракского Курдистана с использованием материалов дистанционного зондирования земли и ГИС-технологий // Цифровые технологии в лесном секторе : матер. III науч.-технич. конференции-вебинара 24–25 февраля 2022 года. Санкт-Петербург. С. 3–5. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49615653&pf=1>*

*Авла Х.К.А., Алексеев А.С. Изучение гидротермических условий для роста лесов в Иракском Курдистане с применением материалов дистанционного зондирования Земли // Инновационное развитие современной науки: новые подходы и актуальные исследования : сб. матер. II Междунар. науч.-практич. конф. Москва, 31 января 2024 года. С. 280–286. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=61336318>*

*Григорьев А.А.* О некоторых основных проблемах физической географии // Известия АН СССР. Сер. геогр. 1957. № 6. С. 129–132.

*Григорьев А.А., Будыко М.И.* О периодическом законе географической зональности // Доклады АН СССР. 1956. Т. 110. № 1. С. 129–132.

Закон Паттерсона–Векка // Хелпикс – интернет-помощник. URL: <https://help.iks.org/7-58126.html>

*Ионова Е.В., Лиховидова В.А., Лобунская И.А.* Засуха и гидротермический коэффициент увлажнения как один из критериев оценки степени ее интенсивности (обзор литературы) // Зерновое хозяйство России. 2019. № 6. С. 18–22. DOI: 10.31367/2079-8725-2019-66-6-18-22

*Кочугова Е.А.* Пространственно-временная изменчивость атмосферного увлажнения на территории Бурятии в вегетационный период // Вестник Бурятского государственного университета. Биология. География. 2022. № 3. С. 33–40. DOI: 10.18101/2587-7143-2022-3-33-40

*Лебедев А.В.* Эмпирические модели роста и производительности древостоев по данным долговременных наблюдений : дисс. ... д-ра с.-х. наук. 2023. 425 с.

*Лир Х., Польстер Г., Фидлер Г.И.* Физиология древесных растений. М.: Лесн. пром-сть, 1974. 420 с.

*Мелехов И.С.* Лесоведение: учебник для вузов. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 408 с.

*Селянинов Г.Т.* О сельскохозяйственной оценке климата // Труды по сельскохозяйственной метеорологии. 1928. Т. 20. С. 165–177.

*Benavides R., Roig S., Osoro K.* Potential productivity of forested areas based on a biophysical model. A case study of a mountainous region in northern Spain // Annals of Forest Science. 2009. 66. P. 1–10. Available online at: INRA, EDP Sciences, 2009 [www.afs-journal.org](http://www.afs-journal.org). DOI: 10.1051/forest/2008080

*Diodato N., Bellochi G.* Spatial probability modelling of forest productivity indicator in Italy // Ecological Indicators. 2020 (108). P. 1–8. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105721>

*Evarte-Bundere G., Evarts-Bunders P.* Using of the hydrothermal coefficient (HTC) for interpretation of distribution of non-native tree species in Latvia on example of cultivated species of genus *Tilia* // Acta Biologica Universitatis Daugavpiliensis. 2012. No. 12(2). P. 135–148.

*Gaznayee H.A., Al-Quraishi A.M., Al-Sulttani A.H.* Drought Spatiotemporal Characteristics Based on a Vegetation Condition Index in Erbil, Kurdistan Region, Iraq // Iraqi Journal of Science. 2021. No. 24. P. 4545–4556.

*Gaznayee H.A., Zaki S.H., Al-Quraishi A.M., Aliehsan P.H., Hakzi K.K., Razvanchy H.A., Riksen M., Mahdi K.* Integrating Remote Sensing Techniques and Meteorological Data to Assess the Ideal Irrigation System Performance Scenarios for Improving Crop Productivity // Water Resources Research. 2023. No. 15(8). P. 1605. URL: <https://doi.org/10.3390/w15081605>.

*Hägglund B.* Evaluation of forest site productivity // Forest Abstracts. 1981. Vol 42. No. 11. P. 515–527. Review Article 42. Downloaded from <https://cabidigitallibrary.org/185.24.53.116>, on 03/06/24

Integrated drought risk management – DRM – national framework for Iraq. An analysis report // United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). Iraq Office. March 2014. 141 p. URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf000022834>

*Lemieux G.L.* An evaluation of Paterson's CVP Index in Eastern Canada, Canada Department of Forestry, Forest Research Branch // Technical Note. 112. 1961. 12 p.

*Palomares S.O., Serrano S. F.* Mapa de productividad potencial forestal de España. Cartografía digital, Dirección General de Conservación de la Naturaleza, MMA. Madrid, 2000. 317 p.

*Paterson S.S.* The forest area of the world and its potential productivity. Royal University of Göteborg, Department of Geography. Göteborg, 1956. 216 p.

*Rahman S., Akter S.* Climate to Forest Productivity: Implication of Paterson's CVP Index // Research Journal of Forestry. 2015. 9 (2). P. 27–34. ISSN: 1819-3439. DOI: 10.3923/rjf.2015.27.34

*Vanclay J.K.* Modelling forest growth and yield. Applications to mixed tropical forests. CAB International, 1994. 312 p.

*Wen-Qiang Gao, Xiang-Dong Lei, Li-Yong Fu.* Impacts of climate change on the potential forest productivity based on a climate-driven biophysical model in northeastern China. *Journal of Forestry Research*, 2020, 31(6). P. 2273–2286.

## References

*Awla Kh.K.A., Alekseev A.S.* Analiz sostoyaniya rastitel'nogo pokrova Irakskogo Kurdistana c ispol'zovaniem materialov distantsionnogo zondirovaniya zemli i GIS-tehnologij. *Tsifrovye tekhnologii v lesnom sektore*: mater. III nauch.-tekhnich. konferentsii–vebinara, 24–25 fevralya 2022 goda. SPb., pp. 3–5. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49615653&pff=1> (In Russ.)

*Awla Kh.K.A., Alekseev A.S.* Izuchenie gidrotermicheskikh uslovij dlya rosta lesov v Irakskom Kurdistane s primeneniem materialov distantsionnogo zondirovaniya Zemli. *Innovatsionnoe razvitiye sovremennoj nauki: novye podkhody I aktual'nye issledovaniya*: sb. mater. II Mezhdunar. nauch.-praktich. konferentsii. Moskva, 31 yanvarya 2024 goda, pp. 280–286. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=61336318> (In Russ.)

*Benavides R., Roig S., Osoro K.* Potential productivity of forested areas based on a biophysical model. A case study of a mountainous region in northern Spain. *Annals of Forest Science*, 66, 2009, 108, pp. 1–10. Available online at: INRA, EDP Sciences, 2009 [www.afs-journal.org](http://www.afs-journal.org). DOI: 10.1051/forest/2008080

*Diodato N., Bellochi G.* Spatial probability modelling of forest productivity indicator in Italy. *Ecological Indicators*, 2020 (108), pp. 1–8. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105721>

*Evarte-Bundere G., Evarts-Bunders P.* Using of the hydrothermal coefficient (HTC) for interpretation of distribution of non-native tree species in Latvia on example of cultivated species of genus *Tilia*. *Acta Biologica Universitatis Daugavpiliensis*, 2012, no. 12(2), pp. 135–148.

*Gaznayee H.A., Al-Quraishi A.M., Al-Sultani A.H.* Drought Spatiotemporal Characteristics Based on a Vegetation Condition Index in Erbil, Kurdistan Region, Iraq. *Iraqi Journal of Science*, 2021, no. 24, pp. 4545–4556.

*Gaznayee H.A., Zaki S.H., Al-Quraishi A.M., Aliehsan P.H., Hakzi K.K., Razvanchy H.A., Riksen M., Mahdi K.* Integrating Remote Sensing Techniques and Meteorological Data to Assess the Ideal Irrigation System Performance Scenarios for Improving Crop Productivity. *Water Resources Research*, 2023, no. 15(8), pp. 1605. URL: <https://doi.org/10.3390/w15081605>.

*Grigor'ev A.A.* O nekotorykh osnovnykh problemakh fizicheskoy geografii. *Izvestiya AN SSSR. Ser. Geogr.*, 1957, no. 6, pp. 129–132. (In Russ.)

*Grigor'ev A.A., Budyko M.I.* O periodicheskem zakone geograficheskoy zonal'nosti. *Doklady AN SSSR*, 1956, vol. 110, no. 1, pp. 129–132. (In Russ.)

*Hägglund B.* Evaluation of forest site productivity. *Forest Abstracts*, 1981, vol 42, no 11, pp. 515–527. Review Article 42. URL: <https://cabidigitallibrary.org> by 185.24.53.116, on 03/06/24

Integrated drought risk management – DRM – national framework for Iraq. An analysis report. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). Iraq Office. March 2014. 141 p. URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf000022834>

*Ionova E.V., Likhovidova V.A., Lobunskaya I.A.* Zasukha I gidrotermicheskij koehffitsient uvlazhneniya kak odin iz kriteriev otsenki stepeni ee intensivnosti (obzor literatury). *Zernovoe khozyajstvo Rossii*, 2019, no. 6, pp. 18–22. DOI: 10.31367/2079-8725-2019-66-6-18-22. (In Russ.)

*Kochugova E.A.* Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' atmosfernogo uvlazhneniya na territorii Buryatii v vegetatsionnyj period. *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya. Geografiya*, 2022, no. 3, pp. 33–40. DOI: 10.18101/2587-7143-2022-3-33-40. (In Russ.)

*Lebedev A.V.* Ehmpiricheskie modeli rosta I proizvoditel'nosti drevostoev po dannym dolgovremennykh nablyudenij: diss. ... d-ra s.-kh. nauk. 2023. 425 p. (In Russ.)

*Lemieux G.L.* An evaluation of Paterson's CVP Index in Eastern Canada, Canada Department of Forestry, Forest Research Branch. *Technical Note*, 112, 1961. 12 p.

*Lir Kh., Pol'ster G., Fidler G.I.* Fiziologiya drevesnykh rastenij. M.: Lesn. prom-st', 1974. 420 p. (In Russ.)

*Melekhov I.S.* Lesovedenie: uchebnik dlya vuzov. M.: Lesn. prom-st'. 1980. 408 p. (In Russ.)

*Palomares S.O., Serrano S.F. Mapa de productividad potencial 52orestall de España. Cartografía digital, Dirección General de Conservación de la Naturaleza, MMA. Madrid, 2000. 317 p.*

*Paterson S.S. The forest area of the world and its potential productivity. Royal University of Göteborg, Department of Geography. Göteborg, 1956. 216 p.*

*Rahman S., Akter S. Climate to Forest Productivity: Implication of Paterson's CVP Index. Research Journal of Forestry. 2015. 9 (2). P. 27–34. ISSN 1819-3439 / DOI: 10.3923/rjf.2015.27.34*

*Selyaninov G.T. O sel'skokhozyajstvennoj otsenke klimata. Trudy po sel'skokhozyajstvennoj meteorologii, 1928, vol. 20, pp. 165–177. (In Russ.)*

*Vanclay J.K. Modelling forest growth and yield. Applications to mixed tropical forests. CAB International, 1994. 312 p.*

*Wen-Qiang Gao, Xiang-Dong Lei, Li-Yong Fu. Impacts of climate change on the potential forest productivity based on a climate-driven biophysical model in northeastern China. Journal of Forestry Research. 2020. 31(6). P. 2273–2286.*

*Zakon Pattersona–Vekka. Helpiks – internet-pomoshchnik. URL: <https://helpiks.org/7-58126.html> (In Russ.)*

*Материал поступил в редакцию 05.04.2024*

---

**Авла Харди Какакхан Авла, Алексеев А.С.** Оценка потенциала роста лесов в Иракском Курдистане на основе анализа метеоклиматических данных // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 249. С. 38–54. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.38-54

Установлено, что индексы CVP и ГТК, определяющие потенциальную продуктивность растительного покрова, в том числе и лесов, на изучаемой территории имеют высокую годичную изменчивость для всех рассмотренных районов. Средние коэффициенты вариации индексов CVP и ГТК равны 38,5 и 48,4%, соответственно. Изучение изменений индексов по годам показало наличие линейной тенденции (тренда) к их увеличению за изучаемый период. Более выражена тенденция к увеличению индекса CVP. Графики изменений индексов показали наличие значительных случайных колебаний (отклонений) индексов от трендов. Случайный характер колебаний проверен с помощью медианного теста. Для расчетов потенциального прироста древесной растительности на основе литературных данных получено уравнение связи величины прироста и индекса CVP с высоким коэффициентом детерминации, равным 94,5%. С помощью этого уравнения проведены расчеты потенциального прироста древесной растительности для всех районов на изучаемой территории. Расчеты показали, что в результате высокой изменчивости индексов CVP и ГТК по годам изучаемого периода (1995–2021 гг.) потенциальная продуктивность

лесов на изучаемой территории составляет в среднем  $0,7 \text{ м}^3/\text{га}\cdot\text{год}$ . В благоприятные годы максимальные значения прироста могут достигать  $1,5 \text{ м}^3/\text{га}\cdot\text{год}$ , а в неблагоприятные прирост может падать до нуля, ставя таким образом древесную растительность на грань выживания. Установлена прямая пропорциональная связь между величинами индексов CVP и ГТК с коэффициентом детерминации 86,0% для изучаемой территории, что позволяет использовать один индекс вместо другого в случае такой необходимости. В целом, гидротермические условия для роста лесов в районе г. Эрбиль следует оценить как неблагоприятные.

**Ключевые слова:** температура, осадки, индекс Патерсона, CVP, гидротермический коэффициент, ГТК, прирост.

**Awla Hardy Kakakhan Awla, Alekseev A.S.** Assessment of the forests growth potential in Iraqi Kurdistan based on the analysis of hydro meteorological data. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 249, pp. 38–54 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.38-54

It was found that the CVP and HTC indices, which determine the potential productivity of vegetation cover, including forests, in the studied area, have high annual variability for all the considered districts. The average coefficients of variation of the CVP and HTC indices are 38.5 and 48.4%, respectively. The study of changes in indices over the years showed the presence of a linear trend towards their increase over the period under study. The tendency to increase the CVP index is more pronounced. The graphs of index changes showed the presence of significant random fluctuations (deviations) of indices from trends. The random nature of the fluctuations was verified using a median test. To calculate the potential growth of forests based on the literature data, an equation was obtained for the relationship between the growth rate and the CVP index with a high coefficient of determination equal to 94.5%. Using this equation, calculations of the potential growth of wood volume for all areas in the study area were carried out. Calculations have shown that as a result of the high variability of the CVP and HTC indices over the years of the studied period (1995–2021), the potential productivity of forests in the studied area is on average  $0.7 \text{ м}^3/\text{га}\cdot\text{year}$ . In favorable years, the maximum growth values can reach  $1.5 \text{ м}^3/\text{га}\cdot\text{year}$ , and in unfavorable years, the increase can fall to zero, thus putting woody vegetation on the brink of survival. A direct proportional relationship has been established between the values of the CVP and HTC indices with a determination coefficient of 86.0% for the studied territory, which allows using one index instead of the other if necessary. In general, the hydrothermal conditions for forest growth in the Erbil region area should be assessed as unfavorable.

**Keywords:** temperature, precipitation, Paterson index, CVP, hydrothermal coefficient, HTC, forest growth.

**Авла Харди Какакхан Авла** – аспирант кафедры лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. ORCID: 0009-0004-5115-8286.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: hardy.awla@su.edu.krd

**Awla Hardy Kakakhan Awla** – PhD student of the Department of Forest Inventory, Management and Geoinformation Systems St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0009-0004-5115-8286.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: hardy.awla@su.edu.krd

**АЛЕКСЕЕВ Александр Сергеевич** – заведующий кафедрой лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор географических наук, профессор. ORCID: 0000-0001-8795-2888, SPIN-код: 8115-9103, Web of Science Researcher ID: F-6891-2010, Scopus Author ID: 55892224800.

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

**ALEKSEEV Aleksandr S.** – DSc (Geography), Professor, Head of the Department of Forest Inventory, Management and Geographical Information Systems, St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0000-0001-8795-2888, SPIN-код: 8115-9103, Web of Science Researcher ID: F-6891-2010, Scopus Author ID: 55892224800

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: a\_s\_alekseev@mail.ru

**Ф.С. Ильин, В.М. Сидоренков, Х.Г. Мусин, А.Х. Гайфуллин,  
В.И. Чернов**

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА И УСТОЙЧИВОСТИ ДУБРАВ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИННОВАЦИОННЫХ  
И УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
В ЛЕСАХ СРЕДНЕГО ПОВОЛЖЬЯ**

*Введение.* Состояние дубрав Среднего Поволжья на протяжении многих десятилетий ухудшается. Снижаются биологическая устойчивость, продуктивность и качество насаждений дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) по причине значительного воздействия комплекса неблагоприятных природно-климатических факторов (морозы, засухи, вредители, дикие животные и др.), а также последствий недостаточно эффективной хозяйственной деятельности [Глебов и др., 1998; Ильин и др., 2021; Мурзов и др., 1992, 1993, 1986; Петров и др., 2022; Пуряев и др., 2018; Яковлев и др., 1999].

Учитывая все негативные явления, отражающиеся на состоянии дубрав Среднего Поволжья за последние 50 лет, важнейшим вопросом в лесовыращивании насаждений дуба является их устойчивость к отрицательным (нередко экстремальным) природно-климатическим и антropогенным факторам. За последние 100 с лишним лет, массовое усыхание дубрав наступало 4 раза: в 40-х, 60-х, 70-х и начале 90-х годов прошлого столетия. В первом случае оно наблюдалось после морозов зимы 1941/1942 гг., во втором – в период 1963–1969 гг. после систематического повреждения древостоев дуба комплексом листогрызущих насекомых (зимняя пяденица, дубовая и боярышниковая листовёртки), в третьем случае – после морозной зимы 1978/1979 гг. и в четвёртом случае – после массового повреждения в период с 1991 по 1994 гг. дубовой и боярышниковой листовёртками. Многочисленные исследования [Глебов и др., 1998; Калиниченко и др., 2000; Мурзов и др., 1992, 1993, 1986; Пуряев и др., 2018; Ильин и др., 2021, 2023; Яковлев и др., 1999] показывают, что основными причинами деградации дубрав являются:

1. Природно-климатические процессы, происходящие вне зависимости от человека: цикличность в изменении климата, аномальные погодные явления – морозы, засуха – снижение уровня грунтовых вод, негативное воздействие диких животных и др.

2. Антропогенные факторы: отрицательная селекция, начиная с начала 18 века, при строительстве корабельного флота с вырубкой лучших деревьев дуба, а также недостаточно эффективная деятельность при проведении лесохозяйственных работ, в том числе создание и формирование чистых по составу и простых по форме насаждений дуба.

Многие исследователи утверждают, что более высокой устойчивостью обладают смешанные насаждения дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) с липой мелколистной (*Tilia cordata* Mill.), кленом остролистным (*Acer platanoides* L.), вязом гладким (*Ulmus laevis* Pall.) и кустарниками – лещиной обыкновенной (*Corylus avellana* L.), рябиной обыкновенной (*Sorbus aucuparia* L.) и бересклетом бородавчатым (*Euonymus verrucosus* Scop.) [Глебов и др., 1998; Ильин и др., 2021; Мурзов и др., 1992, 1993, 1986; Петров и др., 2022; Пуряев и др., 2018; Яковлев и др., 1999]. С учетом этого факта, авторами данной работы для исследования подбирались, в первую очередь, объекты с насаждениями, созданными из смешанных дубово-липовых культур, а также заложенными из лесных культур дуба и естественного возобновления сопутствующих пород (при комбинированном способе лесовосстановления с шириной между рядами 6, 8, 10 м).

В современных условиях ведения лесного хозяйства Среднего Поволжья восстановление качественных и устойчивых дубрав возможно с использованием значительного научно-производственного опыта, полученного за долгие годы экспериментальных исследований филиалом Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства (ФБУ ВНИИЛМ) «Восточно-европейская (до 2009 г. – Татарская) лесная опытная станция». Приобретенный опыт отражен в научных отчетах, публикациях и методических рекомендациях, разработанных для условий Республики Татарстан [Кузнецов и др., 1994, 2004; Мурзов и др., 1992, 1993, 1986; Пуряев и др., 2018; Ильин и др., 2020–2021] и Чувашия [Глебов и др., 1998; Рекомендациями... 1991; Инвентаризация..., 1994; Мурзов и др., 1986; Петров, 2021; Ильин и др., 2021].

Цель работы – определение эффективных и разработка инновационных и усовершенствованных технологий при лесовосстановлении дубрав, рубках ухода, защите от вредителей, диких животных и пожаров для выращивания качественных и устойчивых насаждений дуба в лесах Среднего Поволжья. Решаемые задачи: анализ материалов и результатов, полученных в ходе научных исследований за 2018–2021 гг. по Государственному заданию Рослесхоза с определением наиболее эффективных технологий и способов ведения лесного хозяйства в дубравах.

*Материалы и методика исследования.* Таксация насаждений проводилась в соответствии с методическими рекомендациями ОСТ 56-69-83 «Пробные площади лесоустроительные. Метод закладки» [1984] и методиками по закладке и таксации постоянных и временных пробных площадей [Анучин, 1982]. Анализ материалов проектирования и технологий ведения лесного хозяйства в дубравах осуществлялся по научным отчетам станции, публикациям и нормативным документам [Глебов и др., 1998; Гниненко и др., 2020; Дерябин, 1960; Желдак и др., 1994, 2001; Калиниченко и др., 2000; Инвентаризация..., 1994; Кузнецов, 2004; Родин и др., 2002; Рывкин, 1952; Яковлев и др., 1999; Правила ухода за лесами, 2020; Правила лесовосстановления, 2020].

Объектами исследований являлись опытные и производственные объекты (всего 26 общей площадью 177,4 га) с насаждениями дуба искусственного и естественного происхождения в возрасте 21–37 лет, созданные в период 1983–1999 гг. [Пуряев и др., 2018, 2019; Ильин и др., 2020, 2021] и сформированные под руководством сотрудников станции на вырубках и на участках реконструкции погибших дубрав с использованием различных способов и технологий лесовосстановления и ухода за дубравами в республиках Чувашия (18 опытных объектов) и Татарстан (8 объектов, в том числе 4 – опытных и 4 – производственных) (рис. 1, 2).



*Рис. 1. Смешанные дубово-липовые культуры в возрасте 21 года. Схема смешения пород – по 2 ряда: Д-Д-Лп-Лп, схема посадки – 6,0x0,75 м. Республика Чувашия, Опытное лесничество*

*Fig. 1. Mixed oak and linden crops at the age of 21 years. The scheme of species mixing – 2 rows each: Oak-Oak-Linden-Linden, planting scheme – 6.0x0.75 m. Republic of Chuvashia, Experimental Forestry*



*Рис. 2. Лесные культуры дуба, созданные на участке реконструкции погибших дубрав полосным способом (ширина 12 м). Республика Татарстан, Мамадышское лесничество*

*Fig. 2. Oak forest cultures created on the site of dead oak trees reconstruction by strip method (12 m wide). Republic of Tatarstan, Mamadyshskoye forestry*

Исследованные насаждения создавались в благоприятных лесорастительных условиях (ТЛУ Д<sub>2</sub> и С<sub>2</sub>, почвы – серые лесные и чернозем) с использованием различных способов и технологий: на вырубках обработка почвы проводилась плугами ПКЛ-70, ПЛ-1 и ПЛД-1,2; на участках реконструкции осуществлялась расчистка площадей от пней, валежника и малоценных молодняков корчевателем или бульдозером; посадка сеянцев выполнялась вручную под меч Колесова и механизированным способом – лесопосадочными машинами МЛУ-1 и СБН-1. Кроме посадки сеянцами, культуры дуба создавались посевом желудей ручным и механизированным (с использованием сеялки СЖУ-1) способами [Петров, 2021; Пуряев и др., 2019].

Большой опыт создания смешанных дубово-липовых культур, а также использования комбинированного способа восстановления дубрав получен в Чувашской республике под руководством сотрудников станции. Смешанные культуры дуба и липы создавались на вырубках в разных вариантах: чередованием дуба и липы – по одному ряду (Д-Лп-Д-Лп), по два ряда (Д-Д-Лп-Лп), а также в варианте «3 ряда дуба – 2 ряда липы» (Д-Д-Д-Лп-Лп) с шириной между рядами от 3,3 до 6,0 м и расстоянием в ряду между посадочными местами от 0,5 до 0,85 м (исследовано 6 объектов). Смешанные культуры дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) с хвойными породами – елью европейской (*Picea abies* L.) и лиственницей сибирской (*Larix sibirica* Ldb.) – по схеме смешения «3 ряда дуба – 2 ряда ели или лиственницы» (Д-Д-Д-Е-Е) исследованы на 2 объектах. Показатели характерных объектов представлены в таблице 1.

Наиболее эффективной технологией восстановления дубрав на вырубках в лесах Чувашии является «промышленная» технология, разработанная сотрудниками станции в 1986 г. и широко внедренная в практику региона [Глебов и др., 1998, 1991]. Главной составляющей технологического процесса является подготовка лесокультурной площади путём срезания пней бензопилами на уровне земли и маркировка будущих рядов культур вешками. Данная технология позволяет за счёт прямолинейности рядов повышать в 2,4 раза текущий прирост дуба в высоту в течение 10–15 лет по сравнению с традиционной технологией (без срезания пней). Одновременно на 9% повышается приживаемость дуба. Затраты на создание и выращивание культур дуба до перевода в покрытую лесом площадь по этой технологии в 2,2 раза ниже по сравнению с традиционной.

Такой эффект обусловлен тем, что за счёт отсутствия пней и прямолинейности рядов культур почти в 2 раза повышается производительность всех механизированных агрегатов. Становится возможным проводить лесоводственный уход (осветления) с применением тракторных агрегатов (КОК-2 и

др.), что повышает производительность труда по сравнению с ручным бензо-кусторезом в 5–6 раз. Из 18 опытных объектов на территории Чувашии по «промышленной» технологии создано 8, все в Опытном лесничестве (табл. 1).

Таблица 1

**Способы восстановления дубрав и показатели сформированных насаждений на характерных объектах Чувашии**

**Methods of oak woodland restoration and indicators of established plantations at typical sites in Chuvashia**

| № оп.   | Квартал, выдел | Площадь, га | Способ создания л/к  | Схема смешения пород | Схема посадки культур | Характеристика сформированных насаждений (на 01.01.2021 г.) |                                 |         |               |                           |     |
|---|----------------|-------------|----------------------|----------------------|-----------------------|---|---------------------------------|---------|---------------|---------------------------|-----|
|   |                |             |                      |                      |                       | Возр., лет  | Состав                          | Бонитет | Полнота отн.  | Запас, м <sup>3</sup> /га |     |
| 1-я группа насаждений: смешанные культуры дуба и липы<br>(Опытное лесничество, Каракуринское участковое лесничество)  |                |             |                      |                      |                       |   |                                 |         |               |                           |     |
| 1   | 156, 7         | 6,0         | Мех. посадка с МЛУ-1 | 2Д-2Лп               | 6,0x0,75              | 21  | 3Д3Лп3Кл1Б                      | 2       | 0,7           | 59                        |     |
| 2   | 161, 12        | 3,5         |                      | Д-Лп                 | 5,0x0,85              | 21  | 4Д4Лп1Кл1Б                      | 2       | 0,7           | 59                        |     |
| 3   | 164, 27        | 3,0         |                      | Д-Лп                 | 4,8x0,80              | 21  | 4Д3Лп3Кл                        | 2       | 0,8           | 78                        |     |
| 4   | 153, 1         | 11,1        |                      | Д-Лп                 | 5,0x0,75              | 22  | 3Д4Лп2Кл1Б                      | 1       | 0,7           | 71                        |     |
| 5   | 151, 26        | 1,4         |                      | 3Д-2Лп               | 3,3x0,5               | 24  | 5Д5Лп                           | 1       | 1,0           | 108                       |     |
| 6   | 155, 19        | 3,9         |                      | Посев                | Д-Лп                  | 4,0x0,5   | 31                              | 5Д5Лп   | 1             | 1,3                       | 193 |
| 2-я группа насаждений: смешанные культуры дуба с елью или лиственницей  |                |             |                      |                      |                       |   |                                 |         |               |                           |     |
| 7   | 160, 1         | 19,8        | Мех. посадка с МЛУ-1 | 3Д-2Е                | 5,0x0,75              | 22  | 2Д5Е1Лп1Б 1Кл                   | 2       | 1,0           | 103                       |     |
| 8   | 151, 6         | 1,2         |                      | 3Д-2Л                | 3,3x0,75              | 24  | 7Л2Д1Кл                         | 2       | 0,9           | 140                       |     |
| 3-я группа насаждений: созданные с использованием комбинированного восстановления – культуры дуба и естественное возобновление (липа, клен, вяз, кустарники) (Икковское участковое лесничество) |                |             |                      |                      |                       |   |                                 |         |               |                           |     |
| 9   | 159, 32        | 4,0         | Мех. посадка с МЛУ-1 | Д-Д                  | 6,0x0,75              | 21  | 4Д3Лп2Кл1Б                      | 2       | 0,75          | 68                        |     |
| 10  | 152, 24        | 7,0         |                      | Д-Д                  | 10,0x0,75             | 22  | 4Д4Лп1Кл1Б                      | 1       | 0,75          | 80                        |     |
| (Каракуринское участковое лесничество)  |                |             |                      |                      |                       |   |                                 |         |               |                           |     |
| 11  | 165, 3         | 5,5         | Мех. посадка с МЛУ-1 | Д-Д                  | 6,0x0,72              | 24, 30  | 5Д4Лп1Кл, 6Д3Лп1Кл              | 1       | 0,8, 0,9      | 110, 158                  |     |
| 12  | 81, 2          | 2,3         |                      | Д-Д                  | 8,0x0,75              | 25, 29, 37  | 3Д4Лп2Б1Кл, 6Д1Лп2Б1Кл, 8Д1Лп1Б | 1       | 0,9, 0,8, 0,7 | 79, 112, 122              |     |

*Примечание: Д – дуб, Лп – липа, Е – ель, Л – лиственница.*

На территории Республики Татарстан были исследованы 8 объектов, в том числе 4 опытных объекта с проведенной реконструкцией погибших дубрав и 4 производственных объекта с культурами дуба, созданными на вырубках. В Татарстане имеется большой опыт проведения мероприятий по реконструкции деградировавших дубрав и малоценных насаждений [Инвентаризация..., 1994; Мурзов и др., 1986, 1992–1993]. Из-за сильнейших морозов 1978/1979 гг. наибольшая часть приспевающих и спелых насаждений в регионе существенно пострадала, а затем на протяжении 10 лет постепенно усыхала. После проведения рубок погибших древостоев на их месте осуществлялось естественное возобновление – кленом, липой, осиной, вязом и кустарниками (лещина, рябина и др.).

Первые экспериментальные объекты реконструкции деградировавших дубрав были заложены в 1988–1989 гг. в Лайшевском, Кзыл-Юлдузском и Кайбицком лесхозах. В условиях ТЛУ D<sub>2</sub> мероприятия осуществлялись путем расчистки (от пней и малоценных молодняков) коридоров шириной 4 м и полос шириной 6, 8, 12, 14, 20 и 30 м корчевателями МП-2Б и К-1А на базе трактора Т-130 и корчевателем средней мощности КМ-1 на базе трактора ЛХТ-55, а также бульдозером «Комацу» с чередованием оставляемых кулис соответствующей (или на 2–4 м меньшей) ширины. Посадка осуществлялась: в коридорах – в 1 ряд дуба, в полосах – в 2–8 рядов в зависимости от ширины по традиционным схемам посадки (3,0–4,0)х0,75 м чистыми культурами дуба и в смешении с елью или лиственницей (ЗД-2Е(2Л)) также с размещением дуба в центральной части полос, а ели – по краям полос по одному ряду по схеме смешения от Е-Д-Е до Е-Д-Д-Д-Е, а также по одному ряду дуба и ели в узких полосах (6 м). Агротехнические и лесоводственные уходы проводились своевременно и по технологиям, представленным выше.

В результате анализа рассмотренных способов и технологий лесовосстановления, лучшие лесоводственно-таксационные показатели наблюдаются в насаждениях, созданных из смешанных культур дуба и липы при схеме посадки (4,0–5,0)х0,75 м, а также при комбинированном способе восстановления с культурами дуба, созданными с широкими междурядьями – 6, 8 и 10 м и естественным возобновлением с преобладанием липы. К возрасту в 21 год средние показатели смешанных насаждений из лесных культур дуба, липы и естественного возобновления (2–3 единицы в составе) следующие: состав – 4Д3Лп2Кл1Б, класс бонитета – II, полнота относительная – 0,7, запас – 59–78 м<sup>3</sup>/га. С 22-летнего возраста насаждения относятся уже к I-у классу бонитета. В возрасте с 24 лет в составе преобладает дуб – 5Д3Лп1Кл1Б, при полноте 0,8–0,9 запас увеличивается до 110 м<sup>3</sup>/га.

К 30 годам соотношение дуба в составе увеличивается до 6-и единиц – 6Д2Лп1Кл1Б, I класс бонитета сохраняется, при полноте 0,7–0,8 запас составляет 112–193 м<sup>3</sup>/га (табл. 1).

В смешанных культурах дуба с елью или лиственницей к возрасту 22–24 года лесоводственные показатели древостоев дуба уступают показателям хвойных пород; в смешении с елью по высоте – на 1,0 м, диаметру – на 1,0 см, запасу – на 24 м<sup>3</sup>/га. В смешении с лиственницей разница показателей значительно выше: по высоте – на 7,2 м, диаметру – на 7,0 см, запасу – на 76 м<sup>3</sup>/га.

На территории Татарстана насаждения дуба, созданные на участках реконструкции и на вырубках, к возрасту 17–24 лет соответствуют II классу бонитета и имеют лесоводственно-таксационные показатели незначительно ниже по сравнению с аналогичными показателями смешанных насаждений дуба, липы и других пород, произрастающих на территории Чувашии.

*Результаты исследования.* По результатам проведённых исследований определены эффективные технологии и способы ведения лесного хозяйства в дубравах:

- 1) селекция и семеноводство;
- 2) лесовосстановление и меры содействия естественному возобновлению;
- 3) формирование рубками ухода смешанных насаждений с преобладанием дуба;
- 4) обновление насаждений дуба и переформирование мягколиственных и кленовых (низкокачественных) насаждений в дубово-липовые;
- 5) разработана усовершенствованная технология – «пасечно-полосный» и «пасечно-полосно-шахматный» способы проведения лесоводственных, лесокультурных и лесозащитных мероприятий с целью выращивания качественных и устойчивых дубрав, а также разработаны «Рекомендации по применению инновационных и усовершенствованных технологий ведения лесного хозяйства в дубравах Среднего Поволжья [Ильин и др., 2021, 2023].

*Селекция и семеноводство дуба.* Повышение устойчивости вновь создаваемых насаждений дуба может быть достигнуто за счёт селекции. К примеру, наибольшей устойчивостью к морозам и вредителям обладают деревья дуба поздней феноформы [Глебов и др., 1998]. Этую форму необходимо выявлять и размножать, как семенным, так и вегетативным путём. Для получения посадочного материала с улучшенными наследственными свойствами необходимо поддерживать и сохранять объекты существую-

щей лесосеменной базы: ЛСП, ЛСУ, генрезерваты, плюсовые деревья, – а по необходимости создавать новые.

Также селекция дуба должна быть направлена на отбор и размножение наиболее устойчивых деревьев, особенно старше 80 лет. Такие деревья, сохранившие свою жизнеспособность вопреки многим стихийным бедствиям (особенно морозам и засухам), представляют собой эталоны устойчивости. На многих участках деградировавших дубрав Татарстана и Чувашии сохранились здоровые и к тому же без морозобойных трещин деревья дуба спелого класса возраста. Их необходимо выделять в особую селекционно-семенную категорию для сбора желудей и получения посадочного материала с улучшенными наследственными признаками устойчивости.

*Лесовосстановление и меры содействия естественному возобновлению дуба и липы.* Несмотря на отрицательные факторы, периодически встречающиеся при выращивании дуба, возможно существенно повысить качество и устойчивость древостоев дуба, в первую очередь, созданием и формированием смешанных насаждений, а также с использованием естественных механизмов защиты леса – птиц, полезных насекомых и др.

Опыт показывает, что формировать естественные смешанные древостои с участием дуба можно и при количестве 1,0 тыс. шт./га подроста, но до рубки спелых насаждений очень важно проводить мероприятия по содействию естественному возобновлению дуба. На вырубках, где сохранившегося подроста недостаточно, проводят подсадку сеянцев или саженцев дуба в количестве не более 25% от принятой нормы посадочных мест для лесных культур. Если требуется больше, то создают частичные лесные культуры. Там, где невозможно восстановить дубравы естественным путем, создают культуры дуба. Одним из главных принципов при этом должно быть обеспечение смешанного состава будущего насаждения с преобладанием дуба и, в основном, липы мелколистной в качестве сопутствующей породы.

Обработка почвы осуществляется бороздами с использованием плугов ПКЛ-70 и ПЛ-1 глубиной не более 15 см и шириной между рядами от 4,0 до 10,0 м. В условиях тяжелых глинистых почв лесостепной зоны дополнительно требуется механизированная культивация дна борозды. На участках с благонадежным естественным возобновлением липы в количестве более 2 тыс. шт./га ширина между бороздами должна быть от 8,0 до 10,0 м (для комбинированного способа лесовосстановления). Нельзя допускать ширину между рядами культур дуба в 2–3 м, поскольку это не позволит использовать деревья естественного возобновления для формирования смешанных насаждений.

В условиях ТЛУ D<sub>2</sub> и C<sub>2</sub> оптимальной схемой создания смешанных лесных культур дуба и липы является (4,0–5,0)х0,75 м с чередованием по 1–2 ряду дуба и 1 ряду липы. На участках с низким присутствием кабанов и мышей культуры дуба возможно создавать посевом желудей. Лесные культуры дуба, созданные в смешении с лиственницей или елью, в дальнейшем перспектив не имеют, поскольку динамика роста дуба несопоставима с динамикой роста хвойных пород (сосна не рекомендуется, ввиду риска повреждения лосями). Дуб, находясь под пологом лиственницы и ели, погибает от недостатка освещённости. Культуры дуба с хвойными породами следует вводить на отдельных чередующихся полосах.

*Формирование рубками ухода смешанных дубрав.* Осветления и прочистки являются основой формирования смешанных насаждений. Рубки в молодняках дуба рекомендуется начинать не позднее 5-летнего возраста, так как в противном случае происходит задержка роста дубрав. При этом обязательным условием является формирование состава насаждений дуба с долей сопутствующих пород, в первую очередь липы, не менее 50%,.

Наиболее экономичным и эффективным способом осветления и прочистки является коридорный, при котором второстепенные породы удаляют с каждой стороны от рядов дуба, образуя коридоры шириной 1,5–2 м. Сроки повторяемости лесоводственных уходов в дубово-широколиственных типах насаждений составляют 3–5 лет с интенсивностью 20–62% по запасу, а в дубово-мягколиственных – 2–3 года с интенсивностью 25–80%. Наряду с полной вырубкой нежелательных деревьев – под корень, рекомендуется неполная рубка – обезвершинивание (на высоте 1–1,5 м) деревьев и кустарников, расположенных вблизи дубков, с целью снижения их воздействия на целевые молодняки и в то же время сохранения высокой густоты насаждения для затруднения прохода лосей и косуль к деревцам дуба. Высота сопутствующих пород после проведения рубок ухода должна быть 0,6–0,7 высоты дуба, что не будет подавлять его рост в течение 3–5 лет.

*Мероприятия по обновлению и переформированию насаждений.* В защитных лесах, где запрещены сплошные, а в некоторых категориях и постепенные рубки, воспроизведение дубрав возможно осуществлять лесоводственными мероприятиями – рубками обновления спелых и перестойных насаждений (2–3 приема) в комплексе с лесовосстановлением, а также рубками переформирования средневозрастных и приспевающих мягколиственных и кленовых (низкокачественных) насаждений с наличием под пологом молодого поколения дуба (культуры и подрост). Методика проведения дан-

ных мероприятий представлена в рекомендациях [Ильин и др., 2023], разработанных с учетом Правил ухода за лесами [2020].

*Усовершенствованная технология: «пасечно-полосный» (ППС) и «пасечно-полосно-шахматный» (ППШС) способы проведения лесоводственных, лесокультурных и лесозащитных мероприятий.* Полученные в ходе исследований результаты с определением наиболее эффективных технологий и способов создания и формирования качественных и устойчивых дубрав в условиях ТЛУ  $D_{1-2}$  и  $C_2$  позволили разработать усовершенствованную лесохозяйственную территориально-схематическую организационно-технологическую структуру (рис. 3, 4), способствующую эффективному и качественному проведению комплекса работ по рубкам спелых насаждений, лесовосстановлению, рубкам ухода, в том числе реконструкции, обновлению, переформированию и лесозащите.

*Техническая характеристика ППС и ППШС.* Базовыми элементами данной структуры являются пасеки-полосы и постоянно действующие технологические коридоры шириной 4–5 м (рис. 3, 4). Параметры полос: ширина 20–25 м, длина 65–120 м, площадь 0,2–0,4 га согласно Правилам ухода за лесами. Заложить данную лесохозяйственную структуру возможно на участках компактной формы площадью не менее 2 га с шириной более 75 м и длиной не менее 200 м на сплошных вырубках, прогалинах и перед проведением чересполосных рубок спелых насаждений, мероприятий обновления, переформирования и реконструкции малоценных насаждений.



Рис. 3. Территориально-схематическая организационно-технологическая структура «пасечно-полосно-шахматного» способа лесовосстановительных и последующих мероприятий

Fig. 3. Territorial-schematic organisational-technological structure of the «apiary-strip-schematic» method of reforestation and subsequent measures

|          |        | До 1000 м  |
|----------|--------|--|
| До 200 м | 20-25м | ----   |
|          | 5м     | <b>Технологический и противопожарный коридор (волок)</b> |
|          | 20-25м | ----   |
|          | 5м     | <b>Технологический и противопожарный коридор (волок)</b> |
|          | 20-25м | ----   |
|          | 5м     | <b>Технологический и противопожарный коридор (волок)</b> |
|          | 20-25м | ----   |
|          | 5м     | <b>Технологический и противопожарный коридор (волок)</b> |
|          | 20-25м | ----   |
|          | 5м     | <b>Технологический и противопожарный коридор (волок)</b> |

Рис. 4. «Полосное» смешение дубово-липовых и хвойно-липовых культур

Fig. 4. «Strip» mixing of oak-linden and conifer-linden crops

При ширине участка (выдела) более 200 м выделяются 2–3 блока с шириной по 115–135 м каждый, в блоке по 4 полосы шириной 20–30 м. Направление полос устанавливается перпендикулярно направлению преобладающих ветров. Размещаются (вырубаются) полосы в чересполосном (чаще в эксплуатационных лесах) и шахматном (чаще в защитных лесах) порядке. Интенсивность рубок составляет 16–25% с периодом повторения 0,4–0,6 класса возраста в насаждениях с подростом или подпологовыми культурами дуба и 0,6–1,0 класса возраста в насаждениях без подроста (через 6–10 лет в мягко-лиственных насаждениях). Общая площадь полос в каждую рубку 20–25% от площади участка [Правила ухода за лесами, 2020].

Данные способы позволяют проводить рубки ухода неравномерным полосным методом при реконструкции насаждений, обновлении спелых и перестойных насаждений, а также чересполосных постепенных рубках и последующих после лесовосстановления рубках ухода равномерным методом. В сложных условиях выращивания дубрав – большое количество лосей, нехватка посадочного материала, переувлажненные почвы и др. – рекомендуется создавать смешанные дубово-липовые и елово(лиственнично)-липовые культуры, размещенные в смежных полосах (рис. 3, 4).

## Преимущества усовершенствованной технологии.

1. Территориально-схематическая организационно-технологическая структура ППС и ППШС позволяет оперативно осуществлять отводы и подготовку лесосечного фонда на участках с постоянно действующей технологической сетью из пасек-полос и коридоров, выполняющих функции

волоков, противопожарных коридоров, и в целом эффективную организацию и качественное выполнение комплекса лесоводственных, лесокультурных, лесозащитных и лесоустроительных работ.

2. ППС и ППШ способы позволяют создавать и формировать рубками ухода смешанные, разновозрастные и устойчивые к неблагоприятным природно-климатическим факторам насаждения дуба, также способные выполнять экологические и другие полезные функции. Кроме того, они будут способствовать качественному выполнению всех работ и их контролю.

3. Эффективность «пасечно-полосного» и «пасечно-полосно-шахматного» способов заключается в повышении производительности труда и в целом интенсивности работ на 15–20% в расчете на 1 га площади, а также в снижении трудовых, материально-технических и финансовых ресурсов при лесовосстановлении, рубках ухода и лесозащите.

Усовершенствованная технология апробирована в 2021 г. на территории Кайбицкого лесничества Республики Татарстан посадкой памятных опытно-производственных смешанных дубово-липовых и хвойно-липовых культур на 4 объектах общей площадью 8,3 га, приуроченных к трем памятным датам: проведение в Российской Федерации Года науки и технологий, 95-летие филиала ФБУ ВНИИЛМ «Восточно-европейская лесная опытная станция» и 100-летие организации Управления лесами Республики Татарстан.

#### *Комплекс лесохозяйственных и биологических методов защиты дубрав.*

В «пасечно-полосной» структуре заложено и лесозащитное профилактическое направление борьбы с вредителями леса и дикими копытными животными, представленное комплексом лесохозяйственных и биологических методов защиты дубрав в виде лесозащитной кулисы шириной 3–4 м, создаваемой из кустарников и трав одновременно с лесными культурами в пасеках-полосах (рис. 5), а также использования биотехнического препарата «PROTECT» против негативного воздействия лосей и косуль на молодняки дуба и сосны.

Вводимые в кулисы кустарники и травы должны обладать кормовыми элементами (нектар, ягоды и плоды) для привлечения естественных врагов вредителей леса – птиц, энтомофагов и др. Из кустарников следует вводить рябину, калину, боярышник, черемуху, бересклет, акацию, ракитник, спирею, аморфу и др., а из трав – клевер ползучий, молочай прутовидный, синяк обыкновенный, очиток едкий и др. [Рывкин, 1952]. Дополнительно в защитной зоне (или примыкающей площади) для привлечения птиц требуется устраивать водопои, вывешивать скворечники и дуплянки, особенно для синиц, которые в огромном количестве уничтожают гусениц и яйце-кладки вредителей.

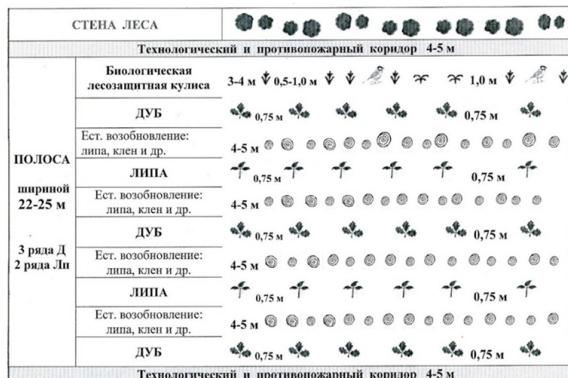


Рис. 5. Схема посадки смешанных дубово-липовых культур с вводом лесозащитной кулисы из кустарников и трав

Fig. 5. Planting scheme of mixed oak-linden crops with the introduction of a forest-protective shrub and grass clump

Биологически активная зона (кулиса) закладывается на краю пасеки и должна примыкать к действующим коридорам (волокам) с целью увеличения светового режима для вводимой растительности. Рекомендуется создавать по одной лесозащитной кулисе в пасеке (рис. 5) и сохранять данную структуру на протяжении всего периода выращивания культур.

Создание биологических условий защиты особенно необходимо для насаждений дуба, которые повреждаются большим количеством листогрызущих вредителей. Кроме птиц и энтомофафов, огромную пользу лесу оказывают муравьи, которые очень активно потребляют гусениц зеленой дубовой листовертки, зимней пяденицы, сосновой совки, сосновой пяденицы и многих других. Отрицательной стороной химического метода борьбы является то, что применение сильнодействующих инсектицидов действует не только против вредителей леса, но и против его защитников – птиц, энтомофафов и биоценоза в целом.

С целью защиты создаваемых молодняков дуба и сосны от диких копытных животных (лоси и косули) необходимо использовать эффективное и апробированное биотехническое средство ВД-АК-101 розовое «PRO-TECT». Оно обладает специфическим отпугивающим запахом и вкусом, неприятным для копытных животных. Препарат представляет собой стирол-акриловую водную эмульсию, в которую также входят кварцевые наполнители, вяжущие и модифицирующие добавки. Обрабатывают вер-

хущечные и боковые побеги, а также кору молодых деревьев путём ручного обмазывания или нанесения ручным опрыскивателем согласно методике [Гниненко и др., 2020]. Применение препарата на лесных участках Брянской области, республик Беларусь и Татарстан обеспечивало уровень защиты лесных участков на 87–97%.

**Заключение.** По результатам проведённых исследований определены эффективные технологии и способы ведения лесного хозяйства в дубравах:

- 1) селекция и семеноводство;
- 2) лесовосстановление и меры содействия естественному возобновлению;
- 3) формирование рубками ухода смешанных насаждений с преобладанием дуба;
- 4) обновление насаждений дуба и переформирование мягколиственных и кленовых (низкокачественных) насаждений в дубово-липовые;
- 5) разработана усовершенствованная технология – «пасечно-полосный» и «пасечно-полосно-шахматный» способы проведения лесоводственных, лесокультурных и лесозащитных мероприятий, а также подготовлены «Рекомендации по применению инновационных и усовершенствованных технологий ведения лесного хозяйства в дубравах Среднего Поволжья».

Повышение устойчивости создаваемых насаждений дуба может быть достигнуто за счёт селекции. Наибольшей устойчивостью к морозам и вредителям обладают деревья дуба поздней феноформы. Для получения посадочного материала с улучшенными наследственными свойствами, необходимо поддерживать объекты лесосеменной базы: ЛСП, ЛСУ, генрезерваты, плюсовые деревья, – а по необходимости создавать новые.

Лесовосстановление дубрав должно осуществляться созданием и формированием смешанных насаждений, в основном, дубово-липовых, с использованием естественных механизмов защиты леса – птиц, полезных насекомых и др. В условиях ТЛУ D<sub>2</sub> и C<sub>2</sub> оптимальной схемой создания смешанных лесных культур дуба и липы является (4,0–5,0)х0,75 м с чередованием по 1–2 ряда дуба и 1 ряду липы. На участках с низким присутствием кабанов и мышей культуры дуба возможно создавать посевом желудей.

Наиболее эффективной технологией восстановления дубрав на вырубках является «промышленная» технология. Главная составляющая технологического процесса – это подготовка лесокультурной площади путём срезания пней бензопилами на уровне земли и маркировка будущих рядов культур вешками. Данная технология позволяет за счёт прямолинейности рядов повысить в 2,4 раза текущий прирост дуба в высоту в течение 10–15

лет по сравнению с традиционной технологией (без срезания пней). Одновременно на 9% повышается приживаемость дуба. Затраты на создание и выращивание культур дуба до перевода в покрытую лесом площадь по этой технологии в 2,2 раза ниже по сравнению с традиционной.

Эффективным методом воспроизводства погибших дубрав оказалась реконструкция насаждений путем расчистки (от пней и малоценных молодняков) коридоров шириной 4 м и полос шириной 6, 8, 12, 14, 20 и 30 м корчевателями МП-2Б и К-1А на базе трактора Т-130 и корчевателем средней мощности КМ-1 на базе трактора ЛХТ-55, а также бульдозером «Комацу».

Основой формирования смешанных дубово-лиственных насаждений являются рубки ухода – осветления и прочистки, которые рекомендуется начинать не позднее 5-летнего возраста. При этом обязательным условием является формирование состава дубрав с долей сопутствующих пород, в первую очередь липы, не менее 50%.

Полученные результаты исследований позволили разработать усовершенствованную лесохозяйственную территориально-схематическую организационно-технологическую структуру – «пасечно-полосный» и «пасечно-полосно-шахматный» способы эффективного осуществления лесоводственных, лесокультурных и лесозащитных мероприятий, а также подготовить «Рекомендации для внедрения и использования инновационных и усовершенствованных технологий ведения лесного хозяйства в дубравах Среднего Поволжья».

*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.

*Глебов В.П., Верхунов П.М., Урмаков Г.Н.* Дубравы Чувашии. Чебоксары, 1998. 199 с.

*Гниненко Ю.И., Куликов А.А.* Методические рекомендации по практическому использованию водно-дисперсионного средства ВД-АК-101 розовое «ПРОТЕСТ» для защиты посадок хвойных и лиственных пород от повреждений, наносимых дикими копытными животными. ВНИИЛМ, 2020. 9 с.

*Дерябин Д.И.* Способы реконструкции молодых лесонасаждений. М.: Л.: Гослесбумиздат, 1960. 67 с.

*Желдак В.И.* Программа НИР по теме 3.1/1 «Разработка экологически безопасных и экономически эффективных региональных систем ведения лесного хозяйства и технологий, обеспечивающих повышение продуктивности и устойчивости лесов». ВНИИЛМ, 2001. 79 с.

*Желдак В.И., Чубисов Г.А., Мартынов А.И.* Наставление по рубкам ухода в равнинных лесах европейской части России. ВНИИЛМ, 1994. 190 с.

*Ильин Ф.С., Петров В.А., Ятманова Н.М.* Отчеты о научно-исследовательской работе «Разработка инновационных подходов по совершенствованию технологий ведения лесного хозяйства в дубравах Среднего Поволжья». Филиал ФБУ ВНИИЛМ «Восточно-европейская ЛОС», 2020, 2021. 107 и 130 с.

Инвентаризация опытных и опытно-производственных объектов по лесному хозяйству РТ. ТатЛОС, 1994. 109 с.

*Калиниченко Н.П., Желдак В.И., Румянцева С.А., Сенечкина О.А.* Руководство по ведению хозяйства и восстановлению дубрав в равнинных лесах европейской части Российской Федерации. ВНИИЛМ, 2000. 137 с.

*Кузнецов Н.А.* Рекомендации (Руководство) по ведению хозяйства в дубравах Республики Татарстан. ТатЛОС, 2004. 30 с.

*Мурзов А.И., Глебов В.П., Кузнецов Н.А.* Дубравы Среднего Поволжья и основные пути их улучшения / Научно-исслед. работы за 1981–1985 гг., 1986. С. 9–14.

*Мурзов А.И., Глебов В.П., Кузнецов Н.А.* Реконструкция малоценных молодняков, возобновившихся на вырубках после гибели дубрав. ТатЛОС. 1992, 1993. 32 с.

ОСТ 56-69-83. Площади пробные лесоустроительные. Методы закладки, 1984. 60 с.

*Петров В.А.* Дубово-липовые культуры на вырубках в условиях кленово-липово-снытьевых свежих дубрав в Чувашской Республике / Лесохоз. информ.: электрон. сетевой. журн., 2021. № 1. С. 73–82. URL: <http://Ihi.vniilm.ru/>

*Петров В.А., Ильин Ф.С., Кузнецова Н.Ф.* Восстановление дубрав на основе естественного возобновления дуба в Среднем Поволжье / Лесохоз. информ.: электрон. сетевой. журн. 2022. № 1. С. 35–49. URL: <http://Ihi.vniilm.ru/>

*Побединский А.В., Аглиуллин Ф.В., Мурзов А.И.* Рекомендации по ведению лесного хозяйства Татарской АССР на зонально-типологической основе. ВНИИЛМ, 1986. 46 с.

Правила лесовосстановления – Приказ МПР РФ №1014 от 04.12. 2020.

Правила ухода за лесами – Приказ МПР РФ от 30.07.2020 № 534 об утверждении.

*Пуряев А.С., Ильин Ф.С., Петров В.А.* Отчеты о научно-исследовательской работе «Разработка инновационных подходов по совершенствованию технологий ведения лесного хозяйства в дубравах Среднего Поволжья». Филиал ФБУ ВНИИЛМ «Восточно-европейская ЛОС», 2018, 2019. 105 и 44 с.

Рекомендации по применению инновационных и усовершенствованных технологий ведения лесного хозяйства в дубравах Среднего Поволжья [Электронный ресурс] / Ф.С. Ильин, В.А. Петров, Н.М. Ятманова. ВНИИЛМ, 2023. 80 с. 1 CD-ROM. Загл. с титул. экрана.

Рекомендации по созданию лесных культур в условиях Чувашской ССР на основе промышленных технологий. Чебоксары, 1991. 12 с.

Родин А.Р., Калашников Е.А., Родин С.А., Силаев Г.В., Рысин С.Л., Вильданов М.Ф. Лесные культуры. ВНИИЛМ, 2002. 435 с.

Рыжкин Б.В. Биологический метод борьбы с вредными насекомыми в лесу. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1952. 78 с.

Яковлев А.С., Яковлев И.А. Дубравы Среднего Поволжья. Йошкар-Ола: МарГТУ, 1999. 352 с.

### References

Anuchin N.P. Forest taxation: a textbook for universities. M.: Lesn. prom-st', 1982. 552 p. (In Russ.)

Deryabin D.I. Methods for reconstruction of young forest plantations. M.; L.: Goslesbumizdat, 1960. 67 p. (In Russ.)

Forest care rules – Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation dated July 30, 2020 No. 534 on approval. (In Russ.)

Glebov V.P., Verkhunov P.M., Urmakov G.N. Oak forests of Chuvashia. Cheboksary, 1998. 199 p. (In Russ.)

Gninenko Yu.I., Kulikov A.A. Methodological recommendations for the practical use of water-dispersion product VD-AK-101 pink «PROTECT» for protecting coniferous and deciduous trees from damage caused by wild ungulates. VNIILM, 2020. 9 p. (In Russ.)

Ilyin F.S., Petrov V.A., Yatmanova N.M. Reports on the research work «Development of innovative approaches to improve forestry technologies in oak forests of the Middle Volga region». Branch of FBU VNIILM «East European LOS», 2020, 2021. 107 and 130 pp. (In Russ.)

Inventory of experimental and experimental production facilities in forestry of the Republic of Tatarstan. TatLOS, 1994. 109 p. (In Russ.)

Kalinichenko N.P., Zheldak V.I., Rumyantseva S.A., Senechkina O.A. Guidelines for management and restoration of oak forests in lowland forests of the European part of the Russian Federation. VNIILM, 2000. 137 p. (In Russ.)

Kuznetsov N.A. Recommendations (Guidelines) for farming in oak forests of the Republic of Tatarstan. TatLOS, 2004. 30 p. (In Russ.)

Murzov A.I., Glebov V.P., Kuznetsov N.A. Oak groves of the Middle Volga region and the main ways to improve them / Scientific research. works for 1981–1985, 1986, pp. 9–14.

Murzov A.I., Glebov V.P., Kuznetsov N.A. Reconstruction of low-value young forests that have resumed in clearings after the death of oak forests. TatLOS, 1992, 1993. 32 p. (In Russ.)

OST 56-69-83. Test areas for forest management. Bookmark methods, 1984. 60 p. (In Russ.)

*Petrov V.A.* Oak-linden crops on clearings in the conditions of maple-linden-snowy fresh oak forests in the Chuvash Republic. *Forestry*, 2021, no. 1, pp. 73–82. URL: <http://Ihi.vniilm.ru/> (In Russ.)

*Petrov V.A., Ilyin F.S., Kuznetsova N.F.* Restoration of oak forests based on natural oak regeneration in the Middle Volga region. *Forestry*, 2022, no. 1, pp. 35–49. URL: <http://Ihi.vniilm.ru/> (In Russ.)

*Pobedinsky A.V., Agliullin F.V., Murzov A.I.* Recommendations for forestry management of the Tatar Autonomous Soviet Socialist Republic on a zonal-typological basis. VNIILM, 1986. 46 p. (In Russ.)

*Puryaev A.S., Ilyin F.S., Petrov V.A.* Reports on the research work «Development of innovative approaches to improve forestry technologies in oak forests of the Middle Volga region». Branch of FBU VNIILM «East European LOS», 2018, 2019. 105 and 44 p. (In Russ.)

Recommendations for the creation of forest crops in the conditions of the Chuvash SSR based on industrial technologies. Cheboksary, 1991. 12 p. (In Russ.)

Recommendations for the use of innovative and improved forestry technologies in oak forests of the Middle Volga region [Electronic resource] / F.S. Ilyin, V.A. Petrov, N.M. Yatmanova. VNIILM, 2023. 80 p. 1 CD-ROM. Cap. with title. screen. (In Russ.)

*Rodin A.R., Kalashnikov E.A., Rodin S.A., Silaev G.V., Rysin S.L., Vildanov M.F.* Forest crops. VNIILM, 2002. 435 p. (In Russ.)

Rules for reforestation – Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation No. 1014 dated 04.12. 2020. (In Russ.)

*Ryvkin B.V.* Biological method of controlling harmful insects in the forest. M.; L.: Goslesbumizdat, 1952. 78 p. (In Russ.)

*Yakovlev A.S., Yakovlev I.A.* Oak groves of the Middle Volga region. Ioshkar-Ola: MarSTU, 1999. 352 p. (In Russ.)

*Zheldak V.I.* Research program on topic 3.1/1 «Development of environmentally friendly and cost-effective regional forestry systems and technologies that ensure increased productivity and sustainability of forests». VNIILM, 2001. 79 p. (In Russ.)

*Zheldak V.I., Chibisov G.A., Martynov A.I.* Manual on thinning in lowland forests of the European part of Russia. VNIILM, 1994. 190 p. (In Russ.)

*Материал поступил в редакцию 08.12.2023*

---

**Ильин Ф.С., Сидоренков В.М., Мусин Х.Г., Гайфуллин А.Х., Чернов В.И.**  
Повышение качества и устойчивости дубрав с использованием инновационных и усовершенствованных технологий в лесах среднего Поволжья // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 249. С. 55–75.  
DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.55-75

Состояние дубовых лесов Среднего Поволжья ухудшается на протяжении многих десятилетий. Биологическая устойчивость, продуктивность и качество дубовых насаждений снижаются из-за значительного воздействия комплекса неблагоприятных природно-климатических факторов (морозы, засуха, вредители, дикие животные и т. д.), а также последствий недостаточно эффективной хозяйственной деятельности. В данной статье представлены материалы и результаты исследований по Государственному заданию Рослесхоза, выполнявшимся в 2018–2021 годах филиалом Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства (ФБУ ВНИИЛМ) «Восточно-Европейская лесная опытная станция». Цель исследования – выявление эффективных и разработка инновационных и усовершенствованных технологий в процессе лесовосстановления дубовых насаждений, прореживания, защиты от вредителей, диких животных и пожаров для выращивания качественных и устойчивых дубовых насаждений в Среднем Поволжье. В работе представлены опытно-производственные объекты (всего 26 общей площадью 177,4 га) с плантациями дуба искусственного и естественного происхождения в возрасте 21–37 лет, созданные в период 1983–1999 гг. и сформированные под руководством сотрудников станции на вырубках и на участках реконструкции погибших дубрав с применением различных методов и технологий лесовосстановления и ухода за дубравами на территории республик Чувашия и Татарстан. Результатом исследований являются инновационные и усовершенствованные технологии и методы ведения лесного хозяйства в дубравах, а также рекомендации для их использования в лесах Среднего Поволжья.

**Ключевые слова:** дубовые леса, плантации, лесные культуры, технологии, рубки, лесовосстановление, формирование, устойчивость.

**Ильин Ф.С., Сидоренков В.М., Мусин Н.Г., Гаифуллин А.Н., Чернов В.И.**  
Improving the quality and sustainability of oak forests using innovative and improved technologies in the forests of the Middle Volga region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 249, pp. 55–75 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.55-75

The condition of oak forests of the Middle Volga region has been deteriorating for many decades. The biological stability, productivity and quality of oak plantations are decreasing due to the significant impact of a complex of unfavorable natural and climatic factors (frost, drought, pests, wild animals, etc.), as well as the consequences of insufficiently effective economic activity. This paper presents the materials and results of the research under the State Assignment of Rosleskhoz, carried out in 2018–2021 by the branch of the All-Russian Research Institute of Forestry and Mechanization of Forestry (FBU VNIILM) «East European Forest Experimental Station». The aim of the study was to identify effective and develop innovative and improved technologies in the process of reforestation oak stands, thinning, protection from pests, wild animals and fires for

growing high-quality and sustainable oak stands in the Middle Volga region. The paper presents experimental and production objects (26 in total with a total area of 177.4 hectares) with plantations of oak trees of artificial and natural origin at the age of 21–37 years, created in the period 1983–1999 and formed under the guidance of the station staff on clearcuts and on the sites of reconstruction of dead oak trees using different methods and technologies of reforestation and care of oak trees on the territory of the Republics of Chuvashia and Tatarstan. The results of the research are innovative and improved technologies and methods of forest management in oak forests, as well as recommendations for use in the forests of the Middle Volga region.

**Keywords:** oak forests, plantations, forest crops, technologies, thinning, reforestation, formation, sustainability.

---

**ИЛЬИН Федор Степанович** – руководитель группы лесоводства филиала Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства «Восточно-европейская лесная опытная станция», кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 9048-1000.

420097, ул. Товарищеская, д. 40, г. Казань, Россия. E-mail: ilin2566@mail.ru

**ILIN Fyodor S.** – PhD (Agriculture), Head of the forestry group of the branch of «All-Russian Research Institute of Forestry and Mechanization of Forestry» «East European Forest Experimental Station». SPIN-code: 9048-1000.

420097. Tovarishcheskaya str. 40. Kazan. Russia. E-mail: ilin2566@mail.ru

**СИДОРЕНКОВ Виктор Михайлович** – заместитель директора по научной и инновационной деятельности Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 6071-2570. ORCID: 0000-0003-4189-1906.

141202, ул. Институтская, д. 15, г. Пушкино, Московская обл., Россия.  
E-mail: lesvn@yandex.ru

**SIDORENKOV Victor M.** – PhD (Agriculture), Deputy Director for Research and Innovation Activity of All-Russian Research Institute of Forestry and Mechanization of Forestry. SPIN-code: 6071-2570. ORCID: 0000-0003-4189-1906.

141202. Institutskaya str. 15. Pushkino. Moscow region. Russia. E-mail: lesvn@yandex.ru

**МУСИН Харис Гайнутдинович** – член-корреспондент Академии наук Республики Татарстан, заслуженный лесовод РТ и РФ, профессор кафедры лесоводства и лесных культур Казанского государственного аграрного университета, доктор сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 2744-6995. ORCID: 0000-002-3169-4362.

420015, ул. К. Маркса, д. 65, г. Казань, Россия. E-mail: aigulsafina@yandex.ru

**MUSIN Kharis G.** – DSc (Agriculture), Professor of the Department of Forestry and Forest Crops of Kazan State Agrarian University, Corresponding Member of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Honored Arborist of the Republic of Tatarstan and the Russian Federation. SPIN-code: 2744-6995. ORCID: 0000-002-3169-4362.

420015. K. Marks str. 65. Kazan. Russia. E-mail: aigulsa@yandex.ru

**ГАЙФУЛЛИН Айдар Хайдарович** – аспирант, директор ГБУ «Лесопожарный центр» при Министерстве лесного хозяйства Республики Татарстан.

420124, пр. Х. Ямашева, д. 37А, г. Казань, Россия. E-mail: K096xt@mail.ru

**GAYFULLIN Aidar Kh.** – PhD student, director of the State Budgetary Institution «Forest Fire Center» under the Ministry of Forestry of the Republic of Tatarstan.

420124. Kh. Yamashev av. 37A. Kazan. Russia. E-mail: K096xt@mail.ru

**ЧЕРНОВ Василий Иванович** – ведущий советник отдела государственного лесного реестра, использования лесов и лесоустройства Министерства лесного хозяйства Республики Татарстан, кандидат сельскохозяйственных наук.

420124, пр. Х. Ямашева, д. 37А, г. Казань, Россия. E-mail: vasiliy.chernov@tatar.ru

**CHERNOV Vasily I.** – PhD (Agriculture), Leading Advisor of the Department of the State Forest Register, Forest Use and Forest Management of the Ministry of Forestry of the Republic of Tatarstan.

420124. Kh. Yamashev av. 37A. Kazan. Russia. E-mail: vasiliy.chernov@tatar.ru

**М.В. Байков**

**СРОКИ ВЫХОДА ШМЕЛЕЙ РОДА *BOMBUS* (HYMENOPTERA: APIDAE)  
ИЗ СОСТОЯНИЯ ЗИМНЕЙ ДИАПАУЗЫ  
НА ТЕРРИТОРИИ ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ**

*Введение.* Важное значение для шмелей рода *Bombus* (Hymenoptera: Apidae), как насекомых-антофилов с растянутым периодом жизни семьи, имеет механизм адаптации к условиям среды обитания. Одним из таких приспособлений является полилектичность шмелей – согласованность фаз онтогенеза с особенностями трофического конвейера перганосных и нектароносных растений ареала обитания [Мадебейкин, 1996; Радченко, Песенко, 1994]. Формирование такого фенологического календаря позволяет шмелям различных видов и обитателям разнообразных экотопов приспособиться к трофическому использованию произрастающих там растений [Попов, 2008].

К настоящему времени в России и странах бывшего СССР значительный объем фенологической информации собран в заповедниках на методической основе научной программы «Летопись природы», целью которой является систематический сбор данных по динамике природных явлений и процессов [Филюнов, 1990]. Единые методы фенологических наблюдений вошли в практику в конце 1950-х гг. и с тех пор практически не изменились [Преображенский, Галахов, 1948; Жарков, 1956; Галахов, 1959]. На территории Ленинградской области систематический сбор фенологической информации осуществлялся в рамках сети Русского географического общества (РГО) в период с 1920-х по 1990-е годы.

В целом фенологические наблюдения за онтогенезом шмелей включают регистрацию сроков вылета перезимовавших самок, время закладки гнезд, появление рабочих шмелей, самцов и молодых самок, переход плодных самок в состояние зимней диапаузы [Туданов, Рошиненко, 2007]. Но в программе фенологических наблюдений сети РГО фазы развития шмелиной семьи представлены в виде только одного феноиндикатора – срока вылета после зимней диапаузы самок шмелей [Рекомендации..., 2020]. Кроме того, феноиндикатор не фиксирует видовую принадлежность шмелей.

Целью данной работы является оценка сроков выхода шмелей, обитающих на территории Ленинградской области, из состояния зимней диапаузы и влияния географических параметров ареала обитания на данные сроки.

Задачи: 1) определить календарные границы сроков вылета перезимовавших самок; 2) определить средние даты вылета, а также даты самого раннего, самого позднего вылета шмелей; 3) определить границы интервала между датой самого раннего и датой самого позднего вылета; 4) оценить методами корреляционного анализа степень взаимосвязи этих сроков и географических характеристик ареала обитания шмелей на территории Ленинградской области.

*Материалы и методика исследования.* Данная работа основывается на обработке базы данных фенологических наблюдений, проводившихся на территории Ленинградской области с 1925 по 1993 год. База данных содержит информацию о календарных сроках (самый ранний, средний и поздний) выхода шмелей после зимней диапазузы в разных точках наблюдений, расположенных на территории Ленинградской области. Также представлены данные собственных наблюдений автора.

База данных любезно предоставлена заведующим фенологического центра при БИН РАН им. В.Л. Комарова Лебедевым П.А. [База..., 2022].

Оценка взаимосвязи изучаемых величин проводилась в программе WPS Spreadsheets (11.1.0.10702) пакета WPS Office методом параметрического корреляционного анализа Пирсона и методом ранговой корреляции Спирмена.

*Результаты и обсуждение.* База фенологических данных БИН РАН содержит информацию по срокам вылета шмелей в 12 пунктах наблюдений, расположенных на территории Ленинградской области (табл. 1; рис. 1). В данной таблице данные отсортированы по широте пункта наблюдения.

Имеющиеся данные в долготном направлении охватывают в основном западную и центральную части области от  $28^{\circ}36'$  в.д. (г. Кингисепп) до  $32^{\circ}38'$  в.д. (п. Вороново). Восточная часть Ленинградской области представлена только одним пунктом наблюдения в п. Рейда Подпорожского района ( $34^{\circ}35'$  в.д.). В широтном направлении наблюдения охватывают регион от  $58^{\circ}53'$  с.ш. (д. Заполье Лужского района) до  $60^{\circ}58'$  с.ш. (п. Рейда Подпорожского района). Наблюдения включают в себя площадь, занимающую 72,5% в долготном и 71,8% в широтном направлении всей территории Ленинградской области. База данных не содержит информации о видовой принадлежности наблюдаемых шмелей. Несмотря на неполноту данных, представленная информация позволяет установить сроки вылета перезимовавших самок шмелей для значительной территории Ленинградской области.

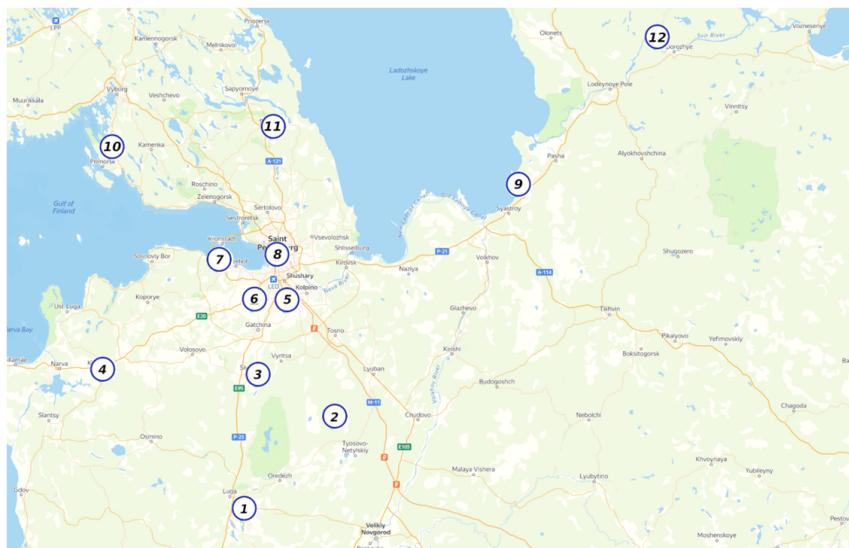


Рис. 1. Карта расположения пунктов фенологических наблюдений на территории Ленинградской области

Fig. 1. Map of the location of phenological observation points on the territory of the Leningrad province

Во временном аспекте наблюдения охватывают интервал с 1925 по 1993 годы. Вместе с тем следует отметить, что по некоторым пунктам период наблюдения имеет значительно более узкий диапазон, а в ряде случаев наблюдения по пункту имеют значительную дискретность: число наблюдений по разным пунктам изменяется от 8 лет (г. Красное Село, п. Вороново) до 35 лет (д. Заполье). По разным пунктам доля наблюдений (отношение суммы годов наблюдений к общему периоду наблюдений) колеблется от 0,27 (г. Кингисепп) до 1,0 (г. Красное Село).

Суммарный охват наблюдениями по всем пунктам на территории Ленинградской области за весь период с 1925 по 1993 годы (69 лет) составил 63 года (91,3%). В базе отсутствуют данные по учету выхода шмелей из зимней диапаузы за 1934, 1938, 1942, 1943, 1944 и 1946 годы.

Ниже приведены сроки (самое раннее наблюдение, среднее, самое позднее) выхода шмелей из зимней диапаузы, а также интервал в сутках между самым ранним и самым поздним вылетом шмелей по пунктам (табл. 2).

Таблица 1

**Характеристика пунктов фенологических наблюдений  
на территории Ленинградской области [База..., 2022]**

**Characteristics of phenological observation points  
in the Leningrad province [Base..., 2022]**

| №  | Пункт наблюдения   | Наблюдатели   | Географические координаты |            | Высота над уровнем моря, м | Количество лет наблюдений/доля от всего периода наблю- | Период наблюдений |
|----|--------------------|---|---------------------------|------------|----------------------------|--|-------------------|
|    |                    |   | Широта                    | Долгота    |                            |  |                   |
| 1  | д. Заполье         | А.А. Гоноболин,<br>М.И. Линдвест  | 58°53'с.ш.                | 29°55'в.д. | 50                         | 35 / 0,57  | 1925–1985         |
| 2  | п. Радофинниково   | Я.Т. Прокопенко   | 59°08'с.ш.                | 30°52'в.д. | 56                         | 17 / 0,71  | 1963–1986         |
| 3  | д. Белогорка       | В.И. Морозова,<br>Г.Э. Шульц,<br>В.А. Дадыко  | 59°21'с.ш.                | 30°07'в.д. | 91                         | 23 / 0,52  | 1950–1993         |
| 4  | г. Кингисепп       | Е.А. Исаева,<br>С.М. Багуцкая,<br>И.Р. Кирсанов   | 59°22'с.ш.                | 28°36'в.д. | 22                         | 17 / 0,27  | 1926–1989         |
| 5  | г. Пушкин          | В.К. Омельченко,<br>И.Н. Балбышев,<br>М.Д. Панова   | 59°43'с.ш.                | 30°25'в.д. | 74                         | 21 / 0,33  | 1929–1991         |
| 6  | г. Красное Село    | Г.А. Муравьев,<br>В.Д. Винек  | 59°44'с.ш.                | 30°05'в.д. | 110                        | 8 / 1,0  | 1961–1968         |
| 7  | г. Ломоносов       | Т.А. Тийснека,<br>А.С. Тепляков,<br>И. Сергиенков   | 59°55'с.ш.                | 29°46'в.д. | 30                         | 14 / 0,31  | 1929–1974         |
| 8  | г. Санкт-Петербург | Н.Е. Булыгин,<br>О.Е. Мартынов,<br>Н.Е. Зеленова,<br>Г.И. Иванов,<br>В.В. Шанраевский,<br>ЛТА | 59°57'с.ш.                | 30°19'в.д. | 1–22                       | 29 / 0,52  | 1920–1982         |
| 9  | п. Вороново        | А.А. Золотцев,<br>Н.И. Птицын,<br>В.В.Кривоборский  | 60°16'с.ш.                | 32°38'в.д. | 7                          | 8 / 0,38   | 1961–1981         |
| 10 | п. Глебычево       | А.И. Алехин   | 60°27'с.ш.                | 28°43'в.д. | 31                         | 18 / 0,35  | 1940–1990         |
| 11 | п. Сосново         | Г.Э. Шульц,<br>Н.Д. Головина  | 60°33'с.ш.                | 30°14'в.д. | 69                         | 13 / 0,43  | 1961–1990         |
| 12 | п. Рейда           | Г.В. Конюхов  | 60°58'с.ш.                | 34°35'в.д. | 55                         | 16 / 0,94  | 1961–1977         |

## Таблица 2

**Сроки выхода шмелей из зимней диапаузы на территории  
Ленинградской области (по материалам фенологического центра БИН РАН)**

**The timing of the release of bumblebees from the winter diapause  
in the Leningrad region (based on the materials of the phenological center  
of the KBI RAS)**

| №  | Пункт наблюдения   | Фенодата выхода шмелей из зимней диапаузы |              |               |                |
|----|--------------------|---|--------------|---------------|----------------|
|    |                    | средняя дата                              | самая ранняя | самая поздняя | интервал, сут. |
| 1  | д. Заполье         | 29/04                                     | 13/04/1925   | 14/05/1926    | 31             |
| 2  | п. Радофинниково   | 22/04                                     | 3/04/1983    | 5/05/1981     | 32             |
| 3  | д. Белогорка       | 27/04                                     | 6/04/1983    | 16/05/1955    | 40             |
| 4  | г. Кингисепп       | 27/04                                     | 13/04/1989   | 11/05/1926    | 28             |
| 5  | г. Пушкин          | 25/04                                     | 8/04/1991    | 9/05/1958     | 31             |
| 6  | г. Красное Село    | 29/04                                     | 11/04/1962   | 8/05/1965     | 27             |
| 7  | г. Ломоносов       | 1/05                                      | 26/04/1957   | 10/05/1958    | 14             |
| 8  | г. Санкт-Петербург | 2/05                                      | 13/04/1920   | 23/05/1923    | 40             |
| 9  | п. Вороново        | 11/05                                     | 24/04/1975   | 21/05/1961    | 27             |
| 10 | п. Глебычево       | 1/05                                      | 13/04/1989   | 10/05/1975    | 27             |
| 11 | п. Сосново         | 29/04                                     | 13/04/1989   | 11/05/1967    | 28             |
| 12 | п. Рейда           | 10/05                                     | 25/04/1962   | 26/05/1965    | 31             |

Самая ранняя дата выхода шмелей в пунктах наблюдений фиксировалась 3 апреля 1983 года в п. Радофинниково Тосненского района. Самый поздний срок вылета шмелей отмечен для п. Рейда Подпорожского района – 26 мая 1965 года. Средние даты вылета шмелей за весь период наблюдений находились в границах 22 апреля (п. Радофинниково) – 11 мая (п. Вороново).

Интервал между самой ранней и самой поздней датой вылета по пунктам наблюдений находится в границах от 14 до 40 суток. В среднем эта величина составляет 29 суток. Самая узкая величина интервала отмечена для г. Ломоносова – 14 суток (общее число наблюдений – 14 лет), наиболее широкий интервал вылета шмелей наблюдался в п. Белогорка (22 года наблюдений) и г. Санкт-Петербурге (29 лет наблюдений) – 40 суток.

Помимо обработки данных фенологической сети РГО автором были проведены самостоятельные наблюдения выхода самок шмелей из состоя-

ния зимней диапаузы в период с 2019 по 2023 год в пункте д. Новолисино Тосненского района ( $59^{\circ} 34'$  г с. ш.;  $30^{\circ} 33'$  г в.д.). За данный период фиксировались следующие даты весеннего вылета шмелей: в 2023 году – 11 апреля (*Bombus (sensu strico) lucorum* Linnaeus, 1761), в 2022 году – 20 апреля (*Bombus (sensu strico) lucorum* Linnaeus, 1761), в 2021 – 14 мая (*Bombus (Thoracobombus) pascuorum* Scopoli, 1763), в 2020 – 21 апреля (*Bombus (sensu strico) lucorum* Linnaeus, 1761), в 2019 – 15 апреля (*Bombus (Pyrobombus) pratorum* Linnaeus, 1761). Эти сроки вылетов лежат в границах, полученных путем обработки данных многолетних рядов фенонаблюдений.

Корреляционный анализ (г-Пирсон) показывает, что средняя дата вылета шмелей в Ленинградской области имеет высокую взаимосвязь с широтным положением пункта наблюдения ( $r=0,717$ ), что обусловлено изменением суммы эффективных температур с юга на север на территории Ленинградской области. Вместе с тем данный параметр имеет только среднее значение корреляции с изменением долготы пункта наблюдения в восточном направлении ( $r=0,601$ ), что, вероятно, обусловлено межозерным расположением территории, и вследствие этого уменьшение влияния фактора континентальности при продвижении с запада на восток.

Широтный компонент оказывает среднее влияние на дату самого раннего срока вылета шмелей, долготный и высотный компоненты оказывают слабое влияние на этот параметр. Вместе с тем для поздних сроков вылета отмечена средняя зависимость от долготы пункта наблюдения, в то время как широтный и высотный компонент оказывает здесь слабое влияние (табл. 3).

Таблица 3

**Зависимость сроков вылета шмелей от географического положения пункта наблюдения (коэффициент корреляции Пирсона)**

**Dependence of the departure time of bumblebees on the geographical location of the observation point (Pearson correlation coefficient)**

| Параметры               | Фенологические сроки вылета шмелей |              |               |
|-------------------------|------------------------------------|--------------|---------------|
|                         | средний                            | самый ранний | самый поздний |
| Широта местности        | 0,717 (выс)                        | 0,601 (ср)   | 0,465 (сл)    |
| Долгота местности       | 0,529 (ср)                         | 0,474 (сл)   | 0,662 (ср)    |
| Высота над уровнем моря | -0,199 (очсл)                      | -0,488 (сл)  | -0,375 (сл)   |

*Примечания:* выс. – высокое, ср – среднее, сл – слабое, очсл – очень слабое значение взаимосвязи параметров по шкале Чеддока.

Оценка взаимосвязи по методу ранговой корреляции ( $\rho$ -Спирмена,  $df = 10$ ) показывает существенную зависимость средних и ранних сроков вылета шмелей от широты местности ( $p_{01}$ ) и позднего срока вылета ( $p_{05}$ ). Долготный компонент показывает зависимость только по средним срокам вылета ( $p_{05}$ ). В прочих случаях анализ показывает отсутствие взаимосвязей между рассматриваемыми параметрами (табл. 4).

Таблица 4

**Зависимость сроков вылета шмелей от географического положения пункта наблюдения (коэффициент ранговой корреляции Спирмена)**

**Dependence of the departure time of bumblebees on the geographical location of the observation point (Spearman's rank correlation coefficient)**

| Параметры               | Фенологические сроки вылета шмелей |                      |                      |
|-------------------------|------------------------------------|----------------------|----------------------|
|                         | средний                            | самый ранний         | самый поздний        |
| Широта местности        | 0,822 (+, $p_{01}$ )               | 0,726 (+, $p_{01}$ ) | 0,582 (+, $p_{05}$ ) |
| Долгота местности       | 0,615 (+, $p_{05}$ )               | 0,484                | 0,561                |
| Высота над уровнем моря | 0,483                              | 0,330                | 0,564                |

Примечания: (+) – взаимосвязь существует;  $p_{01}$ ,  $p_{05}$  – уровень значимости. В остальных случаях взаимосвязь отсутствует

Вследствие межозерного положения исследуемой местности отмечаются незначительные различия в суммах эффективных температур в долготном направлении. Вероятно, данный градиент будет определять некоторый уровень взаимосвязи между фактором континентальности местности и средними сроками выхода шмелей из спячки. Вместе с тем в те годы, в которые отмечаются самые ранние и самые поздние из сроков выхода шмелей из зимней диапаузы (ранние и затяжные весны), будут оказывать большее влияние иные экологические факторы, действующие на популяцию шмелей конкретного местообитания, а не фактор континентальности местности по причине незначительного градиента суммы активных температур, наблюдаемого в долготном направлении для данной территории.

*Выходы.*

1) Самая ранняя фиксированная дата вылета шмелей для западной и центральной части Ленинградской области за период наблюдений с 1925 по 2023 годы – 3 апреля (п. Радофинниково, Тосненский район, 1983 год), самая поздняя – 26 мая (п. Рейда, Подпорожский район, 1965 год). Средние

даты вылета лежат в интервале от 22 апреля до 11 мая. Самые поздние вылеты в пунктах наблюдений фиксировались в период с 5 мая по 26 мая.

2) Интервал между самым ранним и самым поздним сроком вылета шмелей в разных пунктах наблюдений изменяется от 14 до 40 суток. Среднее значение этого интервала составляет 29,67 суток.

3) Сроки вылета шмелей на исследуемой территории сильно зависят от широтной характеристики ( boreальности) ареала обитания. Влияние долготной характеристики (континентальности) ареала обитания имеет большей частью слабый уровень влияния на сроки вылета перезимовавших самок шмелей. Средний уровень зависимости от долготы отмечен только по средним срокам вылета ( $r = 0,529$ ,  $p = 0,615$ ), что, как предполагается, обусловлено межозерным расположением исследуемой местности. Зависимость сроков вылета от высоты местности над уровнем моря не выявлена.

*Благодарности.* Автор выражает благодарность заведующему фенологического центра при БИН РАН им. В.Л. Комарова Лебедеву Павлу Александровичу, канд. с.-х. наук за оказанную помощь в проведении данного исследования.

*Конфликт интересов.* Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Библиографический список

База данных фенологических наблюдений. Ленинградская область. БИН РАН, 2022.

Галахов Н.Н. Изучение структуры климатических сезонов года. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 184 с.

Жарков И.В. Простейшие наблюдения в природе. М.: Сельхозиздат, 1956. 128 с.

Мадебейкин И.И. Фенология цветения медоносов и посещаемость их шмелями и медоносными пчелами // Экология и охрана насекомых. Первая международная научно-практическая конференция. Рыбное, Рязанская область, 1996. С. 144–146.

Попов И.Б. Трофический конвейер и его роль в жизни шмелей (Hymenoptera, *Bombus*) в условиях Краснодарского края // Труды Кубанского государственного аграрного университета, Вып. №5(9). Краснодар, 2008. С. 145–149.

Преображенский С.М., Галахов Н.Н. Фенологические наблюдения. Руководство. М.: Главное управление по заповедникам, 1948. 158 с.

Радченко В.Г., Песенко Ю.А. Биология пчел (Hymenoptera, Apoidea). СПб.: Изд-во РАН, 1994. 364 с.

Рекомендации по унификации фенологических наблюдений в России / Минин А.А., Ананин А.А., Буйволов Ю.А., Ларин Е.Г., Лебедев П.А., Поликарпова Н.В., Прокошева И.В., Руденко М.И., Сапельникова И.И., Федотова В.Г., Шуйская Е.А., Яковлева М.В., Янцер О.В. // Nature Conservation Research. Заповедная наука. № 5(4), 2020. С. 89110.

Туданов Р.А., Рошиненко В.И. Фенологические характеристики шмелей // Пчеловодство. № 10, 2007. С. 58–59.

Филонов К.П., Нухимовская Ю.Д. Летопись природы в заповедниках СССР. М.: Наука, 1990. 160 с.

### References

Database of phenological observations. Leningrad region. KBI RAS, 2022. (In Russ.)

Filonov K.P., Nukhimovskaya Yu.D. The Chronicle of nature in the reserves of the USSR. M.: Nauka, 1990. 160 p. (In Russ.)

Galakhov N.N. Studying the structure of the climatic seasons of the year. M.: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1959. 184 p. (In Russ.)

Madebeikin I.I. Phenology of honeybee flowering and their attendance by bumblebees and honey bees. *Ecology and protection of insects*: The first International Scientific and Practical conference. Rybnoye, Ryazan region, 1996, pp. 144–146. (In Russ.)

Popov I.B. Trophic conveyor and its role in the life of bumblebees (Hymenoptera, *Bombus*) in the Krasnodar Territory. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*, 2008, iss. 5(9), pp. 145–149. (In Russ.)

Preobrazhensky S.M., Galakhov N.N. Phenological observations. M.: Main Directorate for Nature Reserves, 1948. 158 p. (In Russ.)

Radchenko V.G., Pesenko Yu.A. Biology of bees (Hymenoptera, Apoidea). St. Petersburg: Publishing House of the Russian Academy of Sciences, 1994. 364 p. (In Russ.)

Recommendations for the unification of phenological observations in Russia / Minin A.A., Ananin A.A., Buyvolov Yu.A., Larin E.G., Lebedev P.A., Polikarpova N.V., Prokosheva I.V., Rudenko M.I., Sapelnikova I.I., Fedotova V.G., Shuiskaya E.A., Yakovleva M.V., Yanzer O.V. Nature Conservation Research. *Protected science*, 2020, no. 5(4), pp. 89–110. (In Russ.)

Tudanov R.A., Roshchinenco V.I. Phenological characteristics of bumblebees. *Beekeeping*, 2007, no. 10, pp. 58–59. (In Russ.)

Zharkov I.V. The simplest observations in nature. M.: Agricultural publishing House, 1956. 128 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 09.01.2024

---

**Байков М.В.** Сроки выхода шмелей рода *Bombus* (Hymenoptera: Apidae) из состояния зимней диапаузы на территории Ленинградской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 249. С. 76–86. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.76-86

Важное значение для шмелей рода *Bombus* (Hymenoptera: Apidae), как насекомых-антофилов с растянутым периодом жизни семьи, является формирование такого фенологического календаря, который позволяет шмелям различных видов и обитателям разнообразных экотопов приспособиться к трофическому использованию произрастающих там растений. Анализ многолетних рядов фенонаблюдений показал: самая ранняя фиксированная дата вылета шмелей для западной и центральной частей Ленинградской области за период наблюдений с 1925 по 2023 годы – 3 апреля (Тосненский район), самая поздняя – 26 мая (Подпорожский район). Средние даты вылета лежат в интервале от 22 апреля до 11 мая. Самые поздние вылеты в пунктах наблюдений фиксировались в период с 5 мая по 26 мая. Интервал между самым ранним и самым поздним сроком вылета шмелей в разных пунктах наблюдений изменяется от 14 до 40 суток. Среднее значение этого интервала составляет 29,67 суток. Высокий и средний уровень зависимости сроков выхода шмелей из зимней диапаузы показан для широтной характеристики ( boreальности) ареала обитания, влияние долготной характеристики (континентальности) ареала обитания имеет большей частью слабый уровень влияния на сроки вылета перезимовавших самок шмелей. Средний уровень зависимости от долготы отмечен только по средним срокам вылета ( $r=0,529$ ,  $p = 0,615$ ). Зависимость сроков вылета от высоты местности над уровнем моря не выявлена.

**Ключевые слова:** шмели, фенологические наблюдения, диапауза, Ленинградская область, *Bombus*.

**Baykov M.V.** The timing of the release of bumblebees of the genus *Bombus* (Hymenoptera: Apidae) from the state of winter diapause in the Leningrad province. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 249, pp. 76-83 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.76-83

Important for bumblebees of the genus *Bombus* (Hymenoptera: Apidae), as anthophilic insects with a prolonged family life period, is the formation of such a phenological calendar that allows bumblebees of various species and inhabitants of various ecotopes to adapt to the trophic use of plants growing there. The analysis of long-term series of phenological observations showed that the earliest fixed date of departure of bumblebees for the Leningrad province during the observation period from 1925 to 2023 was April 3 (Tosnensky district), the latest was May 26 (Podporozhsky district). The average departure dates was in the range from April 22 to May 11. The latest departures at the observation points were recorded in the period from May 5 to May 26. The interval between the earliest and the latest departure time of bumblebees at different observation points varied from 14 to 40 days. The average value of this interval was 29.67 days. A high and average level of dependence of the timing of the release of bumblebees from the winter diapause is shown for the latitudinal characteristic (boreal) of the habitat, the influence of the longitude

characteristic (continentality) of the habitat has for the most part a weak level of influence on the timing of the departure of overwintered female bumblebees. The average level of dependence on longitude is marked only by the average departure time ( $r = 0.529$ ,  $p = 0.615$ ). The dependence of the departure time on the altitude of the terrain above sea level has not been revealed.

**Keywords:** bumblebee, phenological observations, diapause, Leningrad province, *Bombus*.

---

**БАЙКОВ Михаил Викторович** – аспирант Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова; преподаватель Санкт-Петербургского государственного аграрного университета.

194223, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: bami@inbox.ru

**BAIKOV Mikhail V.** – PhD student of St.Petersburg State Forest Technical University; lecturer at St. Petersburg State Agrarian University.

194223. Institutskiy per. 5. Lit. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: bami@inbox.ru

**А.П. Смирнов, А.А. Смирнов**

**ЕСТЕСТВЕННОЕ ВОЗОБНОВЛЕНИЕ ЛЕСА  
В ОСУШАЕМЫХ СОСНЯКАХ,  
ПРОЙДЕННЫХ КОМПЛЕКСНЫМИ РУБКАМИ**

*Введение.* Одна из актуальных задач современного лесоводства – эффективное ведение лесного хозяйства на землях, в осушение которых во второй половине 20-го века были вложены огромные трудовые затраты и денежные средства.

Лесорастительный потенциал осушаемых торфяных почв не проявлялся в полной мере, если насаждения имели высокий возраст или образовали разновозрастные, низкополнотные и малоценные древостои. Поэтому одновременно с осушением разновозрастных древостоев или сразу после него необходимо удаление спелых и перестойных деревьев с целью устранения затенения и корневой конкуренции между старым и молодым поколениями леса [Пьявченко, 1972].

К молодому поколению в полной мере относится и подрост лесообразующих пород на осушаемых объектах.

Целью настоящей работы является оценка динамики естественного возобновления после комплексных рубок (рубок омоложения) в разновозрастных сосняках кустарничково-сфагновых на осушаемом верховом болоте. Приводятся результаты длительных, 40-летних наблюдений на стационарных объектах.

*Объекты и методика исследования.* Наблюдения за динамикой состава и количества подроста проводились на Тосненском гидромелиоративном стационаре кафедры почвоведения Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета (Тосненский район Ленинградской области). Стационар заложен в 1967 г. проф. Б.В. Бабиковым для осуществления гидрологических исследований в условиях экспериментального осушения, с расстояниями между каналами 65, 130 и 205 м [Бабиков, 1980].

Тип леса на опытном объекте – сосняк кустарничково-сфагновый осушаемый. В 1984 г., через 17 лет после лесомелиоративных работ, на стационаре проводились опытные рубки. Цель эксперимента – выявить особенности восстановительных процессов после разреживаний древостоев в

условиях осушения верхового торфяника такой интенсивности, когда на всем межканальном промежутке древостой имеет один класс бонитета после осушения. Поэтому рубки были проведены в местах впадения осушителей в собиратели (под острым углом), на участках при условных средних расстояниях между каналами 45 и 20 м, а также на одном из участков с расстоянием между каналами 65 м.

Опытные участки на объекте распределены по двум сериям. В 1-й серии общая мощность торфяной залежи достигала 2 м, мощность сфагнового очёса составляла 0,4–0,5 м, горизонт переходного торфа залегал на глубине 1,3–1,8 м. На момент рубок рост молодых 30–40-летних деревьев соответствовал здесь III классу бонитета. Бонитет определен по таблицам для осушаемых сосняков, задержанных в росте [Рубцов, Кнize, 1977]. Во 2-й серии опытных участков (серия А) лесорастительные условия были лучше. Мощность очёса составляла 0,3–0,4 м, слой переходного торфа залегал на глубине 0,8–1 м. На этих участках молодая сосна росла по II классу бонитета.

Выборке подлежали деревья старшей возрастной группы (70–80 лет и более). В большей или меньшей степени разреживалась также молодая часть древостоя по низовому методу. Опытные рубки в целом носили характер комплексных. Интенсивность разреживаний по суммарному запасу варьировала от 23 до 77 %. На одном из участков (ПП 1А-р) была проведена одновременно с осушением в 1967 г. сплошная рубка (табл. 1).

*Методика исследования.* Таксационные характеристики древостоев определены по методическим рекомендациям для осушаемых сосняков [Рубцов, Кнize, 1977]. Подрост лесообразующих пород (сосна, ель, берёза) учитывался на круговых учётных площадках размером 10 м<sup>2</sup>, равномерно распределённых по площади на каждом из вариантов опыта. Количество учётных площадок варьировало, в зависимости от площади проб, от 14 до 30. Подрост распределялся по высоте (мелкий – до 0,5 м; средний – 0,5–1,5 м; крупный – более 1,5 м). Определялись также жизнеспособность и встречаемость подроста, т. е. равномерность его размещения по площади [Мартынов и др., 1994].

*Результаты исследований и их обсуждение.* В год проведения рубок, через 17 лет после осушения, подрост сосны имелся на всех участках, причем на большинстве из них – в количестве 7–10 тыс. экз./га, при встречаемости 77–100% (табл. 2).

Основная часть подроста сосны относилась к первой генерации после проведения гидромелиорации. Возраст крупного подроста в основном совпадал с давностью осушения (15–20 лет). Преобладал, как правило, средний по высоте подрост.

Таблица 1

**Распределение пробных площадей по продуктивности древостоев,  
степени осушения и вариантам опыта**

**Distribution of sample plots according to stand productivity, degree  
of drainage and variants of experiment**

| Номер ПП | Расстояние между каналами, м | Класс бонитета сосны после осушения | Вариант опыта                  | Интенсивность рубки по запасу, % |
|----------|------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| 1-р      | 20                           | III                                 | рубка (1984 г.)                | 32                               |
| 4-р      | 45                           | III                                 | рубка (1984 г.)                | 57                               |
| 2-к      | 45                           | III                                 | контроль для ПП 1-р и ПП 4-р   | –                                |
| 1А-р     | 20                           | II                                  | рубка (1967 г.)                | 100                              |
| 2А-р     | 45                           | II                                  | рубка (1984 г.)                | 52                               |
| 4А-к     | 45                           | II                                  | контроль для ПП 2А-р и ПП 1А-р | –                                |
| 5А-р     | 65                           | II                                  | рубка (1984 г.)                | 77                               |
| 7А-к     | 65                           | II                                  | контроль                       | –                                |
| 15А-к    | 205                          | V                                   | общий слабоосушаемый контроль  | –                                |

Формирование сравнительно густого и жизнеспособного подроста сосны в течение 17 лет после проведения осушительных работ на всех опытных участках было обеспечено, по-видимому, улучшением водно-воздушного и питательного режимов почвы, причем в условиях еще достаточного светового довольствия и слабой корневой конкуренции с только что «проснувшимся от болотной спячки» древостоем. Подрост сосны в количестве 6,7 тыс. экз./га сформировался также на общем слабоосушаемом контроле ПП 15А-к (середина межканавного промежутка при расстоянии между каналами 205 м), где понижение уровня почвенно-грунтовых вод было минимальным, а бонитет сосны повысился всего с Va до V класса [Смирнов, 2019].

В течение последующих 15 лет после проведения опытных рубок количество подроста сосны резко уменьшилось на всех вариантах рубок и на контроле (табл. 3).

Таблица 2

**Характеристика жизнеспособного соснового подроста в осушенном сосновке кустарничково-сфагновом в год разреживания древостоя (1984)**

**Characteristics of viable pine undergrowth in drained shrub-sphagnum pine forest in the year of thinning of the stand (1984)**

| Номер ПП                     | Интенсивность рубки, % | Густота древостоя, дер./га | Подрост          |                   |              |          |         |
|------------------------------|------------------------|----------------------------|------------------|-------------------|--------------|----------|---------|
|                              |                        |                            | густота, экз./га | встречае-мость, % | категории, % |          |         |
|                              |                        |                            |                  |                   | круп-ный     | сред-ний | мел-кий |
| контрольные варианты         |                        |                            |                  |                   |              |          |         |
| 2-к                          | —                      | 3968                       | 9430             | 100               | 36           | 51       | 13      |
| 4А-к                         | —                      | 2186                       | 7781             | 100               | 25           | 63       | 12      |
| 7А-к                         | —                      | 1600                       | 9268             | 100               | 21           | 53       | 26      |
| 15А-к                        | —                      | 1466                       | 6726             | 100               | 23           | 42       | 35      |
| варианты с проведением рубок |                        |                            |                  |                   |              |          |         |
| 1-р                          | 32                     | 3185                       | 4624             | 77                | 64           | 29       | 7       |
| 4-р                          | 75                     | 2518                       | 7038             | 94                | 20           | 65       | 15      |
| 1А-р                         | 100                    | 1431                       | 10515            | 100               | 20           | 52       | 18      |
| 2А-р                         | 52                     | 1347                       | 6590             | 100               | 6            | 83       | 11      |
| 5А-р                         | 77                     | 780                        | 9338             | 100               | 7            | 61       | 32      |

Особенно интенсивный отпад подроста (уменьшение густоты в 53 раза) наблюдался на контрольной секции ПП 2-к и на участке рубок 1А-р (уменьшение густоты в 22 раза). В обоих случаях в наибольшей степени происходило усыхание крупного подроста. На других вариантах опыта интенсивность отпада была значительно меньшей, но всё же достаточно высокой (уменьшение густоты в 2,8–7,8 раза) (рис. 1).

Уменьшение количества подроста сосны происходило в вариантах опыта с самыми разными таксационными характеристиками древостоя. В 1999 г. полнота варьировалась от 0,4 до 0,8, густота от 0,8 до 5 тыс. дер./га, класс бонитета от II до V. На слабоосушаемом контроле (ПП 15А-к) происходили те же процессы, что и на интенсивно осушенных участках – густота подроста за 15 лет снизилась в 3,6 раза.

Таблица 3

**Характеристика жизнеспособного соснового подроста в сосновом кустарничково-сфагновом через 15 лет после рубки (1999 г.)**

**Characteristics of viable pine undergrowth in shrub-sphagnum pine forest  
15 years after felling (1999)**

| Номер<br>ПП                  | Интенсив-<br>ность руб-<br>ки, % | Густота<br>древостоя,<br>дер./га | Подрост             |                       |              |              |             |
|------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------|-----------------------|--------------|--------------|-------------|
|                              |                                  |                                  | густота,<br>экз./га | встречае-<br>мость, % | категории, % |              |             |
|                              |                                  |                                  |                     |                       | круп-<br>ный | сред-<br>ний | мел-<br>кий |
| контрольные варианты         |                                  |                                  |                     |                       |              |              |             |
| 2-к                          | —                                | 3968                             | 179                 | 10                    | 100          | —            | —           |
| 4А-к                         | —                                | 2186                             | 2459                | 83                    | 59           | 40           | 1           |
| 7А-к                         | —                                | 1600                             | 2016                | 92                    | 56           | 42           | 2           |
| 15А-к                        | —                                | 1466                             | 1872                | 89                    | 74           | 21           | 5           |
| варианты с проведением рубок |                                  |                                  |                     |                       |              |              |             |
| 1-р                          | 32                               | 3185                             | 1533                | 86                    | 39           | 45           | 16          |
| 4-р                          | 75                               | 2518                             | 1063                | 67                    | 5            | 71           | 24          |
| 1А-р                         | 100                              | 1431                             | 478                 | 52                    | 20           | 74           | 6           |
| 2А-р                         | 52                               | 1347                             | 841                 | 51                    | 49           | 51           | —           |
| 5А-р                         | 77                               | 780                              | 3327                | 100                   | 56           | 41           | 3           |

Это в целом соответствует данным других исследователей [Кузнецов и др., 1977; Солнцев, 2008]. По-видимому, усыхание подроста в первую очередь связано с усиленным ростом древостоев в этот период. За 15 лет запас сосновок на интенсивно осушаемых участках, как в вариантах с разреживанием, так и на контрольных, увеличился в 2,6–4 раза, а на ПП 5А-р – почти в 5 раз. Густота древостоев в большинстве случаев также возросла, хотя и незначительно – на 7–17%. Однако на отдельных вариантах опыта густота древостоев снизилась, причем особенно заметно (на 29%) на ПП 2-к. И на этом же участке зафиксировано и наибольшее снижение густоты подроста.

В.Г. Рубцов и А.А. Книзе [1981] считали, что отпад сосны в этих условиях объясняется в первую очередь недостатком света. Кроме того, по мнению авторов, в хорошо осушенной полосе межканавного пространства в сухие годы может иметь место некоторый дефицит почвенной влаги, что при большой густоте древостоя также приводит к усилению отпада.

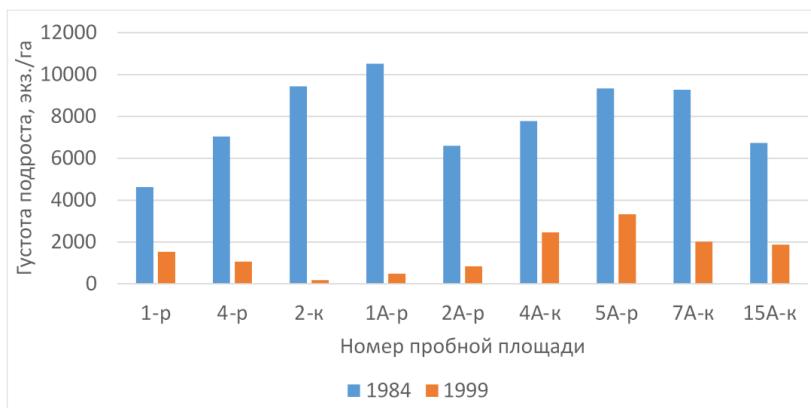


Рис. 1. Динамика количества подроста сосны на опытных участках по годам наблюдений

Fig. 1. Dynamics of the amount of pine undergrowth in experimental plots by years of observation

До проведения рубок в 1984 г. количество подроста сосны не имело достоверной корреляционной связи с густотой древостоев на опытных участках. В 1999 г. на контрольных участках выявлена достоверная, на 10%-ном уровне значимости, достаточно тесная отрицательная корреляция густоты подроста с густотой древостоев ( $R = -0,77$ ), а на экспериментальных участках – с абсолютной полнотой,  $R = -0,78$ , и с запасами древостоев ( $R = -0,75$ ).

Возможно, что на подрост сосны повлияла конкуренция не только с древостоем, но и с подростом березы, появившимся к 1999 году. Молодое поколение березы лучше адаптируется к новым условиям на осушаемых объектах по сравнению с сосной [Матюшкин, 1997]. Резкое уменьшение численности жизнеспособного подроста сосны и появление подроста березы в средневозрастном сосняке осоково-кустарниковом через 20 лет после проведения осушительных работ отмечено также на Среднем Урале [Залесов и др., 2012].

Всё же основной причиной отпада подроста сосны следует считать ускорение роста древостоя в этот период и, следовательно, усиление корневой конкуренции за элементы питания в поверхностном горизонте почвы, где расположена основная масса мелких сосущих корней. Как указывают В.С. Ипатов и Л.А. Кирикова, «представляется невероятным, чтобы

подрост (имеющий небольшие размеры) мог длительное время существовать в условиях конкуренции с верхним ярусом и не гибнуть... Конкуренция в подросте протекает под жестким прессом верхнего яруса, в условиях ограничения светового довольствия и, видимо, отчасти и количества почвенного раствора, поскольку хотя бы частично корни подроста и деревьев верхнего яруса все же соприкасаются» [Ипатов, Кирикова, 1997].

В течение следующих 15 лет, к 2014 г., подрост сосны на всем объекте полностью перешёл в отпад (рис. 2, 3).

В год проведения рубок (1984) мелкий подрост берёзы встречался единично лишь на участках 2-й серии. Налёт семян этой породы был обеспечен наличием взрослых деревьев на окрайке болота, примерно в полукилометре от опытных объектов. Береза повислая *Betula pendula* Roth., являясь анемохорным растением, распространяет семена по воздуху на расстояние до нескольких километров от материнского растения [Тимофеев, 2023].



Рис. 2. Общий вид насаждения на общем контроле ПП 15А-к.  
Подрост сосны отсутствует (2014 год)

Fig. 2. General view of the planting on the general control of PP 15A-k.  
Undergrowth of pine is absent (2014)



Рис. 3. Общий вид насаждения на ПП 2А-р с наличием подроста березы.  
Подрост сосны отсутствует (2014 год)

Fig. 3. General view of the planting on PP 2A-r with the presence  
of birch undergrowth. Pine undergrowth missing (2014)

По данным молекулярно-генетического анализа, на олиготрофных верховых болотах абсолютно преобладают особи именно *Betula pendula*, гибриды редки, а деревья *Betula pubescens* Ehrh. встречаются единично [Маслов и др., 2019].

К 1999 году подрост берёзы появился на всех участках, в единичном количестве даже на слабоосушаемом общем контроле ПП 15А-к (табл. 4). Отпад березы практически отсутствовал на всем объекте.

К 2014 г. на участках 2-й серии из крупного подроста березы сформировался второй ярус высотой 6–8 м, диаметром 4–6 см, в количестве около 0,25 тыс. дер./га, при высотах 1-го яруса сосны на опытных участках 14–16 м, густоте 1,5–2 тыс. дер./га. Единичные деревья березы диаметром 18–22 см возле каналов входили в первый ярус.

Таблица 4

**Характеристика подроста березы  
в осушаемом сосняке кустарничково-сфагновом  
через 15 лет после разреживания древостоя (1999)**

**Characteristics of birch undergrowth in drained shrub-sphagnum pine  
forest 15 years after thinning of the stand (1999)**

| Номер<br>ПП                  | Интенсив-<br>ность руб-<br>ки, % | Густота<br>древо-<br>стоя,<br>дер./га | Подрост             |                       |              |              |             |
|------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|---------------------|-----------------------|--------------|--------------|-------------|
|                              |                                  |                                       | густота,<br>экз./га | встречае-<br>мость, % | категории    |              |             |
|                              |                                  |                                       |                     |                       | круп-<br>ный | сред-<br>ний | мел-<br>кий |
| контрольные варианты         |                                  |                                       |                     |                       |              |              |             |
| 2-к                          | –                                | 3968                                  | 438                 | 25                    | 28           | 29           | 43          |
| 4А-к                         | –                                | 2186                                  | 480                 | 42                    | 55           | 39           | 6           |
| 7А-к                         | –                                | 1600                                  | 900                 | 47                    | 22           | 78           | –           |
| 15А-к                        | –                                | 1466                                  | 66                  | 4                     | –            | 50           | 50          |
| варианты с проведением рубок |                                  |                                       |                     |                       |              |              |             |
| 1-р                          | 32                               | 3185                                  | 1017                | 61                    | 56           | 22           | 22          |
| 4-р                          | 75                               | 2518                                  | 1223                | 56                    | 5            | 54           | 41          |
| 1А-р                         | 100                              | 1431                                  | 4133                | 100                   | 61           | 36           | 3           |
| 2А-р                         | 52                               | 1347                                  | 1480                | 62                    | 50           | 50           | –           |
| 5А-р                         | 77                               | 780                                   | 1915                | 73                    | 47           | 53           | –           |

Через 40 лет после проведения рубок (2023 г.) присутствие подроста березы сохранилось на большинстве участков. На контрольных вариантах 2-й серии густота бересового подроста в 6,5 раза выше по сравнению с таковыми 1-й серии; на участках рубок – соответственно выше лишь в 2 раза (рис. 4). В 1999 г. преобладал средний или крупный подрост берёзы, в 2014 и 2023 гг. – крупный. Подрост и деревья второго и первого ярусов, как правило, приурочены к каналам, где больше света и лучше водно-воздушный и питательный режимы почв.

Очень тесная отрицательная корреляция ( $R$ ) количества подроста берёзы с густотой древостоя наблюдалась по годам наблюдений на контрольных вариантах опыта. Менее тесная – на экспериментальных вариантах (табл. 5).

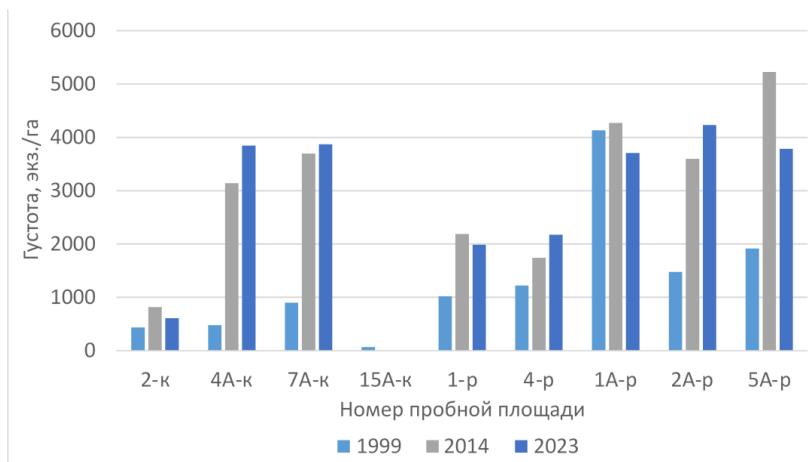


Рис. 4. Динамика подроста березы на опытных участках по годам наблюдений  
Fig. 4. Dynamics of birch undergrowth in experimental plots by years of observation

Таблица 5

**Корреляция количества подроста березы с густотой древостоев**  
**Correlation between the amount of birch undergrowth and stands thickness**

| Год учета | Контрольные варианты | Варианты с рубкой |
|-----------|----------------------|-------------------|
| 1999      | -0,97                | -0,69             |
| 2014      | -0,98                | -0,88             |
| 2023      | -0,95                | -0,93             |

В 2023 г. отдельные деревья березы в первом ярусе на участках 2-й серии достигли диаметра 24–28 см. Во втором ярусе деревьев было вдвое меньше по сравнению с 2014 годом, в среднем около 150 экз./га.

Разрастание подроста и формирование 2-го яруса березы связано, по-видимому, с ресурсосберегающей ролью этой породы [Мельников, 1999]. Известно, что береза характеризуется более высокой потребностью в элементах питания по сравнению с сосной и обеспечивает возможность быстрого захвата, связывания и возврата питательных веществ в почву с опадом [Медведева и др., 1977]. Опад березы угнетающее действует на сфагновые мхи [Книзе, Рубцов, 1982] и обогащает почву азотом [Мелентьева, 1980].

Несмотря на относительное обилие подроста берёзы на интенсивно осушаемых участках спустя полвека после устройства каналов и формирование в сосняке низкополнотного второго березового яруса (в форме под-

леска), перспективы полноценного участия бересы в составе первого яруса по всей территории участков весьма проблематичны. По-видимому, берёза будет и впредь участвовать в составе древостоев в количестве одна-две единицы в основном лишь у каналов. На эффективно осушаемых участках кустарничково-сфагновых болот в Архангельской области береза присутствует в составе до 3 единиц [Пономарева, 2022].

Подрост ели в год рубки (1984) в единичных экземплярах имелся лишь на отдельных участках 2-й серии. Несмотря на малую численность как на разреженных, так и на контрольных вариантах, подрост ели оценивается как жизнеспособный, а по высоте относится к мелкому и среднему. Положительное влияние проведения несплошных рубок в осушаемых лесах на появление подроста ели отмечается в литературе [Грозин, 2003].

К 1999 г. густота подроста ели на участках 2-й серии составляла 0,1–0,4 тыс. экз./га, и в дальнейшем почти не увеличивалась. Несмотря на крайне незначительное количество елового подроста и его неравномерное распределение по площади, за последние 15–25 лет практически отсутствует его отпад (табл. 6).

Таблица 6

**Динамика суммарного количества жизнеспособного подроста по годам наблюдений в осушаемом сосняке кустарничково-сфагновом**  
**Dynamics of the total amount of viable undergrowth by years of observation**  
**in drained shrub-sphagnum pine forest**

| Номер ПП                     | Густота жизнеспособного подроста по породам и годам наблюдений, экз./га |      |      |        |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------|---|------|------|--------|------|------|------|------|------|------|------|
|                              | сосна   |      |      | береса |      |      |      | ель  |      |      |      |
|                              | 1984  | 1999 | 2014 | 1984   | 1999 | 2014 | 2023 | 1984 | 1999 | 2014 | 2023 |
| контрольные варианты         |   |      |      |        |      |      |      |      |      |      |      |
| 2-к                          | 9430  | 179  | 0    | 0      | 438  | 820  | 612  | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 4А-к                         | 7781  | 2459 | ед   | ед     | 480  | 3141 | 3845 | 0    | 132  | 150  | 136  |
| 7А-к                         | 9268  | 2016 | ед   | ед     | 900  | 3696 | 3870 | 0    | 36   | 48   | 36   |
| 15А-к                        | 6726  | 1872 | 0    | 0      | 66   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| варианты с проведением рубок |   |      |      |        |      |      |      |      |      |      |      |
| 1-р                          | 4624  | 1533 | 0    | 0      | 1017 | 2187 | 1990 | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 4-р                          | 7038  | 1063 | 0    | 0      | 1223 | 1743 | 2176 | 0    | 0    | 26   | 20   |
| 1А-р                         | 10515   | 478  | 0    | ед     | 4133 | 4268 | 3709 | 0    | 48   | 60   | 74   |
| 2А-р                         | 6590  | 841  | ед   | ед     | 1480 | 3600 | 4232 | ед   | 356  | 382  | 338  |
| 5А-р                         | 9338  | 3327 | ед   | ед     | 1915 | 5227 | 3786 | ед   | 92   | 156  | 140  |

Сплошная или равномерно-постепенная рубка спелого соснового древостоя на опытном объекте бесспорно вызовет массовое появление подроста сосны и березы. Можно предположить, что на участках 1-й серии будет преобладать подрост сосны, на участках 2-й – подрост березы. Во всяком случае, успешное возобновление этих пород на интенсивно осушаемых участках верхового болота обеспечит в будущем формирование полноценных древостоев.

**Заключение.** Опытные комплексные рубки проводились в разновозрастных сосняках на интенсивно осушаемых участках верхового торфяника через 17 лет после устройства каналов. Полнотью удалялась старовозрастная часть древостоя, в молодой части проводилось разреживание. В год проведения рубок (1984) подрост сосны имелся на всех опытных участках, причем на большинстве из них – в количестве 7–10 тыс. экз./га, при встречаемости 77–100%. В течение последующих 15 лет количество подроста сосны уменьшилось до 0,2–3,3 тыс. экз./га. Еще через 15 лет (2014) подрост сосны полностью перешел в отпад. По-видимому, основной причиной явилась усилившаяся конкуренция за свет и питательные вещества почвы со стороны интенсивно растущего древостоя.

В год проведения рубок мелкий подрост берёзы встречался единично. В течение последующих 15 лет (1999) подрост берёзы появился на всех участках в количестве 0,4–4 тыс. экз./га. Еще через 15 лет (2014) густота березы на большинстве участков возросла до 2–5 тыс. экз./га, и к настоящему времени (2023 г.) это количество почти не изменилось. Тем самым подтверждается, что молодое поколение березы лучше адаптируется к новым условиям на осушаемых объектах по сравнению с сосной. Больше подроста березы у каналов, где лучше световой и питательный режимы.

Подрост ели в год проведения рубок также встречался единично. К 1999 г. густота подроста ели на отдельных участках составляла 0,1–0,4 тыс. экз./га, и в дальнейшем почти не увеличивалась. Несмотря на крайне незначительное количество елового подроста и его неравномерное распределение по площади, за последние 15–25 лет практически отсутствует его отпад.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Библиографический список**

*Бабиков Б.В. Гидрологический режим осущенных лесных болот, сформировавшихся на тяжелых почвах (на примере болота Гладкое Тосненского района Ленинградской области) // Значение болот в биосфере. М.: Наука, 1980. С. 81–95.*

Грозин А.Н. Влияние осушения и выборочных рубок в елово-лиственных древостоях на состояние и рост подроста ели в условиях Среднего Урала: автореф. дис... канд. с.-х. наук: 06.03.03. Екатеринбург, 2003. 20 с.

Залесов С.В., Залесова Е.С., Тукачева А.В. Последствия проходной рубки в осушеннем сосняке осоково-кустарниковом // Аграрный вестник Урала, 2012. № 9 (101). С. 42–44.

Ипатов В. С., Кирикова Л. А. Фитоценология: учебник. СПб.: СПбГУ, 1997. 316 с.

Кнізє А.А., Рубцов В.Г. О взаимовлиянии пород в осушенных сосновых // Современные проблемы гидролесомелиорации. Л.: ЛенНИИЛХ, 1982. С. 84–87.

Кузнецов А.Н., Рубцов В.Г., Кнізє А.А. Формирование древостоев в связи с рубками и осушением. Л.: ЛенНИИЛХ, 1977. 54 с.

Мартынов А.Н., Сеннов С.Н., Грязькин А.В. Естественное возобновление леса. Текст лекций. СПб: ГЛТА, 1994. 43 с.

Маслов А.А., Баранов О.Ю., Сирин А.А. Идентификация видов берез в заболоченных лесах центра Русской равнины по результатам молекулярно-генетического анализа // Лесоведение. 2019. № 3. С. 177–187.

Матюшкин В.А. Изменение густоты и породного состава сосновых насаждений в связи с осушением // Гидротехническая мелиорация земель, ведение лесного хозяйства и вопросы экологии: тез. докл. науч.-техн. конф. СПб.: СПб НИИЛХ, 1997. С. 57–58.

Медведева В.М., Егорова Н.В., Антипин В.К. Биологический круговорот азота и зольных элементов в некоторых типах заболоченных лесов и болот // Стационарное изучение болот и болотных лесов в связи с мелиорацией. Петрозаводск, 1977. С. 106–147.

Мелентьева Н.В. Почвы осушенных лесных болот. Новосибирск: Наука, 1980. 126 с.

Мельников Е.С. Лесоводственные основы теории и практики комплексного ухода за лесом: автореф. дисс. ... д-ра с.-х. наук. СПб.: СПбГЛТА, 1999. 42 с.

Пономарева Т.И. Влияние лесоосушения на лесорастительные условия северо-таежного района Архангельской области: автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. Архангельск, 2022. 21 с.

Пьявченко Н.И. Об изучении болотных биогеоценозов // Основные принципы изучения болотных биогеоценозов. Л., 1972. С. 5–13.

Рубцов В.Г., Кнізє А.А. Ведение хозяйства в мелиорируемых лесах. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 118 с.

Рубцов В.Г., Кнізє А.А. Закладка и обработка пробных площадей в осушенных насаждениях. Методические рекомендации. Л.: ЛенНИИЛХ, 1977. 44 с.

Смирнов А.П. Оценка осушения верховых торфяно-болотных почв в таежной зоне. LAP LAMBERT Academic Publishing RU, 2019. 133 с.

Тимофеев А.Н. Роль ветровых и водных потоков в распространении семян бересклета повислого *Betula pendula* Roth, 1788 // Экосистемы. Вып. 33. 2023. С. 144–151.

## References

- Babikov B.V.* Hydrological regime of drained forest swamps, formed on heavy soils (on the example of the Gladkoye swamp of the Tosnensky district of the Leningrad region). *Meaning of swamps in biosphere*. M., 1980, pp. 81–95. (In Russ.)
- Grozin A.N.* Influence of drainage and selective felling in spruce-deciduous stands on the state and growth of spruce undergrowth in the Middle Urals. dis... Cand. Agricultural Sciences: 06.03.03. Ekaterinburg, 2003. 20 p. (In Russ.)
- Ipatov V.S., Kirikova L.A.* Phytoecology. Textbook. St. Petersburg: St. Petersburg State University Publ., 1997. 316 p. (In Russ.)
- Knize A.A., Rubtsov V.G.* On the Mutual Influence of Breeds in Drained Pine Trees. *Modern problems of forest hydromelioration*. L., 1982, pp. 84–87. (In Russ.)
- Kuznetsov A.N., Rubtsov V.G., Knize A.A.* Formation of stands in connection with felling and drainage. L.: LenNIIHL Publ., 1977. 54 p. (In Russ.)
- Martynov A.N., Sennov S.N., Gryazkin A.V.* Natural renewal of the forest. Text of lectures. St. Petersburg, GLTA Publ., 1994. 43 p. (In Russ.)
- Maslov A. A., Baranov O. Yu., Sirin A. A.* Identification of birch species in swampy forests of the center of the Russian Plain based on the results of molecular genetic analysis. *Lesovedenie*, 2019, no. 3, pp. 177–187. (In Russ.)
- Matyushkin V.A.* Changes in the density and breed composition of pine plantations in connection with drainage. *Hydrotechnical melioration of lands, forestry management and ecology questions*. Doc. sci.-tech. conf. St. Petersburg, 1997, pp. 57–58. (In Russ.)
- Medvedeva V.M., Egorova N.V., Antipin V.K.* Biological circulation of nitrogen and ash elements in some types of swampy forests and swamps. *Stationary study of swamps and swampy forests due to melioration*. Petrozavodsk, 1977, pp. 106–147. (In Russ.)
- Melentyeva N.V.* Soils of drained forest swamps. Novosibirsk: Nauka, 1980. 126 p. (In Russ.)
- Melnikov E.S.* Forestry foundations of theory and practice of complex care for the forest. ... dis... doc. agricultural sciences. St. Petersburg: SPbGLTA Publ., 1999. 42 p. (In Russ.)
- Ponomareva T.I.* Influence of forest drainage on forest vegetation conditions of the northern taiga district of the Arkhangelsk Region. Dis... cand. agricultural sciences. Arkhangelsk, 2022. 21 p. (In Russ.)
- Pyavchenko N.I.* On the study of swamp biogeocenoses. *Main principles of the swamp biogeocenoses study*. L., 1972, pp. 5–13. (In Russ.)
- Rubtsov V.G., Knize A.A.* Farming in reclaimed forests. M.: Lesn. prom-st, 1981. 118 p. (In Russ.)
- Rubtsov V.G., Knize A.A.* Laying and processing of sample plots in drained plantations. Guidelines. L.: LenNIIHL Publ., 1977. 44 p. (In Russ.)
- Smirnov A.P.* Assessment of drainage of raised peat-bog soils in the taiga zone. LAP LAMBERT Academic Publishing RU. 2019. 133 p. (In Russ.)

*Timofeev A.N. Role of wind and water streams in the distribution of seeds of the hanging birch Betula pendula Roth, 1788. Ecosystem, 2023, vol. 33, pp. 144–151. (In Russ.)*

*Zalesov S.V., Zalesova E.S., Tukacheva A.V. Consequences of prohod felling in the drained pine forest of the sedge-shrub. Agrarian Bulletin of the Urals, 2012, no. 9 (101), pp. 42–44. (In Russ.)*

*Материал поступил в редакцию 11.10.2023*

---

**Смирнов А.П., Смирнов А.А.** Естественное возобновление леса в осушаемых сосняках, пройденных комплексными рубками // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 249. С. 87–102. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.87-102

Опытные комплексные рубки проводились в разновозрастных сосняках в 1984 г., через 17 лет после устройства каналов на верховом торфянике. Удалась старовозрастная часть древостоя, в молодой части проводилось разреживание. В год проведения рубок подрост сосны имелся на всех участках в количестве 7–10 тыс. экз./га. В течение последующих 15 лет (к 1999 г.) количество подроста сосны уменьшилось до 0,2–3,3 тыс. экз./га. Еще через 15 лет (2014 г.) подрост сосны полностью перешел в отпад. По-видимому, основной причиной явилась усилившаяся конкуренция за свет и питательные вещества почвы со стороны интенсивно растущего древостоя. Подрост берёзы сформировался через 15 лет после рубок на всех участках в количестве 0,4–4 тыс. экз./га. Еще через 15 лет (2014 г.) густота берёзы на большинстве участков возросла до 2–5 тыс. экз./га, и к настоящему времени (2023 г.) это количество почти не изменилось. Тем самым подтверждается, что молодое поколение берёзы лучше адаптируется к новым условиям на осушаемых объектах по сравнению с сосной. Больше подроста берёзы у каналов, где лучше световой и питательный режим. Подрост ели в год проведения рубок встречался единично. К 1999 г. густота подроста ели на отдельных участках составляла 0,1–0,4 тыс. экз./га, и в дальнейшем почти не увеличивалась. Несмотря на крайне незначительное количество елового подроста и его неравномерное распределение по площади, за последние 15–25 лет практически отсутствует его отпад.

**Ключевые слова:** осушаемые сосняки на верховом торфянике, комплексные рубки, динамика естественного лесовозобновления.

**Smirnov A.P., Smirnov A.A.** Natural renewal of the forest in drained pine forests, passed by complex logging. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 249, pp. 87–102 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.87-102

Experimental complex felling was carried out in pine forests of different ages in 1984, 17 years after the construction of canals on the upland peat bog. The old-growth part of the stand was removed, and thinning was carried out in the young part. In the

year of felling, pine undergrowth was available in all areas in the amount of 7-10 thousand specimens per hectare. Over the next 15 years (by 1999) the amount of pine undergrowth decreased to 0.2-3.3 thousand ind. per hectare. Apparently, the main reason was the increased competition for light and soil nutrients from the intensively growing stand. Birch undergrowth was formed in 15 years after felling in all areas in the amount of 0.4-4 thousand specimens per hectare. After another 15 years (2014), the density of birch in most areas increased to 2-5 thousand ind./ha, and by now (2023) this amount has not changed much. Thus, it is confirmed that the young generation of birch is better adapted to new conditions on drained objects compared to pine. There is more birch undergrowth near the canals, where the light and nutritional regime is better. In the year of felling, spruce undergrowth was found sporadically. By 1999, the density of spruce undergrowth in some areas was 0.1-0.4 thousand specimens per hectare, and in the future it almost did not increase. Despite the extremely small amount of spruce undergrowth and its uneven distribution over the area, over the past 15-25 years there has been practically no loss of it.

**Keywords:** drained pine forests on the raised peat bog, complex felling, dynamics of natural reforestation.

---

**СМИРНОВ Александр Петрович** – профессор кафедры лесоводства Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор сельскохозяйственных наук. ORCID: 0000-0001-7720-216X, SPIN-код: 9945-4870.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: frontera12@gmail.com.

**SMIRNOV Alexander P.** – DSc (Agricultural), Professor, Department of Forestry, St.Petersburg State Forestry University. ORCID: 0000-0001-7720-216X, SPIN-code: 9945-4870.

194021. Institutskiy per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: frontera12@gmail.com

**СМИРНОВ Алексей Александрович** – доцент кафедры лесной тяксации, лесоустройства и геоинформационных систем Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат сельскохозяйственных наук.

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

**SMIRNOV Alexey A.** – PhD (Agricultural), Associate Professor of the Department of Forest Taxation, Forest Management and Geographic Information Systems, St.Petersburg State Forestry University.

194021. Institutskiy per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: filsmti@yandex.ru

**М.А. Николаева, Л.В. Орлова, А.В. Жигунов, С.А. Николаев,  
М.С. Беглецов**

**ОЦЕНКА РАЗВИТИЯ ЛИСТВЕННИЦЫ  
В ГЕОГРАФИЧЕСКИХ КУЛЬТУРАХ  
ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ**

*Введение.* Лиственница – одна из ценнейших лесообразующих пород России, быстрорастущая и высокопродуктивная, устойчивая к болезням, с высокими техническими характеристиками древесины. Произрастающая в разных экологико-климатических и эдафических условиях, она обладает высокой экологической пластичностью. Лиственнице свойственна способность легко гибридизироваться в природных условиях; в результате спонтанного переопыления наблюдается значительная изменчивость признаков и возникает генетическая нестабильность вида [Милютин, 2003; Ирошников, 2004; Багаев, 2015]. В то же время морфологические признаки генеративных органов являются определяющим средством для выявления дифференциации между видами и имеют большое таксономическое значение [Дылис, 1981; Ирошников, 2004]. Всё это создаёт предпосылки для изучения географической изменчивости и особенностей развития видов рода *Larix* Mill. в опытных географических культурах с целью дальнейшего внедрения перспективных климатипов в производственные посадки, в том числе за пределами ареала.

На северо-западе России, вне естественного ареала лиственницы, мировую известность имеет «Линдудловская роща», первым посадкам которой скоро исполнится 300 лет. В культурах 1743 г. посадки запас древесины лиственницы составлял более 1,5 тыс. м<sup>3</sup>/га [Тимофеев, 1961]. Одной из главных причин высокой продуктивности искусственно создаваемых лиственничных древостоев являются удачно подобранные условия местопроизрастания, причём наиболее хорошо развитые лиственницы находятся по краям участков и на крутых склонах оврагов [Редько, Мялкёнен, 2003].

К настоящему времени создана обширная база данных по географическим культурам лиственницы (ГКЛ) и накоплен немалый опыт по созданию лиственничных насаждений [Шутяев, 2011; Корешков, Царёва, 2021].

Проф. В. П. Тимофеев [1977] утверждал, что удалённость места заготовки семян лиственницы в направлении «запад-восток» не имеет большого значения. При культивировании лиственницы необходимо учитывать её вид, в пределах вида – географическое происхождение и наследственные особенности экотипов [Тимофеев, 1947; Шутяев, 2011]. В Западном Подмосковье высокую продуктивность показывают *Larix polonica* Racib., *L. decidua* Mill. f. *sudetica* и *L. kaempferi* (Lamb.) Carrière [Мерзленко и др., 2018], в условиях Центральной лесостепи – *L. sukaczewii* Dylis, syn. *L. archangelica* Laws., *L. decidua* Mill. из Прибалтики и *L. sibirica* Ledeb. из Хакасии [Галдина, 2018], в Башкирском Предуралье – *L. archangelica* башкирского происхождения, в первую очередь, из Хамитовского района, а также *L. sibirica* хакасско-сонского климатипа; большое значение имеет соответствие высот над уровнем моря в районах заготовок и использования семян [Николаева и др., 2019]. В Приморском крае преимущество имеют «океанические» виды *L. olgensis* A. Henry и *L. amurensis* Kolesn. ex Dylis [Усов, Попков, 2020]. В Красноярской лесостепи потомства горных климатипов *L. sibirica* с факторами стресса (дефицит увлажнения, бедность почв и др.) показывают замедленный темп роста [Кузьмин и др., 2021].

Изучение ГКЛ широко проводится в Швеции, Германии, Дании, Чехии, Словакии, Словении, Японии, Канаде, на Украине [Шутяев, 2011; Martinsson, 1995; Karlman et al., 2011]. В северной части Финляндии (Kiivalo) лучшая приживаемость отмечалась в культурах *L. sibirica* Ledeb. и *L. gmelinii*, syn. *L. dahurica* Laws. происхождением из России; лучший прирост в высоту – в потомстве *L. gmelinii* происхождением с севера Магаданской обл.; в южной части Финляндии (Punkaharju) превосходный рост по высоте имела *L. gmelinii* из южной части своего ареала [Lukkarinen et al., 2010]. В рамках международных проектов, ГКЛ, заложенные с использованием единого семенного материала, в том числе из 19 регионов России, известны в Норвегии, Китае, Исландии, Швеции, США, в нашей стране – в Коми и Архангельской обл. [Abaimov et al., 2002; Karlman and Martinsson, 2005].

Доказано, что отбор лучших климатипов может служить основой для организации лесосеменного дела на популяционном уровне [Шутяев, 2011]. Однако новое Лесосеменное районирование [Приказ МПР РФ от 2022 г.] не учитывает возможность создания лесных культур за пределами естественного распространения ареала лиственницы (согласно прежнему Лесосеменному районированию [1982] лиственница в Ленинградской обл. относилась к Ленинградскому лесосеменному району № 54и).

Цель исследований: оценка перспективности внедрения различных видов лиственницы в практику плантационного выращивания в Ленинградской обл.

*Объект и методика исследований.* Географические культуры лиственницы были заложены по программе Всесоюзной лесосеменной станции весной 1972 г. на территории Гостилицкого участкового лесничества Ломоносовского лесничества ( $59^{\circ}40'16''$  с.ш.  $29^{\circ}39'15''$  в.д.).

Высота над уровнем моря – 140 м. Сумма температур выше  $10^{\circ}\text{C}$  –  $1700$ – $1800$   $^{\circ}\text{C}$ . Среднегодовое количество осадков –  $632$ – $640$  мм.

Объект площадью 13 га создан на землях бывших сельхозугодий и представлен в 2-кратной повторности. Рельеф – слабо выраженный склон северной экспозиции, с небольшим понижением во второй повторности. Почвы дерново-карбонатные свежие. Тип условий произрастания –  $C_2$ . Обработка почвы – сплошная вспашка осенью 1970–1971 гг. З-отвальным плугом ПЛН-3-35 на глубину 25–30 см. Культуры были заложены семенными потомствами 23 климатипов. Посадка выполнялась 2-летними сеянцами под лопату, блоками; общее число блоков – 90. Площадь одного блока – 0,12 га; ширина междуурядий – 3–4 м, шаг посадки – 3 м. Между блоками вдоль и поперек устроены разрывы шириной 6 м.

Уходы проводили в год посадки и на следующий год. Через год после закладки опыта приживаемость культур в среднем по объекту составила 30%. В 1980 г. участок был дополнен елью (*Picea abies* (L.) H. Karst.) по посадочным местам выпавших саженцев лиственницы. В последующие 10 лет рубками ухода удаляли поросль лиственных и самосев хвойных пород. К 1999 г. погибли или были на грани усыхания потомства климатипов *Larix sibirica* происхождением из Республики Бурятия, Тыва, Чувашия, Якутия, из Забайкалья, Восточного Казахстана, Московской обл., и *L. dahurica* – из Бурятии и Магаданской обл. [Николаева и др., 2011].

В 2022 г. выполнена инвентаризация сохранившихся 14 потомств.

В культурах представлены виды лиственницы: европейская (*Larix decidua* Mill.), архангельская (*L. archangelica* Laws., syn. *L. sukaczewii* Dylis), сибирская (*L. sibirica* Ledeb.), даурская (*L. dahurica* Laws., syn. *L. gmelini* (Rupr.) Kuzen.), Комарова (*L. komarovii* Kolesn.), амурская (*L. amurensis* Kolesn. ex Dylis), камчатская (*L. kamtschatica* (Rupr.) Carriere, syn. *L. kuriensis* Mayr), принца Рупрехта (*L. principis-rupprechtii* Mayr) (табл. 1).

Латинские названия и авторы таксонов выверены по международным электронным базам данных Plants of the World (POWO) и IPNI.

Таблица 1

**Характеристика происхождений климатипов лиственницы, представленных в географических культурах Ломоносовского лесничества**

**Characteristics of the origins of larch climatypes represented in the provenance trials of the Lomonosov forestry**

| Количество учтенных блоков                                     | Происхождение материнского климатипа                                     |             |                    |                                  |                            |
|--|--|-------------|--------------------|----------------------------------|----------------------------|
|  | район заготовки шишек  | насаждение* | высота над у.м., м | $\sum t > 10^{\circ}\text{C}$ °C | $\sum$ годовых осадков, мм |
| <i>Larix decidua</i> Mill.                                     |  |             |                    |                                  |                            |
| 1  | Республика Латвия  | иск.        | 100–150            | 2100–2200                        | 620                        |
| <i>Larix archangelica</i> Laws.                                |  |             |                    |                                  |                            |
| 3  | Архангельская обл.,<br>Холмогорское леснич-во,<br>Ломоносовское уч. л-во | ест.        | $\leq 40$          | 1210                             | 600–650                    |
| <i>Larix archangelica</i> Laws. и <i>Larix sibirica</i> Ledeb. |  |             |                    |                                  |                            |
| 9  | Челябинская обл.   | ест.        | 100–500            | 1800–2000                        | 400–500                    |
| 2  | Владимирская обл.  | иск.        | $\sim 150$         | 2100–2200                        | 550                        |
| <i>Larix sibirica</i> Ledeb.                                   |  |             |                    |                                  |                            |
| 3  | Республика Башкортостан  | ест.        | 400–800            | 1900–2300                        | 450–600                    |
| 6  | Иркутская обл.   | ест.        | 400–800            | 1200–1600                        | 400–500                    |
| 3  | Республика Алтай   | ест.        | 300–1000           | 1600–2000                        | 200–600                    |
| 3  | Красноярский край  | ест.        | 300–1000           | 800–1800                         | 350–450                    |
| <i>Larix dahurica</i> Laws.                                    |  |             |                    |                                  |                            |
| 4  | Читинская обл.   | ест.        | 500–900            | 1000–1700                        | 300–800                    |
| <i>Larix komarovii</i> Kolesn.                                 |  |             |                    |                                  |                            |
| 3  | Хабаровский край   | ест.        | 200–1000           | 800–1500                         | 500–700                    |
| <i>Larix amurensis</i> Kolesn. ex Dylis                        |  |             |                    |                                  |                            |
| 3  | Амурская обл.,<br>Зейский заповедник                                     | ест.        | 400–1000           | 1420–1500                        | 560–580                    |
| <i>Larix kamtschatica</i> (Rupr.) Carriere                     |  |             |                    |                                  |                            |
| 3  | Сахалинская обл., южная<br>часть (далее – ю)                             | ест.        | 50–400             | 1300–1700                        | 800–1000                   |
| <i>Larix principis-rupprechtii</i> Mayr                        |  |             |                    |                                  |                            |
| 3  | Амурская обл., Нюкка   | ест.        | 600–700            | 1300–1500                        | 500–600                    |
| 1  | Сахалинская обл., север-<br>ная часть (далее – с)                        | иск.        | 50–150             | 800–1600                         | 600–800                    |

Примечание: \* – происхождение насаждения: иск. – лесные культуры, ест. – насаждение естественного происхождения; климатические данные и высота над уровнем моря приведены ориентировочно, на основании «Атласа России» [2008], Лесосеменного районирования [1982], с учётом сведений о происхождении климатипов из статей [Кузьмин и др., 2021; Пак, 2021].

До проведения полевых работ в 2022 г. дальневосточные потомства происхождением из Хабаровского края, Амурской и южной части Сахалинской обл. были причислены либо к *Larix sibirica*, либо к *L. dahurica*. Поэтому, для уточнения видового статуса и изучения генеративных особенностей лиственницы, в октябре 2023 г. впервые были собраны зрелые шишки в потомствах 10 климатипов. Шишки собирали в опаде и с нижних веток, иногда с веткой, в количестве 3–15 шт. на вариант; в блоке, представленном *L. principis-rupprechtii* происхождением из Сахалинской обл. – в количестве 50 шт. Морфологический анализ шишек выполнен на основании определения формы, опушения, размеров (в средней части) зрелых шишек и семенных чешуй, степени выпуклости и формы верхнего края семенной чешуи, числа семенных чешуй и числа паразитов в шишке. При определении таксонов использованы 3d-изображения зрелых шишек [Галерея трехмерных...].

В 50-летних культурах (биологический возраст – 52 года), в пределах указанных вариантов, выполнен очередной сплошной перечёт всех живых и сухостойных деревьев. Анализ сохранности, роста, состояния, продуктивности потомств осуществлялся в зависимости от видовой принадлежности лиственницы и географического положения районов заготовки семян и района закладки культур.

Сохранность по потомству, выраженная в процентах, установлена как отношение числа живых деревьев к фактическому числу посадочных мест. На основании оценки комплекса визуальных признаков (густота и ажурность кроны, степень усыхания ветвей, качество ствола) выполнено детальное обследование культур; определена категория состояния каждого дерева и средневзвешенный балл *R* по каждому из потомств [Воронцов и др., 1991]. У всех живых деревьев на высоте 1,3 м замерен диаметр стволов с точностью до 1,0 см. Оценка уровня изменчивости диаметров дана по шкале С.А. Мамаева [1970]. Высота замерена высотомером *Suunto* с точностью до  $\pm 0,1$  м, пропорционально числу деревьев по ступеням толщины, в количестве 15 шт.; в вариантах с меньшим числом лиственниц замерены все высоты. На основании средних значений диаметров  $D_{1,3}$  и высот, с применением таблиц проф. Н.В. Третьякова [1952], по каждому варианту (потомству) определен средний объём ствola одного дерева, площадь сечения стволов и запас стволовой древесины в пересчёте на 1 га. Класс бонитета по потомству определён по шкале проф. М.М. Орлова. Ранговое положение потомств определено с учётом параметров их роста, сохранности и продуктивности.

Результаты исследований обработаны с помощью программы Excel 97–2003, с применением методов вариационной статистики [Бондаренко, Жигунов, 2016]. Значимость коэффициента корреляции определена по *t*-критерию Стьюдента.

*Результаты исследований и обсуждение.* Видовой состав лиственниц, представленных на данном объекте, довольно разнообразен. Так, согласно системе Е.Г. Боброва [1972], представленные виды относятся к разным видовым рядам (*Larix sibirica* и *L. archangelica* – к сер. *Eurasiatricae* Sukacz., *L. dahurica* и *L. principis-rupprechii* – к сер. *Paucisquamatae* Sukacz., *L. komarovii* входит в ряд *Olgensiformes* Kolesn., *L. amurensis* и *L. kamtschatica* – *Kaempferiana*). Соответственно, они обладают различными ареалами распространения, разной морфологией генеративных органов, по-разному реагируют на интродукцию за пределы ареала.

Высокой урожайностью шишек характеризуется только сахалинское потомство *Larix principis-rupprechii*. Среднюю урожайность имели челябинское, владимирское, иркутское и южно- сахалинское потомства; в башкирском, читинском, хабаровском и в амурских потомствах урожай шишек был слабый или очень слабый. Описание морфологических характеристик шишек, на основании которого уточнена видовая принадлежность лиственниц, соответствует более ранним опубликованным данным [Орлова 2012; Орлова, 2021].

Установлено, что потомства происхождением из Челябинской и Владимирской обл. представлены двумя видами – *L. archangelica* Laws. и *L. sibirica* Ledeb., и их гибридными формами. Шишки продолговатой или широкояйцевидной формы, размером 22–35 мм длиной (далее дл.), 19–25 мм толщиной (далее толщ.), с числом семенных чешуй 20–28, 4–5 рядов паразтих. *L. archangelica* отличается от типичной *L. sibirica* более широкими (13–18 мм шир.), толстыми, отчетливо ложковидными, широкоза-круглёнными семенными чешуями, загнутыми внутрь по верхнему краю, при основании шишки – гораздо более крупными, чем остальные чешуи. Семенные чешуи шишек *L. sibirica*, в том числе башкирского и иркутского происхождений, 11–14 мм шир., прямые или неясно ложковидные, по верхнему краю закруглённые, примерно одного размера, у старых шишек часто растрескавшиеся.

Шишки *L. dahurica* Laws. читинского климатипа отличаются от шишек *L. archangelica* и *L. sibirica* иной формой – цилиндрической или ширококилиндрической, – более мелкими размерами (18–21 мм дл. и 0,8–13 мм толщ.), меньшим числом семенных чешуй (10–16) и паразтих

(3–5 рядов). Семенные чешуи не сильно раскрывающиеся, отклонённые от оси шишки под небольшим углом, 5–8 мм дл. и 4–7 мм шир., зауженные кверху, по верхнему краю усечённые или слегка выемчатые, по спинке прямые.

Самое большое в России разнообразие видов и форм рода *Larix* наблюдается на Российском Дальнем Востоке, что осложняет их видовое описание [Адрианова и др., 2015].

Шишки *L. amurensis* Kolesn. ex Dylis, происхождением из Амурской обл., мельче, чем у *L. dahurica*, размером 12–17 мм дл., шаровидные или яйцевидно-шаровидные, с сильно раскрывающимися, зауженными кверху семенными чешуями, ложковидными по спинке, усечёнными и слегка выемчатыми по верхнему краю.

Ареал *L. komarovii* Kolesn. приурочен к восточному мегасклону Сихотэ-Алиня, между Тернейским и Шкотовским районами Приморского края. Одно из самых северных зарегистрированных мест произрастания находится в Хабаровском крае, в низовьях реки Амур, в окрестностях пос. Б. Санники [Егоров и др., 2019]. Шишки широкояйцевидные или шаровидные, 1,8–2,1 см дл. и толщ., рыхлые. Семенные чешуи очень слабо опушённые, по верхнему краю часто волнистые, прилегают к оси шишки под углом 45–60°.

Родина *Larix kamtschatica* (Rupr.) Carrière – южный Сахалин и российские Курильские острова. Автор вида (Ф. Рупрехт) указывает на отличительные от лиственницы японской (*Abies leptolepis*, syn. *Larix kaempferi* (Lamb.) Carr.) признаки: более мелкие шишки, иная форма семенных чешуй. Шишки южно-сахалинского климатипа широко раскрыты, почти шаровидные, 16–20 мм дл. и толщ., число семенных чешуй – 14–26, в 4–5 рядах парастих; семенные чешуи 9–12 мм дл. и 8–9 мм шир., со слабо выемчатым, закруглённым или усечённым, иногда немного наружу отогнутым верхним краем, по спинке немного выпуклые, голые.

*Larix principis-rupprechtii* Mayr естественно произрастает в Северном Китае (провинции Шаньси, Чжили и Жэхэ), причём встречается в природе нечасто [Бобров, 1972]. В «World Checklist and Bibliography of Conifers» [Farjon, 2001] принят в ранге разновидности как *L. dahurica* var. *principis-rupprechtii* (Mayr) Rehder & E.H.Wilson, в международной базе Plants of the World Online (POWO) – как *L. gmelinii* var. *principis-rupprechtii* (Mayr) Pilger. Е.Г. Бобров [1972] рассматривает *L. principis-rupprechtii* Mayr как самостоятельный вид с определенно очерченным ареалом и особой морфологией шишек. Нельзя не отметить факт, что бли-

жайшие местонахождения *L. dahurica* находятся на расстоянии 1000 км к северу, а западная граница распространения *L. olgensis* лежит восточнее на 600–800 км. Шишки *L. principis-rupprechtii* в потомстве северо- сахалинского климатипа продолговато-цилиндрические, крупные (20–28 мм дл., 20–25 мм толщ.) с большим числом чешуй (28–44) в 5–7 рядах парастих; семенные чешуи сильно отклонённые, 10–13 мм дл. и 8–12 мм шир. (рис. 1).



Рис. 1. Шишки дальневосточных видов рода *Larix* в географических культурах Ломоносовского лесничества (слева направо): *L. dahurica* (читинское потомство), *L. amurensis* (амурское-зейское), *L. kamtschatica* (южно-сахалинское), *L. komarovii* (хабаровское), *L. principis-rupprechtii* (северо-сахалинское)

Fig. 1. Cones of Far Eastern species of the genus *Larix* in the provenance trials of the Lomonosov forestry (from left to right): *L. dahurica* (Chita progeny), *L. amurensis* (Amur-Zeyskoe), *L. kamtschatica* (South-Sakhalin), *L. komarovii* (Khabarovsk), *L. principis-rupprechtii* (North-Sakhalin)

*Сохранность, состояние и рост потомств.* Учитывая данные предыдущих исследований [Николаева и др., 2011], известно, что в 5-летних культурах (1977 г.), в которых изначально было представлено 23 варианта, средняя сохранность по объекту составляла 22%, причём высокой сохранностью (38–49%) отличались потомства происхождением из Читинской обл. (*Larix dahurica*) и с Дальнего Востока (*L. principis-rupprechtii*). Сохранность в пределах 26–35% наблюдалась у *L. sibirica* и *L. archangelica* происхождением из Архангельской, Владимирской, Челябинской и Иркутской обл., из Башкирии и Красноярского края, *L. komarovii* – из Хабаровского края и *L. amurensis* – из Амурской обл.; потомства *L. decidua* латвийского, *L. sibirica* алтайского и *L. kamtschatica* сахалинского климатипов имели сохранность не более 21% (рис. 2).

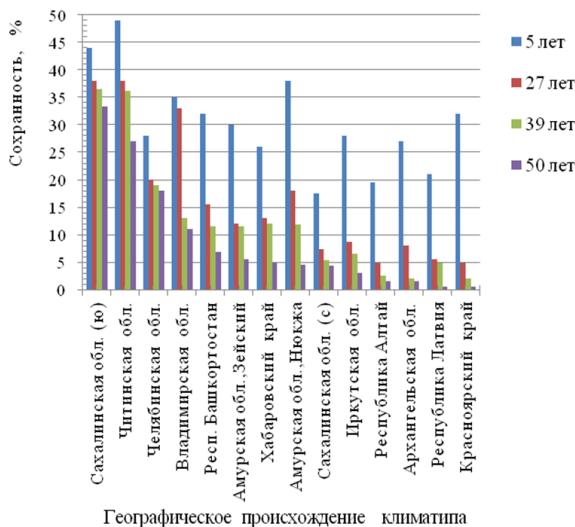


Рис. 2. Динамика сохранности потомств лиственницы

Fig. 2. Dynamics of preservation of larch progeny

К 5–10-летнему возрасту культур сохранность практически стабилизировалась только в северо-сахалинском, читинском, владимирском и челябинском потомствах. В возрасте жердняка сохранность, в зависимости от варианта, варьировала в значительных пределах: от 4,8% до 38% (учёт 1999 г.) и от 2 до 36,5% (учёт 2010 г.). К 38–40-летнему возрасту культур сохранность более 30% наблюдалась только у северо-сахалинского и читинского потомства.

В культурах, достигших 50-летнего возраста, только в четырех потомствах (северо-сахалинское, читинское, челябинское и владимирское) сохранность выше 10%, причём северо-сахалинское и читинское на протяжении всего периода развития сохраняют позиции лучших. В потомствах латвийского (*Larix decidua*) и красноярского (*L. sibirica*) происхождений отмечены единичные живые особи. Оставшиеся варианты имеют сохранность менее 7%.

На основании рекогносцировочного обследования культур установлено, что большинство потомств (архангельское, владимирское, башкирское, иркутское, алтайское, хабаровское, южно-сахалинское, читинское, амурские), представленных в количестве, не превышающем 28 живых особей, характеризуются сильно ослабленным состоянием (табл. 2).

Таблица 2

## Распределение потомств лиственницы по категориям состояния

## Distribution of larch offspring by condition category

| Район заготовки шишек  | Кол-во деревьев (1–5 кат.), шт. | Категория состояния |             |                    |           |          |         | Ср.-взвеш. балл R |
|--|---------------------------------|---------------------|-------------|--------------------|-----------|----------|---------|-------------------|
|  |                                 | здоровые            | ослабленные | сильно ослабленные | усыхающие | сухостой | текущий |                   |
| <i>Larix archangelica</i> Laws.                                |                                 |                     |             |                    |           |          |         |                   |
| Архангельская обл.   | 7                               | –                   | 2           | 2                  | 2         | 1        | 8       | 3,29              |
| <i>Larix archangelica</i> Laws. и <i>Larix sibirica</i> Ledeb. |                                 |                     |             |                    |           |          |         |                   |
| Челябинская обл.   | 215                             | 87                  | 67          | 36                 | 14        | 11       | 23      | 2,04              |
| Владимирская обл.  | 32                              | 6                   | 4           | 12                 | 6         | 4        | 14      | 2,94              |
| <i>Larix sibirica</i> Ledeb.                                   |                                 |                     |             |                    |           |          |         |                   |
| Респ. Башкортостан   | 28                              | 5                   | 8           | 8                  | 5         | 2        | 23      | 2,68              |
| Иркутская обл.   | 27                              | 2                   | 10          | 11                 | 1         | 3        | 37      | 2,74              |
| Респ. Алтай  | 7                               | –                   | 4           | 2                  | –         | 1        | 8       | 2,71              |
| <i>Larix dahurica</i> Laws.                                    |                                 |                     |             |                    |           |          |         |                   |
| Читинская обл.   | 143                             | 19                  | 57          | 45                 | 15        | 7        | 64      | 2,54              |
| <i>Larix komarovii</i> Kolesn.                                 |                                 |                     |             |                    |           |          |         |                   |
| Хабаровский край   | 12                              | 1                   | 3           | 6                  | 2         | –        | 18      | 2,75              |
| <i>Larix amurensis</i> Kolesn. ex Dylis                        |                                 |                     |             |                    |           |          |         |                   |
| Амурская о., Зейский   | 23                              | 1                   | 8           | 8                  | 4         | 2        | 36      | 2,91              |
| <i>Larix kamtschatica</i> (Rupr.) Carriere                     |                                 |                     |             |                    |           |          |         |                   |
| Сахалинская обл. (ю)   | 21                              | 2                   | 7           | 9                  | –         | 3        | 18      | 2,76              |
| <i>Larix principis-rupprechtii</i> Mayr                        |                                 |                     |             |                    |           |          |         |                   |
| Амурская о., Нюкжа   | 23                              | 1                   | 8           | 5                  | 3         | 6        | 16      | 3,22              |
| Сахалинская обл. (с)   | 42                              | 16                  | 16          | 10                 | –         | –        | 7       | 1,86              |

Последняя особь *L. decidua* на данный момент не имеет повреждений; единственная лиственница (*L. sibirica*) красноярского климатипа – на грани усыхания. Северо-сахалинское и челябинское потомства, напротив, наиболее устойчивы и на 75–76% представлены здоровыми или незначительно угнетенными особями. Однако северо-сахалинские лиственницы зачастую имеют многовершинность или двустольность.

Наиболее часто встречающийся порок – ажурность кроны (без признаков пожелтения хвои в период обследования), реже – многовершинность, многоствольность и кривизна ствола. Многовершинность связана как с механическими повреждениями (в результате ветро- или снеголома), так и с индивидуальными особенностями формирования кроны. Образование нескольких стволов, формирующихся на высотах 0,5–1,5 м от уровня земли, объясняется обмерзанием верхушечной почки и центрального побега в раннем возрасте, что может привести к искривлению и наклону стволов в более старшем возрасте. Кривизна стволов, чаще выраженная саблевидной формой, отмечалась во всех вариантах (за исключением владимирского), с максимальной долей участия (17–24%) в сахалинских потомствах. Пасынок – редко, до 4% в читинском потомстве; морозобойна и сухобокость – единично, в иркутском и хабаровском потомствах. Раковые поражения стволов встречались тоже единично, в иркутском – одно, в читинском – три дерева. Есть вероятность, что это ступенчатый рак, вызываемый грибом *Lachnellula* P. Karst. Гриб *Lachnellula* поражает лиственницу возрастом до 20–25 лет; распространяется исключительно аскоспорами, попадая на стволовую рану (через повреждение морозом, животными и т. п.), прорастая и заражая живые ткани дерева; в результате этого заражения часть особей могла выпасть ко времени текущих исследований.

Прослежена достоверная связь между сохранностью и состоянием потомств ( $r = -0,56 \pm 0,182$ ,  $t_{\text{факт}} = 3,09$ , при уровне значимости  $p = 0,01$   $t_{\text{табл}} = 2,78$ ): чем выше сохранность, тем ниже доля участия сильно ослабленных и усыхающих деревьев; лучшее состояние лиственницы соответствует более успешному её росту ( $r = -0,50 \div -0,60$ ,  $t_{\text{факт}} = 2,49 \div 3,51$ , при  $p = 0,05$   $t_{\text{табл}} = 2,06$ ).

Первый раз оценка роста культур выполнялась в 39-летних культурах; выделялись потомства, имевшие лучшую сохранность [Николаева, 2011], но связь между сохранностью и ростом прослеживалась слабая. Текущие исследования (культурам 50 лет) достоверно свидетельствуют об усилении связи между этими показателями, особенно с ростом по высоте ( $r = 0,67 \pm 0,147$ ,  $t_{\text{факт}} = 4,56$ , при  $p = 0,001$   $t_{\text{табл}} = 3,71$ ). Самый преуспевающий рост наблюдается в потомствах *Larix principis-rupprechtii* и *L. kamtschatica* происхождением с северной части о-ва Сахалин (табл. 3).

Северо-сахалинское потомство достоверно опережает по диаметру большинство вариантов ( $t_{\text{факт}} = 3,84 \div 8,08$  при  $p = 0,001$  и  $t_{\text{табл}} = 3,45 \div 3,46$ ), но челябинское потомство при  $p = 0,05$  ему не уступает.

Таблица 3

**Таксационная характеристика потомства лиственницы  
в 50-летних географических культурах**

**Taxation characterization of larch progeny in 50-year provenance trials**

| Район заготовки<br>шишек                                       | Средние параметры роста |                                  |                        | Площадь<br>сечения<br>стволов<br>S, м <sup>2</sup> /га | Объём<br>ствола<br>V, м <sup>3</sup> | Бони-<br>тет |  |  |  |
|--|-------------------------|----------------------------------|------------------------|--|--------------------------------------|--------------|--|--|--|
|  | диаметр                 |                                  | высота H, м<br>min–max |  |                                      |              |  |  |  |
|  | N, шт.                  | D <sub>1,3</sub> , см<br>min–max |                        |  |                                      |              |  |  |  |
| <i>Larix decidua</i> Mill.                                     |                         |                                  |                        |  |                                      |              |  |  |  |
| Респ. Латвия   | 1                       | 29,0*                            | 20,7                   | –  | 0,640                                | –            |  |  |  |
| <i>Larix archangelica</i> Laws.                                |                         |                                  |                        |  |                                      |              |  |  |  |
| Архангельская обл.,<br>Холмогорское л-во                       | 6                       | 28,33*<br>19–29                  | 18,9<br>14,0–23,2      | 1,05   | 0,560                                | I            |  |  |  |
| <i>Larix archangelica</i> Laws. и <i>Larix sibirica</i> Ledeb. |                         |                                  |                        |  |                                      |              |  |  |  |
| Челябинская обл.   | 204                     | 31,39 ± 0,53<br>14–54            | 22,6<br>13,9–26,5      | 14,63  | 0,808                                | Ia           |  |  |  |
| Владимирская обл.  | 28                      | 27,96 ± 1,06<br>18–35            | 20,5<br>16,9 – 22,5    | 7,21   | 0,591                                | I            |  |  |  |
| <i>Larix sibirica</i> Ledeb.                                   |                         |                                  |                        |  |                                      |              |  |  |  |
| Респ. Башкортостан   | 26                      | 27,71 ± 1,18<br>20–48            | 20,0<br>17,0 – 25,0    | 4,35   | 0,566                                | I            |  |  |  |
| Иркутская обл.   | 24                      | 28,96 ± 0,88<br>22–36            | 21,5<br>19,0 – 24,5    | 2,19   | 0,663                                | Ia           |  |  |  |
| Респ. Алтай  | 6                       | 28,67*<br>23–35                  | 19,2<br>17,5–21,6      | 1,11   | 0,582                                | I            |  |  |  |
| Красноярский край  | 1                       | 28,00*                           | 20,8                   | –  | 0,599                                | –            |  |  |  |
| <i>Larix dahurica</i> Laws.                                    |                         |                                  |                        |  |                                      |              |  |  |  |
| Читинская обл.   | 136                     | 24,10 ± 0,53<br>14–39            | 20,5<br>13,5–26,0      | 12,94  | 0,449                                | I            |  |  |  |
| <i>Larix komarovii</i> Kolesn.                                 |                         |                                  |                        |  |                                      |              |  |  |  |
| Хабаровский край   | 12                      | 22,58*<br>14–40                  | 17,8<br>11,0–22,5      | 1,33   | 0,349                                | II           |  |  |  |
| <i>Larix amurensis</i> Kolesn. ex Dylis                        |                         |                                  |                        |  |                                      |              |  |  |  |
| Амурская обл., Зей-<br>ский заповедник                         | 21                      | 24,62 ± 0,88<br>18–33            | 18,2<br>14,0–21,5      | 2,76   | 0,417                                | I            |  |  |  |
| <i>Larix kamtschatica</i> (Rupr.) Carriere                     |                         |                                  |                        |  |                                      |              |  |  |  |
| Сахалинская обл. (ю)   | 18                      | 32,56*<br>17–48                  | 21,1<br>18,0–24,5      | 4,16   | 0,812                                | Ia           |  |  |  |
| <i>Larix principis-rupprechtii</i> Mayr                        |                         |                                  |                        |  |                                      |              |  |  |  |
| Амурская обл., Нюокжа  | 17                      | 25,16*<br>16 – 33                | 20,1<br>14,0–25,0      | 2,37   | 0,477                                | I            |  |  |  |
| Сахалинская обл. (с)   | 42                      | 34,64 ± 1,19<br>21–52            | 25,6<br>20,6–28,7      | 33,03  | 1,094                                | Ia           |  |  |  |

Примечание: \* ошибка среднего > 5%

Уровень изменчивости диаметров чаще повышенный – 21–27% (башкирское, читинское, челябинское, сахалинские), реже средний – 15–18% (иркутское, владимирское), за исключением хабаровского варианта, в котором при малом числе живых лиственниц вариабельность данного признака высокая, достигающая 38%.

В обоих сахалинских и челябинском потомствах более половины лиственниц имеют толщину стволов не менее 30 см; эти же варианты оцениваются максимальными средними значениями объёма ствола. Максимальные высоты (28,0–28,7 м) были замерены только в северо-сахалинском потомстве *L. principis-rupprechtii*. Среди успешно растущих потомств *L. sibirica* следует выделить иркутское и башкирское, которые по диаметру мало различимы, но лиственница происхождением из Иркутской обл. в данных условиях в среднем выше, чем лиственница из Башкирии. Потомство *L. dahurica* из Читинской обл. сохраняет замедленный темп роста по диаметру, что закреплено на наследственном уровне. Самые отстающие по росту и объёму стволов лиственницы отмечены в потомствах *L. komarovii* и *L. amurensis*.

В 50-летних культурах потомство климатипа *L. principis-rupprechtii* происходит из Сахалинской обл. обладает запасом стволовой древесины 352 м<sup>3</sup>/га и по всем параметрам является лидером. Сахалинские потомства – *L. principis-rupprechtii* и *L. kamtschatica* (последнее имеет V ранг), демонстрируют разную адаптационную способность к новым условиям произрастания, что зависит как от факторов происхождения, так и от проявления признаков генотипа. II ранг занимает потомство из Челябинской обл. (152 м<sup>3</sup>/га), III – из Читинской обл. (127 м<sup>3</sup>/га). Оставшиеся потомства имеют запас менее 69 м<sup>3</sup>/га.

*Larix sibirica* внутри своего ареала размещена очень неравномерно, заисляя прежде всего южную часть, представленную горными системами Алтая, Саян, прибайкальских хребтов [Дылис, 1981]. Сильно ослабленное состояние лиственницы в потомствах *L. sibirica* из Иркутской обл. (VI ранг), Башкирии (VI), Алтая (VIII), Красноярского края (IX), а также *L. amurensis* и *L. principis-rupprechtii* из Амурской обл. (VI), *L. komarovii* из Хабаровского края (VII) определяется их происхождением: высокогорные районы и районы с недостаточным количеством осадков и тепла.

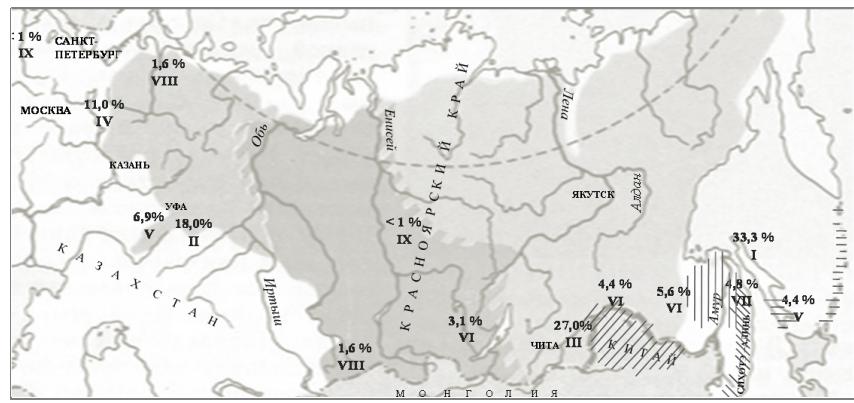
Полученные результаты соответствуют данным исследований на другом объекте ГКЛ Ленинградской обл., который был заложен в 1981 г. в Сиверском лесхозе. *L. dahurica* из Охотского лесхоза Хабаровского края к 20-летнему возрасту выпала полностью; очень низкая сохранность (1–3%) была у потомств *L. sibirica* из районов с высотами над у.м. 500–700 м, про-

исхождением из Учалинского и Белорецкого лесхозов Башкирии и из Каучугского лесхоза Иркутской обл. [Николаева и др., 2006].

Сильно ослабленное состояние *L. archangelica* в потомстве происхождением из Холмогорского лесничества Архангельской обл. (VIII ранг) является следствием местонахождения родительского климаттипа севернее 64° с.ш. и меньшей теплообеспеченности по сравнению с районом испытания; возможно, имеет значение меньшая высота над уровнем моря. Так, лиственница в Линдоловской роще на самых старых участках посадок тоже имеет архангельское происхождение, однако роща расположена на высоте 50 м над у.м. и 23 м над уровнем р. Рощинки, что соответствует высоте над у.м. в местах заготовки семян.

*L. decidua* теряет свою устойчивость (IX ранг) вследствие расположения блока с высаженными растениями на участке с понижением рельефа и, как следствие, ухудшением условий произрастания.

Опираясь на данные о местонахождении родительских климаттипов и учитывая их видовую принадлежность, на карте России показаны сохранность и ранговое положение исследованных потомств (рис. 3).



Ареалы распространения видов лиственницы  
Larch species distribution areas

— *Larix archangelica* Laws., — *L. sibirica* Ledeb., — *L. dahurica* Laws.,  
 //—— *L. principis-rupprechtii* Mayr., ||—— *L. amurensis* Kolesn. ex Dylis.,  
 \—— *L. komarovii* Kolesn., |||| — *L. kamtschatica* (Rupr.) Carriere

Рис. 3. Сохранность (%) и ранговое положение (I-VIII) потомств различных видов лиственницы в 50-летних географических культурах Ленинградской обл.

Fig. 3. Preservation (%) and rank position (I-VIII) of progeny of different larch species in 50-year provenance trials of Leningrad region

Видно, что потомства, испытываемые в ГКЛ Ломоносовского лесничества Ленинградской обл. (ЛО), представлены происхождениями от крайне западных до восточных границ России с различной видовой принадлежностью. Несмотря на низкую сохранность в целом по объекту, получен важный результат, подтверждающий утверждение проф. В.П. Тимофеева [1977], что удалённость мест заготовок от места испытания семян лиственницы в направлении «запад-восток» не влияет на успешность развития потомств в будущем. Переброски семян в направлении «север-юг» имеют значение в совокупности с факторами климата.

*Выводы.* На основании исследований ГКЛ, заложенных в 1972 г. в Ломоносовском лесничестве ЛО, установлено, что по всем параметрам лучшим вариантом, устойчивым к физико-климатическим условиям региона, является потомство лиственницы принца Рупрехта (*Larix principis-rupprechtii* Mayr) происхождением из северной части Сахалинской обл. II ранг занимает потомство из Челябинской обл., которое представлено двумя видами – лиственицей архангельской (*L. archangelica* Laws.) и л. сибирской (*L. sibirica* Ledeb.), и их гибридными формами; III ранг принадлежит л. даурской (*L. dahurica* Laws.) из Читинской обл.

Для успешного выращивания лиственницы в плантационных культурах ЛО следует учитывать следующие положения:

- фактор географического происхождения; разница по широте в районе происхождения родительского климатипа и районе использования семян с удалением на север не должна превышать  $4^{\circ}$ , на юг –  $6\text{--}8^{\circ}$ ; разница по долготе не имеет большого значения;
- высота над уровнем моря в местах заготовок семян должна приблизительно соответствовать высоте над у.м. в районе их использования (ЛО); с удалением мест заготовок на юг разница высот в районах происхождения и использования семян, вероятно, может составлять до 400–450 м;
- тепло- и влагообеспеченность в районе происхождения семян должны быть близки по норме району создания культур;
- гидрологический режим почв; почвы должны быть свежими, хорошо дренированными, без признаков переувлажнения или недостатка влаги;
- имеющийся опыт лесоразведения лиственницы в ЛО.

При создании смешанных культур лиственницы в качестве сопутствующей породы целесообразна посадка ели европейской; лиственница светолюбива, растёт быстрее, чем ель, и занимает I ярус, ель – во II ярусе; обе породы – интродуцент и абориген – в благоприятных условиях произрастания могут иметь высокую продуктивность.

Рекомендуемая густота посадки чистых или смешанных культур в условиях ЛО – 1,7–2,2 тыс. шт./га, с шагом посадки 1,5–2 м и шириной междуурядий 3 м. Впоследствии культуры лиственницы требуют проведения регулярных уходов.

*Сведения о финансировании исследования.* Работа выполнена в рамках государственного задания Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН по плановой теме № АААА-19-119031290052-1 «Сосудистые растения Евразии: систематика, флора, растительные ресурсы» и при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Соглашения № 075-15-2021-1056 от «28» сентября 2021 г.

*Конфликт интересов.* Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### **Библиографический список**

*Адрианова И.Ю., Реунова Г.Д., Журавлёв Ю.Н.* Лиственницы континентальной и островной части российского Дальнего Востока: генетическая изменчивость и взаимоотношения // Вестник ДВО РАН. 2015. №1. С. 21–27.

Атлас России / под ред. Г.В. Поздняка, Н.В. Смуровой. 2008. 304 с.

*Багаев С.С.* К изучению климатипов лиственницы в условиях Южно-таёжного района европейской части Российской Федерации // Лесохозяйственная информация. 2015. № 2. С. 35–45.

*Борбров Е.Г.* История и систематика лиственниц // Комаровские чтения XXV. Л., 1972. 96 с.

*Бондаренко А.С., Жигунов А.В.* Статистическая обработка материалов лесоводственных исследований: учеб. пособие. СПб.: Политех. ун-т, 2016. 125 с.

*Воронцов А.И., Мозолевская Е.Г., Соколова Э.С.* Технология защиты леса: учебник. М.: Экология, 1991. 304 с.

*Галдина Т.Е.* Особенности произрастания лиственницы в географических культурах Центральной лесостепи // Успехи современного естествознания. 2018. № 11-2. С. 235–240.

Галерея трехмерных изображений шишек некоторых видов голосеменных. URL: <http://3d.botdb.ru/gymnospermae/>

*Дыллас Н.В.* Лиственница. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 96 с.

*Егоров А.А., Орлова Л.В., Нешатаев В.Ю., Дурова А.С.* К распространению *Larix komarovii* Kolesn. на Дальнем Востоке // Инновации и традиции в современной ботанике: тез. докл. Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвящённой 150-летию со дня рождения В.Л. Комарова. Санкт-Петербург, 21–25 октября 2019 г. СПб.: БИН им. В.Л. Комарова РАН, 2019. С. 38.

*Ирошников А.И.* Лиственницы России. Биоразнообразие и селекция. М.: ВНИИЛМ, 2004. 182 с.

*Корешков Н.В., Царёва Е.А.* Географические культуры лиственницы. СПб.: Наукоёмкие технологии, 2021. 414 с.

Кузьмин С.Р., Рубцов А.В., Барченков А.П., Карпюк Т.В. Дифференциация климатипов лиственниц (*Larix* spp.) в географических культурах в лесостепи Средней Сибири // Вестник Томского ГУ. Биология. 2021. № 56. С. 170–188. DOI: 10.17223/19988591/56/8

Лесосеменное районирование основных лесообразующих пород в СССР. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 368 с.

Мамаев С.А. Закономерности внутривидовой изменчивости семейства *Pinaceae* на Урале: автореф. дисс. ... д-ра биол. наук. Свердловск: Институт экологии растений и животных Уральского ф-ла АН СССР, 1970. 54 с.

Мерзленко М.Д., Мельник П.Г., Коженкова А.А. Результаты выращивания климатипов лиственницы в географических культурах западного Подмосковья // Вестник Алтайского гос. аграрного ун-та. 2018. № 1 (159). С. 72–77.

Милютин Л.И. Биоразнообразие лиственниц России // Хвойные бореальной зоны. 2003. Т. 21. Вып. 1. С. 6–9.

Николаева М.А., Жигунов А.В., Пелевина Н.Н. Районирование семян хвойных пород как итог 30-летних исследований географических культур в Ленинградской области // Современные проблемы устойчивого управления лесами, инвентаризации и мониторинга лесов: Мат-лы междунар. научно-технич. конф. Санкт-Петербург, 29–30 ноября 2006 г. СПб.: СПбГЛТА, Севзаплеспроект, 2006. С. 276–284.

Николаева М.А., Орлова Л.В., Крестьянов А.А., Каматов Д.Н. Географическая изменчивость лиственницы в опытных лесных культурах Республики Башкортостан // Сибирский лесной журнал. 2019. № 1. С. 30–43. DOI: 10.15372/SJFS20190103

Николаева М.А., Ходачек А.С., Ямалеев О.А. Результаты долгосрочных испытаний географических культур лиственницы в Ленинградской области // Повышение продуктивности, рациональное использование и охрана земель лесного фонда: тр. СПбНИИЛХ. 2011. Вып. 2 (25). С. 191–197.

Орлова Л.В. Конспект дикорастущих и некоторых интродуцированных видов рода *Larix* Mill. (*Pinaceae*) флоры Восточной Европы // Новости систематики высших растений. 2012. Т. 43. С. 5–19.

Орлова Л.В. Отдел *Pinophyta*. Голосеменные // Атлас сосудистых растений Северо-запада европейской части России. Т. 1 / под ред. И.А. Сорокиной и Г.Ю. Конечной. 2021. С. 48–75.

Пак Л.Н. Оценка выживаемости и роста потомств лиственницы (*Larix*) разного географического происхождения в Восточном Забайкалье // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 2. С. 189–195. DOI: 10.25750/1995-4301-2021-2-189-195

Редько Г.И., Мялкёнен Э. Линдуловская лиственничная роща. Хельсинки: НИИ леса Финляндии, 2003. 90 с.

Тимофеев В.П. Лесные культуры лиственницы. М.: Лесн. пром-сть, 1977. 216 с.

- Тимофеев В.П. Лиственница в культуре. Л.: Гослестехиздат, 1947. 297 с.
- Тимофеев В.П. Роль лиственницы в поднятии продуктивности лесов. М.: Лесн. пром-сть, 1961. 160 с.
- Третьяков Н.В., Горский П.В., Самойлович Г.Г. Справочник таксатора: Таблицы для таксации леса. М.; Л.: Гослесбумиздат. 1952. 854 с.
- Усов В.Н., Попков Б.В. Рост различных видов лиственницы в опытных культурах на юге Приморского края // Хвойные бореальной зоны. 2020. Т. XXXVIII. № 3-4. С. 154–159.
- Шутяев А.М. Каким быть лесному семеноводству в XXI веке (Книга-обзор). Воронеж: Истоки, 2011. 248 с.
- Abaimov A.P., Barzut V.M., Berkutenko A.N., Buitink J., Martinsson O., Milyutin L.I., Polezhaev A., Putenikhin V.P., Takata R. Seed collection and seed quality of *Larix* ssp. from Russia: initial phase on the Russian-Scandinavian larch project // Eurasian Journal of Forest Research. 2002. No. 4. P. 39–49.
- Farjon A. World Checklist and Bibliography of Conifers. 2 ed. Kiew: The Royal Botanic Gardens, 2001. 309 p.
- Karlman L., Fries A., Martinsson O., Westin J. Juvenile growth of provenances and open pollinated families of four Russian larch species (*Larix* Mill.) in Swedish field tests // Silvae Genetica. 2011. Vol. 60, no. 5. P. 165–177. DOI: 10.1515/sg-2011-0023
- Karlman L., Martinsson O. Siberian larch family field trial survival and height three growing season after planting in Sweden // Status, monitoring and targets for breeding program Proceedings of the Meeting of Nordic Tree Breeders and Forest Geneticists, Syktyvkar, Komi Rep., Russia, Sept. 13–15, 2005. Syktyvkar, 2005. P. 17–23.
- Lukkarinen A.J., Ruotsalainen S., Nikkanen T., Peltola H. Survival, height growth and damages of Siberian (*Larix sibirica* Ledeb.) and Dahurian (*Larix gmelinii* Rupr.) Larch provenances in field trials located in Southern and Northern Finland // Silva Fennica. 2010. Vol. 44, no. 5. P. 727–746.
- Martinsson O. Systematics and differentiation in the genus *Larix* in Eurasia / Proposal for international research project. Larch genetics and breeding // Proceeding IUFRO working party S2.02-07. Umea, July 31 – August 4, 1995. No. 39. P. 93–98.
- Plants of the World Online. URL: <http://powo.science.kew.org>

## References

- Abaimov A.P., Barzut V.M., Berkutenko A.N., Buitink J., Martinsson O., Milyutin L.I., Polezhaev A., Putenikhin V.P., Takata R. Seed collection and seed quality of *Larix* ssp. from Russia: initial phase on the Russian-Scandinavian larch project. *Eurasian Journal of Forest Research*, 2002, no 4, pp. 39–49.
- Adrianova I. Yu., Reunova G.D., Zhuravlov Yu.N. Listvennitsy kontinental'noy i ostrovnoy chasti rossiyskogo Dal'nego Vostoka: geneticheskaya izmenchivost' i vzaimootnosheniya [Larches from mainland and islands of the Russian Far East: genetic variability and relationships]. *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya RAN* [Bulletin of the Far Eastern Branch of the RAS], 2015, no. 1, pp. 21–27. (In Russ.)

- Atlas Rossii / pod red. G.V. Pozdnyaka, N.V. Smurovoi, 2008. 304 p. (In Russ.)
- Bagaev S.S. K izucheniyu klimatipov listvennitsy v usloviyah Yuzhno-tayozhnogo rayona evropeyskoy chasti Rossiyskoy Federatsii [To the study of larch climatypes in the Southern taiga region of European part of Russia]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya [Forestry information]*, 2015, no. 2, pp. 35–45. (In Russ.)
- Bobrov E.G. Istorija i sistematika listvennits [History and taxonomy of larches]. *Komarovskie chteniya XXV*. L.: Nauka. Leningr. otdelenie. 1972. 96 p. (In Russ.)
- Bondarenko A.S., Zhigunov A.V. Statisticheskaya obrabotka materialov lesovedstvennyh issledovanij [Statistical processing of forestry research materials]. *Training manual*. SPb.: Polytech. University, 2016. 125 p. (In Russ.)
- Dylis N.V. Listvennitsa [Larch]. M.: Lesn. prom-st'. 1981. 96 p. (In Russ.)
- Egorov A.A., Orlova L.V., Neshataev V.Yu., Durova A.S. K rasprostraneniyu *Larix komarovii* Kolesn. na Dal'nem Vostoke [To the distribution *Larix komarovii* Kolesn. on the Far East]. Innovatsii i traditsii v sovremennoy botanike [Innovations and traditions in modern botany]: tezisy dokladov Vseross. nauchn. konf. s mezhdunar. uchastiyem, posvyashchennoy 150-letiyu so dnya rozhd. V.L. Komarova. Sankt-Peterburg, 21–25 okt. 2019 g. SPb.: BIN im. V.L. Komarova RAN, 2019. P. 38. (In Russ.)
- Farjon A. World Checklist and Bibliography of Conifers. 2 ed. Kew: The Royal Botan. Garden, 2001. 309 p.
- Galdina T.Ye. Osobennosti proizrastaniya listvennitsy v geograficheskikh kul'turah Tsentral'noy lesostepi [Peculiarities of larch growth in provenance trials of the Central forest-steppe]. Uspehi sovremennoogo yestestvoznaniya [Advances of modern natural science], 2018, no. 11-2, pp. 235–240. (In Russ.)
- Galereya trekhmernykh izobrazheniy shishek nekotorykh vidov golosemennykh. URL: <http://3d.botdb.ru/gymnospermae/> (In Russ.)
- Iroshnikov A.I. Listvennitsy Rossii. Bioraznoobrazie i selektsiya [Larches of Russia. Biodiversity and selection]. M.: VNILM. 2004. 182 p. (In Russ.)
- Karlman L., Fries A., Martinsson O., Westin J. Juvenile growth of provenances and open pollinated families of four Russian larch species (*Larix* Mill.) in Swedish field tests. *Silvae Genetica*, 2011, vol. 60, no. 5, pp. 165–177. DOI: 10.1515/sg-2011-0023
- Karlman L., Martinsson O. Siberian larch family field trial survival and height three growing season after planting in Sweden. *Status, monitoring and targets for breeding program Proceedings of the Meeting of Nordic Tree Breeders and Forest Geneticists*. Syktyvkar, Komi Rep., Russia, Sept. 13–15, 2005. Syktyvkar, 2005, pp. 17–23.
- Koreshkov N.V., Tsareva E.A. Geograficheskie kul'tury listvennitsy [Provenance trials of the larch]. SPb.: Naukoyomkiye tekhnologii. 2021. 414 p. (In Russ.)
- Kuzmin S.R., Rubtsov A.V., Barchenkov A.P., Karpyuk T.V. Differentsiatsiya klimatipov listvennits (*Larix* spp.) v geograficheskikh kul'turah v lesostepi Sredney Sibiri [Differentiation of larch (*Larix* spp.) climatypes in the Central Siberian forest-steppe provenance trials]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya [Tomsk State University Journal of Biology]*, 2021, no. 56, pp. 170–188. DOI: 10.17223/19988591/56/8. (In Russ.)

Lesosemennoe rayonirovanie osnovnyh lesobrazuyushchih porod v SSSR [Forest seed zoning of the main forest-forming species in the USSR]. M.: Lesn. promst', 1982. 368 p. (In Russ.)

Lukkarinen A.J., Ruotsalainen S., Nikkanen T., Peltola H. Survival, height growth and damages of Siberian (*Larix sibirica* Ledeb.) and Dahurian (*Larix gmelinii* Rupr.) Larch provenances in field trials located in Southern and Northern Finland. *Silva Fennica*, 2010, vol. 44, no. 5, pp. 727–746.

Mamaev S.A. Zakonomernosti vnutrividovoj izmenchivosti semejstva Pinaceae na Urale [Patterns of intraspecific variability of the family Pinaceae in the Urals]. DSc. (Biol.) dissertation. Sverdlovsk: Institute of Ecology of Plants and Animals UF AH SSSR. 1970. 54 p. (In Russ.)

Martinsson O. Systematics and differentiation in the genus *Larix* in Eurasia / Proposal for international research project. Larch genetics and breeding. *Proceeding IUFRO working party S2.02-07*. Umea, July 31 – August 4, 1995, no. 39, pp. 93–98.

Merzlenko M.D., Mel'nik P.G., Kozhenkova A.A. Rezul'taty vyrashchivaniya klimatipov listvennitsy v geograficheskikh kul'turah zapadnogo Podmoskov'ya [Results of growing larch climatypes in provenance trials of the western Moscow region]. *Vestnik Altayskogo gos. agrarnogo universiteta* [Bulletin of Altai State Agricultural University], 2018, no. 1 (159), pp. 72–77. (In Russ.)

Mil'yutin L.I. Bioraznoobraziye listvennits Rossii [Biodiversity of larches in Russia]. *Hvojnye boreal'noj zony* [Conifers of the boreal area], 2003, vol. 21, no. 1, pp. 6–9. (In Russ.)

Nikolaeva M.A., Hodachev A.S., Jamaleev O.A. Rezul'taty dolgosrochnyh ispytanij geograficheskikh kul'tur listvennitsy v Leningradskoj oblasti [The results of long-term studies of provenance trials of larch in the Leningrad region]. *Povysheniye produktivnosti, ratsional'noye ispol'zovaniye i okhrana zemel' lesnogo fonda: trudy Sankt-Peterburgskogo NII lesnogo hozyajstva* [Saint-Petersburg forestry research institute proceedings], 2011, vol. 2 (25), pp. 191–197. (In Russ.)

Nikolaeva M.A., Orlova L.V., Krest'yanov A.A., Kamatov D.N. Geograficheskaya izmenchivost' listvennitsy v optynyh lesnyh kul'turah Respubliki Bashkortostan [Geographical variability of larch in the experimental forest crops of the Republic of Bashkortostan]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian journal of forest science], 2019, no. 1, pp. 30–43. DOI: 10.15372/SJFS20190103. (In Russ.)

Nikolaeva M.A., Zhigunov A.V., Pelevina N.N. Rayonirovaniye semyan hvoynyh porod kak itog 30-letnih issledovaniy geograficheskikh kul'tur v Leningradskoy oblasti [Zoning of coniferous seeds as a result of 30 years of research of provenance trials in the Leningrad region]. *Sovremennye problemy ustoychivogo upravleniya lesami, inventarizatsii i monitoringa lesov* [Modern problems of sustainable forest management, inventory and monitoring of forests]: mater. mezhdunar. nauch.-tehnich. konf. Sankt-Peterburg, 29–30 noyabrya 2006 g. SPb.: SPbGLTA, Sevzaplesproekt. 2006, pp. 276–284. (In Russ.)

Orlova L.V. Konspekt dikorastushchih i nekotoryh introdutsirovannyh vidov roda *Larix* Mill. (Pinaceae) flory Vostochnoy Evropy [The synopsis of wild and some introduced species of the genus *Larix* Mill. (Pinaceae) in the flora of the East Europe]. *Novosti sistematiki vysshih rasteniy* [Novitates Systematicae Plantarum Vascularium], 2012, vol. 43, pp. 5–19. DOI: <https://doi.org/10.31111/novitates/2012.43.5>. (In Russ.)

Orlova L.V. Otdel Pinophyta. Golosemennyye [Division Pinophyta. Gymnosperms]. *Atlas of vascular plants of the North-West of the European part of Russia*. T. 1. Ed. I.A. Sorokina and G.Yu. Konechnaya. 2021, pp. 48–75. (In Russ.)

Pak L.N. Otsenka vyzhivaemosti i rosta potomstv listvennitsy (*Larix*) raznogo geograficheskogo proishozhdeniya v Vostochnom Zabaykal'ye [Evaluation of survival and growth of larch (*Larix*) progeny of different geographical origin in Eastern Transbaikalia]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* [Theoretical and applied ecology], 2021, no. 2, pp. 189–195. DOI: 10.25750/1995-4301-2021-2-189-195. (In Russ.)

Plants of the World Online. URL: <http://powo.science.kew.org>

Red'ko G.I., Mälkönen E. Lindulovskaya listvennichnaya roshcha [Lindulovskaya larch grove]. Helsinki: Finnish Forest Research Institute. 2003. 90 p. (In Russ.)

Shutyayev A.M. Kakim byt' lesnomu semenovodstvu v XXI veke (Kniga-obzor) [What is forest seed production in the XXI century (Book-survey)]. Voronezh: Istoki, 2011. 248 p. (In Russ.)

Timofeev V.P. Lesnye kul'tury listvennitsy [Forest cultures of larch]. M.: Lesn. prom-st'. 1977. 216 p. (In Russ.)

Timofeev V.P. Listvennitsa v kul'ture [Larch in cultivation]. L.: Goslestezhizdat. 1947. 297 p. (In Russ.)

Timofeev V.P. Rol' listvennitsy v podnyatii produktivnosti lesov [The role of larch in increasing forest productivity]. M.: Lesn. prom-st'. 1961. 160 p. (In Russ.)

Tret'yakov N.V., Gorskiy P.V., Samoylovich G.G. Spravochnik taksatora: Tablitsy dlya taksatsii lesa. [Taxator Reference Table]. M.; L.: Goslesbumizdat. 1952. 854 p. (In Russ.)

Usov V.N., Popkov B.V. Rost razlichnyh vidov listvennitsy v opytnyh kul'turah na yuge Primorskogo kraya [Growth of different species of larch in experienced cultures in the south of Primorsky region]. *Hvojnye boreal'noj zony* [Conifers of the boreal area], 2020, vol. XXXVIII, no. 3-4, pp. 154–159. (In Russ.)

Vorontsov A.I., Mozolevskaya E.G., Sokolova E.S. Tekhnologiya zashchity lesa [Forest protection technology]. Manual. M.: Ecology. 1991. 304 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 12.04.2024

---

Николаева М.А., Орлова Л.В., Жигунов А.В., Николаев С.А.,  
Беглецов М.С. Оценка развития лиственницы в географических культурах  
Ленинградской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической  
академии. 2024. Вып. 249. С. 103-126. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.103-126

Представлены результаты 50-летних испытаний различных видов лиственницы в географических культурах Ломоносовского лесничества Ленинградской области. На объекте к настоящему времени сохранились семенные потомства 14 климатипов со следующей видовой принадлежностью: *Larix decidua* Mill., *L. archangelica* Laws., *L. sibirica* Ledeb., *L. dahurica* Laws., *L. amurensis* Kolesn. ex Dylis, *L. kamtschatica* (Rupr.) Carriere, *L. komarovii* Kolesn. и *L. principis-rupprechtii* Mayr. Выполнена оценка сохранности, состояния, роста потомств, и отмечены их генеративные особенности. На основании полученных данных сделан вывод, что потомство *Larix principis-rupprechtii* происхождением из северной части Сахалинской области является лидером по сохранности (33%), продуктивности (352 м<sup>3</sup>/га) и репродуктивной способности. Второй и третий ранги занимают соответственно потомства происхождением из Челябинской (*L. archangelica*, *L. sibirica* и их гибридные формы) и Читинской (*L. dahurica*) областей. Единичные особи остались в потомствах *L. decidua* из Республики Латвия и *L. sibirica* из Красноярского края. При интродукции лиственницы в Ленинградскую область важно принимать во внимание особенности географического происхождения климатипов. Удалённость мест заготовки семян от района использования в направлении «запад-восток» не имеет большого значения; но в направлении «север-юг» не рекомендуется разница более чем на 4° в направлении «север» и 6–8° – «юг». Очень большое значение имеет высота над уровнем моря, тепло- и влагообеспеченность в районе происхождения семян. Данный опыт показал возможность создания смешанных культур лиственницы с елью при густоте посадки около 2 тыс. шт./га.

**Ключевые слова:** географические культуры, *Larix*, происхождение, потомство климатипа, сохранность, рост, шишки, семенная чешуя.

**Nikolaeva M.A., Orlova L.V., Zhigunov A.V., Nikolaev C.A., Begletsov M.S.**  
Assessment of larch development in provenance trials of the Leningrad region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2024, iss. 249, pp. 103–126  
(in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.103-126

The results of 50-year trials of different larch species in provenance trials of Lomonosov forestry of the Leningrad Region are presented. The site has now preserved seed progenies of 14 climatotypes with the following species affiliation: *Larix decidua* Mill., *L. archangelica* Laws., *L. sibirica* Ledeb., *L. dahurica* Laws., *L. amurensis* Kolesn. ex Dylis, *L. kamtschatica* (Rupr.) Carriere, *L. komarovii* Kolesn. and *L. principis-rupprechtii* Mayr. Preservation, condition, growth of progenies were evaluated and their generative features were noted. Based on the data obtained, it was concluded that the progeny of *Larix principis-rupprechtii* originating from the northern part of the Sakhalin region is the leader in terms of survival (33%), productivity (352 m<sup>3</sup>/ha) and reproductive capacity. The second and third ranks are occupied, respectively, by progeny originating from Chelyabinsk (*L. archangelica*,

*L. sibirica* and their hybrid forms) and Chita (*L. dahurica*) regions. Single individuals remained in the progenies of *L. decidua* from the Republic of Latvia and *L. sibirica* from Krasnoyarsk Krai. When introducing larch to the Leningrad Region, it is important to take into account the peculiarities of the geographical origin of climatypes. The remoteness of seed collection sites from the area of use in the «West-East» direction is not of great importance, but in the «north-south» direction, a difference of more than 4° in the «North» direction and 6-8° in the «South» direction is not recommended. Altitude, heat and moisture are very important.

**Keywords:** provenance trials, *Larix*, origin, climatype progeny, preservation, growth, cones, seed scales.

---

**НИКОЛАЕВА Марина Алексеевна** – преподаватель кафедры защиты леса, древесиноведения и охотоведения Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 6445-0694. ORCID: 0000-0002-1777-3937.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: marin.nikol\_1060@mail.ru

**NIKOLAEVA Marina A.** – PhD (Agriculture), Teacher, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 6445-0694. ORCID: 0000-0002-1777-3937.

194021. Institutsky per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: marin.nikol\_1060@mail.ru

**ОРЛОВА Лариса Владимировна** – научный сотрудник Отдела Гербарий высших растений Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН, кандидат биологических наук. SPIN-код: 2351-1491. ORCID: 0000-0002-5046-0422.

197376, ул. Профессора Попова, д. 2, Санкт-Петербург, Россия.

E-mail: orlarix@mail.ru

**ORLOVA Larisa V.** – PhD (Biological). Research Scientist, Komarov Botanical Institute RAS. SPIN-код: 2351-1491. ORCID: 0000-0002-5046-0422.

197022. St. Professor Popov. 2. St. Petersburg. Russia. E-mail: orlarix@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.

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

**ZHIGUNOV Anatolii V.** – DSc (Agriculture), Professor, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 6704-5792. ORCID: 0000-0001-8707-7526.

194021. Institutsky per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: a.zhigunov@bk.ru

**НИКОЛАЕВ Сергей Александрович** – начальник отдела, Directorate of Specially Protected Natural Territories of the Leningrad region.

191015, ул. Шпалерная, д. 52, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: [serg\\_nik07@mail.ru](mailto:serg_nik07@mail.ru)

**NIKOLAEV Sergey A.** – Department head, Directorate of Specially Protected Natural Territories of the Leningrad region.

191015. Shpalernaya str. 52. St. Petersburg. Russia. E-mail: [serg\\_nik07@mail.ru](mailto:serg_nik07@mail.ru)

**БЕГЛЕЦОВ Максим Сергеевич** – студент Института леса и природопользования Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

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

**BEGLETSOV Maksim S.** – student, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institutsky per. 5. St. Petersburg. Russia.

**Н.П. Громов, Д.А. Данилов**

**ИСТОРИКО-АРХИВНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
УСАДЕБНО-ПАРКОВОГО КОМПЛЕКСА «БЕЛОГОРКА»**

*Введение.* Несмотря на возросший в последнее время интерес к восстановлению дворянских усадеб, многие вопросы остаются не изученными. На сегодняшний день состояние упадка усадебных парков затрудняет их изучение и способствует забвению русских традиций паркостроения. Для восстановления усадебных парков самым сложным является определение их первоначального облика или облика в точке их наивысшего расцвета [Русская усадьба, 1994; Исаченко, 2003; Топорина, 2011; Нащокина, 2015; Гусаров, 2015; Черданцева, Жукова, 2018]. Таким образом, изучение исторических архивных документов может во многом помочь в реализации проекта по восстановлению исторических усадебно-парковых ансамблей [Русская усадьба, 1994; Топорина, 2011; Аксенова, Клавир, 2014; Глинка, 2017; Шуваева, 2019].

Усадебно-парковый комплекс «Белогорка», расположенный в Гатчинском районе Ленинградской области, является уникальным по своей красоте памятником природного и культурного наследия нашей страны [Бурлаков, 2012; 2015]. Объект «Усадьба Елисеева, начало XX в.: усадебный дом, церковь, парк», расположенный по адресу: Ленинградская область, Гатчинский муниципальный район, Сиверское городское поселение, д. Белогорка, ул. Институтская, д. 1, д. 3, включен в единый государственный реестр объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации в качестве объекта культурного наследия регионального значения в соответствии с решением Леноблисполкома от 25 апреля 1983 г. № 183 «Об утверждении списков вновь выявленных памятников истории, архитектуры и искусства Ленинградской области» [Памятники истории и культуры..., 2005]. Данный парково-усадебный комплекс является уникальным для Ленинградской области примером усадебной архитектуры с ярко выраженной эстетикой модерна первого – начала второго десятилетия XX века, выступающей по своим стилем характеристикам как символ нового времени, воплощение общественных перемен [Мурашова, 2004; Шуваева, 2015, 2018; Сёмочкин, 2018].

Данное исследование посвящено изучению исторических, библиографических, картографических документов, а также анализу результатов натур-

ных исследований, которые позволяют воссоздать картину формирования усадьбы Елисеевой-Фоминой «Белогорка» в исторической перспективе.

*Методика и объект исследования.* В ходе исследования были использованы архивные материалы разных лет, а также библиографические и картографические материалы. Изучение историко-архивных и библиографических документов усадьбы Елисеевой-Фоминой «Белогорка» проводилось в фондах ФГБУ «Российская национальная библиотека» (г. Санкт-Петербург) [<https://nlr.ru/elibrary>], Санкт-Петербургского ГКУ «Центральный государственный исторический архив Санкт-Петербурга» [<https://spbarchives.ru/infres>], ФКУ «Российский государственный архив древних актов» (г. Москва) [<http://rgada.info/>], ФКУ «Российский государственный исторический архив» (г. Санкт-Петербург) [<https://fgurgia.ru/>], ГКУ ЛО «Дирекция по сохранению объектов культурного наследия» [<https://dsokn.ru/>]. Были исследованы фотоизображения усадебно-паркового комплекса в его исторической среде в разные временные периоды, библиографические и картографические материалы, расположенные в электронных базах данных и библиотеках в общем доступе в сети «Интернет».

Натурное обследование усадебно-паркового комплекса «Белогорка» с целью определения характеристик сложившегося историко-культурного ландшафта, сформировавшейся историко-архитектурной среды; определения природно-исторически ценных парковых объектов проводилось в мае и октябре 2023 года.

Данные, полученные в результате историко-архивного исследования, были проанализированы для дальнейшего использования в работе по восстановлению усадебно-паркового комплекса «Белогорка» и создания проекта по актуализации культурно-природного наследия Ленинградской области.

Общая площадь территории усадебно-паркового комплекса «Белогорка» в настоящее время составляет около 130 гектаров, охватывает большую часть д. Белогорка, стоящей на правом берегу р. Оредеж, на левом берегу – часть д. Новосиверская.

*Результаты исследования.* История формирования помещичьей мызы на изучаемой территории начинается с конца XVIII века, до этого периода местность не осваивалась.

Карты территорий около Иван-Города, Яма, Копорья и Нотеборга 1676 г. и Ингерманландии 1727 г. (рис. 1) иллюстрируют неосвоенную территорию мызы [Мыза Белогорка..., 1978; Мурашова, 2005; Бурлаков, 2012; Ленинградская земля..., 2018]. Несколько ранее сформировалась расположенная неподалеку деревня Ново-Сиверская, первое документальное упоминание о которой содержится в Новгородской писцовой книге 1499

года. Здесь среди сел и деревень Водской пятины в Никольско-Грязненском погосте значится «сельцо Сиверско Старое» и «сельцо Сиверско Новое», а также ныне существующие деревни Межно, Большево, Куровицы и другие [Проект зон охраны..., 2021] (табл. 1).

До 1796 года включительно деревня «Новой Сиверск» входила в состав земель дворцовой Рождественской волости [Списки населённых мест Российской Империи..., 1864; Бурлаков, 2015; Шуваева, 2019; Проект зон охраны..., 2021].

Территория, расположенная на южном берегу реки Оредеж, напротив деревни Новосиверской, была в январе 1797 года пожалована императором Павлом I именным высочайшим указом в числе 8 деревень полковнику Петру Федоровичу Малютину, другу матери декабриста К.Ф. Рылеева. С этого времени начинается история дворянской усадьбы Беля Горка, которую условно можно разделить на три периода: первый – 1799–1899 гг., когда усадьба была выстроена Францем Францевичем Белем в духе того времени, потом переходила его потомкам и перепродаивалась без значительных изменений; второй – начало XX века (по 1917 год), когда усадьба при Елисеевых-Фоминых была полностью перестроена в стиле модерн в духе XX века; 3-й период – 1917 год – до наших дней [Лучинский, Никитин, 2010; Сёмочкин, 2018; Проект зон охраны..., 2021].

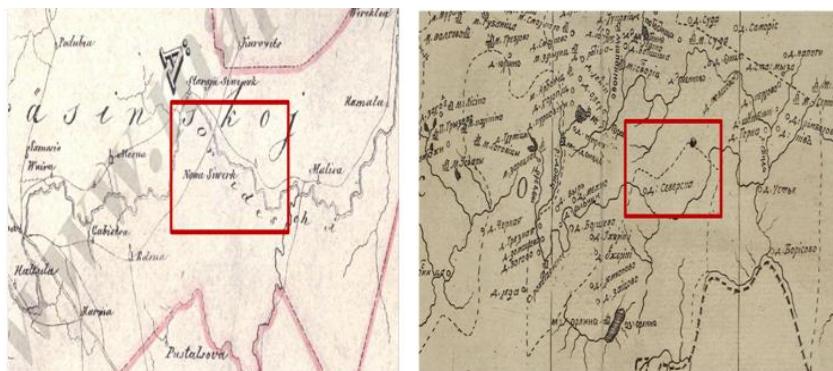


Рис. 1. Карта Иван-Города, Яма, Копорья и Нотеборга 1827 года, показывающая разделение и состояние оного края в 1676 году (фрагмент) и Ингерманландии 1727 года (Кирилов И.К.). Источник: Российская национальная библиотека (Санкт-Петербург)

Fig. 1. Map of Ivan-Gorod, Yam, Koporje and Noteborg in 1827, showing the division and condition of this region in 1676 (fragment) and Ingria (Ingermanland) in 1727 (Kirilov I.K.). Source: Russian National Library (St. Petersburg)

Таблица 1

## Смежные землевладения

## Adjacent landholdings

|                          | 1500 гг.  | 1600 гг.   | 1700 гг.   | 1800 гг.  | Владельцы  |
|--------------------------|---|--|--|---|--|
| Сельцо Сиверского Старое | упоминается среди населённых пунктов Никольского Грязневского погоста по переписи 1500 г.   | как пустошь Siuerscha Ödhe в Грязневском погосте в шведских «Писцовых книгах Ижорской земли» 1618–1623 г. На карте Ингерманландии А.И. Бергенгейма 1676 г. – как деревня Staraja Siwersk | на карте Санкт-Петербургской губернии Я.Ф. Шмидта 1770 года упоминается мыза Сиверска.   | на этнографической карте Санкт-Петербургской губернии П.И. Кёппена 1849 г. – как деревня «Warpan Siwerska»  | деревня баронессы Екатерины Черкасовой, по просёлочной дороге, число дворов – 70, число душ – 156 м. п. (1856 г.)  |
| Сельцо Сиверское Новое   | упоминается среди населённых пунктов Никольского Грязневского погоста по переписи 1500 г.   | как деревня Siuerscha Nonoie в Грязневском погосте в шведских «Писцовых книгах Ижорской земли» 1618–1623 г. На карте Ингерманландии А. И. Бергенгейма 1676 г. – как деревня Nowa Siwersk | На шведской «Генеральной карте провинции Ингерманландии» 1704 г. – как Novasiwarska. На карте Санкт-Петербургской губернии Я. Ф. Шмидта 1770 г. – деревня Сиверска | Согласно карте Ф. Ф. Шуберта в 1844г. деревня Новая Сиверская насчитывала 63 крестьянских двора, на этнографической карте Санкт-Петербургской губернии П. И. Кёппена 1849г. – как деревня Hynnisen Siwerska | деревня господ Паркенсон, Штенрок и Валгович, по просёлочной дороге, число дворов – 76, число душ – 199 м. п. (1856 г.)  |
| Межново                  | Межново упоминается среди населённых пунктов Никольского Грязневского погоста в переписи 1500 г.  | Деревня Mesna обозначена на карте Ингерманландии А. И. Бергенгейма 1676 г.   | Деревня Межно упоминается на карте Санкт-Петербургской губернии Я. Ф. Шмидта 1770 г.   | На картах Ф. Ф. Шуберта 1844 года и С. С. Кутогри 1852 г. – как деревня Межно, состоящая из 75 дворов   | деревня принадлежит Софии и Екатерине Черкасовым, баронессам, число жителей по ревизии: 189 м. п., 215 ж. п. (1838 г.)   |
| Большово                 | Впервые деревня упоминается в Писцовой книге Водской пятини 1500 г., в то время она входила в состав Никольско-Грязневского погоста Копорского уезда Водской пятини | На карте Ингерманландии А. И. Бергенгейма 1676 г., – как деревня Bolsua.   | На шведской «Генеральной карте провинции Ингерманландии» 1704 г. – как Bolsova, Деревня упоминается на карте Санкт-Петербургской губернии Я. Ф. Шмидта 1770 г.     | Согласно карте Ф. Ф. Шуберта в 1844г. деревня Большая насчитывала 83 крестьянских двора   | деревня принадлежит князю Витгенштейну, коллежскому советнику, число жителей по ревизии: 178 м. п., 226 ж. п. При мызе князя Витгенштейна лесопильный деревянный завод (1838 г.) |

## Окончание табл. 1

|          | 1500 гг.   | 1600 гг.  | 1700 гг.  | 1800 гг.   | Владельцы   |
|----------|--|---|---|--|---|
| Куровиши | Впервые упоминается в Писцовой книге Водской пятиной 1500 г. как село Куровиши в Никольском Суздальском погосте Копорского уезда | как пустошь Kurowitzi Ódhe в Суздальском погосте в шведских «Писцовых книгах Ижорской земли» 1618–1623 г. | На шведской «Генеральной карте провинции Ингерманландии» 1704 г. – как село Kurowitshof | Согласно карте Санкт-Петербургской губернии Ф. Ф. Шуберта в 1844 г. насчитывала 60 крестьянских дворов | деревня князя Витгенштейна, по просёлочной дороге, число дворов – 60, число душ – 194 м. п. (1856 г.) |

*1-й период. Конец XVIII – конец XIX века.* Часть земель на южном берегу реки Оредеж, напротив деревни Новосиверской, пожалованных в 1797 году императором Павлом I полковнику П.Ф. Малютину, была перепрода на в 1797 году Францу Францевичу Белю, предводителю дворянства Царскосельского уезда, который решил основать здесь усадьбу – Горка. В названии усадьбы сохранилась фамилия основателя усадьбы – Беля; Беля Горка трансформировалась в конце XIX в. Белую горку, а затем в Белогорку [Мурашова, 2004; Бурлаков, 2012; Шуваева, 2018; Проект зон охраны..., 2021]. Это была небольшая поместочья мыза, размещенная на крутом берегу реки Оредеж и сформированная согласно архитектурно-планировочным традициям того времени, таким как доминирование объема главного дома, наличие курдонера; композиция усадебного комплекса имела осевую симметрию. Ядро усадьбы имело регулярную планировку, служебные и хозяйствственные постройки были сформированы вокруг внутреннего двора. Территория мызы имела «Т-образную» конфигурацию, определенную привязкой к природному ландшафту и береговой линии. С южной стороны композиция усадьбы играла центральную роль в формировании деревни Беля Горка, с северной стороны усадьбу ограничивали лесопарковая зона и живописный рельеф реки Оредеж. Особенности ландшафта до сих пор обеспечивают контрастность взаимодействия ансамбля с окружающей природной средой [Мурашова, 2005; Лучинский, Никитин, 2010; Шуваева, 2018; Сёмочкин, 2018; Проект зон охраны..., 2021].

Коллежский советник Франц Францевич Бель в ноябре 1799 года купил в том числе для обустройства усадьбы деревню Новосиверскую «с землями к той деревне принадлежавшими» со 189 душами крестьян за 36000 рублей «серебренною ходячею монетою». Западнее деревни на противоположном от нее живописном берегу реки Оредеж он построил в начале XIX века деревянный барский дом у края берегового откоса, укреп-

ленного подпорной стеной. Вдоль берега с запада на восток был разбит небольшой пейзажный парк, созданный на основе естественного леса. Перед барским домом, образуя парадный двор, находились служебные и хозяйственные постройки. За ними располагались огорода, теплицы, оранжереи, мучная мельница «о трех поставах» на реке.

Мыза получила в источниках название «Беля-Горка».

Площадь имения на 1811 год составляла 2844 десятин 2170 кв. саженей и включала деревню Изори (Ижорки), купленную Белем в 1799 году (вместе с деревнями Кемск и Сосново) у владелиц близлежащей мызы Дружноселье – сестер Каролины и Елизаветы Зильбергейзен [Мурашова, 2004; Бурлаков, 2012; Шуваева, 2018; Проект зон охраны..., 2021].

На топографической карте Санкт-Петербургской губернии, датированной 1834 г. и составленной со съемки генерал-лейтенанта Шуберта, мы видим обозначение мызы Беля (рис. 2).



Рис. 2 Топографическая карта Санкт-Петербургской губернии. Составлена со съемки генерал-лейтенанта Шуберта и гравирована при Военно-топографическом Депо. 1834 год (фрагмент)

Fig. 2. Topographic map of St. Petersburg province. Compiled from a survey by Lieutenant-General Schubert and engraved at the Military Topographic Depot. 1834 (fragment)

После смерти Ф.Ф. Беля в 1830-х годах имение наследовали его дочери Мария Вансович и Юлия Шенрок, а также Мария Карловна Таркенсон. Эта семья и владела усадьбой до 1874 г. включительно. Распоряжался им-

нием по доверенности от владельца генерал-майор Федор Федорович Шенрок. В 1874 году в связи с разделом имения был составлен план Беля-Горки, дающий представление об исторической композиции усадьбы [Мызя Белогорка, 1978; Сёмочкин, 2018; Проект зон охраны..., 2021] (рис. 3).

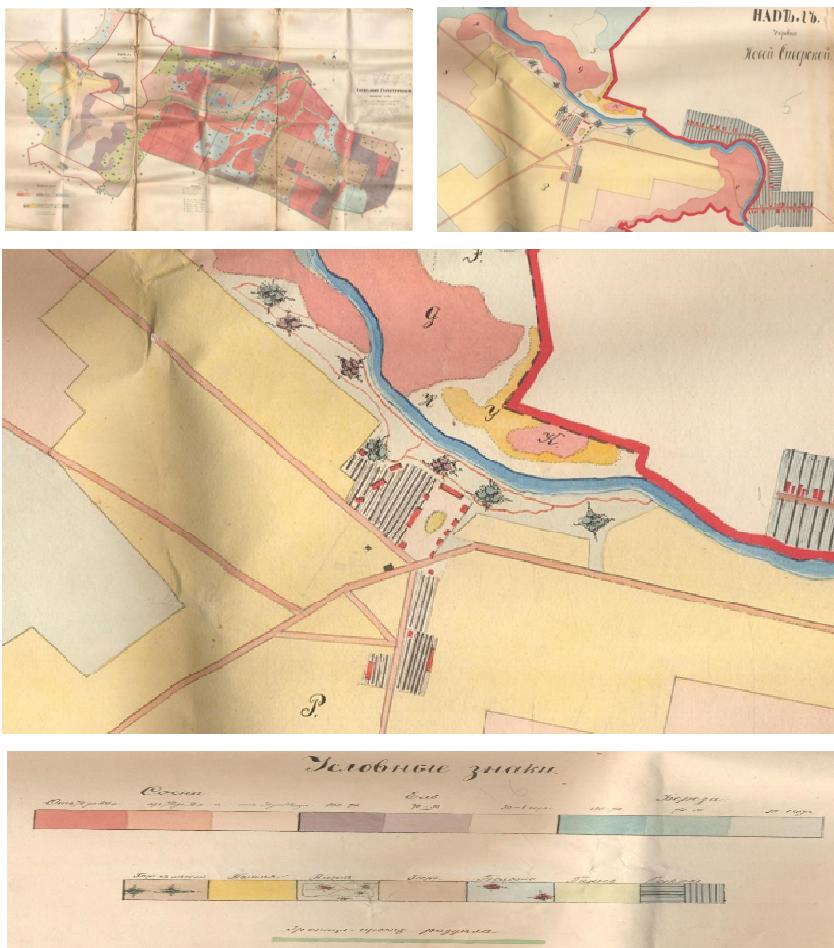


Рис. 3. Специальный Геометрический оценочный план имения и дачи Белягорки, составленный для судебного раздела, в 1874 году (фрагменты)

Fig. 3. Special Geometric appraisal plan of the estate and dacha of Belyagorka, drawn up for the judicial division, in 1874 (fragments)

При новых владельцах усадьбы практически ничего в ней не менялось. Последними из потомков Беля усадьбой владели дочери Марии Францевны Вансович – Анна, Елизавета, Екатерина и Варвара, отец которых, полковник Александр Григорьевич Вансович, скончался в 1836 году [Бурлаков, 2015; Проект зон охраны..., 2021].

Согласно спискам населенных мест Санкт-Петербургской губернии за 1862 год, в 55 верстах от уездного города существовала мыза Белогорка, при колодце, имела она один двор и жителей 6 человек мужского пола и 9 человек женского пола, тут же при реки Оредежи зафиксирован был поместичий Белогорский завод с одним двором и при нем жителей 4 мужского пола и 1 женского пола [Списки населённых мест Российской Империи..., 1862; Проект зон охраны..., 2021] (рис. 4).

| №    | НАЗВАНИЕ НАСЕЛЕННЫХ МЕСТ                    | ОКОНЧАНИЕ ПОЛОЖЕНИЕ          | РАСТОЯНИЕ ВЪ ВЕРСТАХЪ. |                    | ЧИСЛО ДВОРОВЪ. | ЧИСЛО ЖИТЕЛЕЙ. | ЦЕРКВИ И МОЛНИЕННЫЕ ЗДАНИЯ; УЧЕБНЫЕ И БЛАГОТВОРITЕЛЬНЫЕ ЗАВЕДЕНИЯ; ПОЧТОВЫЕ СТАНЦИИ; ПРМАРКИ, БАЗАРЫ, ПРИСТАНИЯ; ФАБРИКИ И ЗАВОДЫ И Т. П. |
|------|---|------------------------------|------------------------|--------------------|----------------|----------------|---|
|      |   |                              | Отъ уездн. города.     | Отъ станов. кварт. |                | число м. п.    |   |
| 4244 | Синеверская (Марисенгофъ), мыза вл.         | при р. Оредежи.              | 50                     | 8                  | 1              | 20             | 10  |
| 4245 | Марисусы (Мартусы), мыза вл.                | при колодцѣ.                 | 47                     | 13                 | 4              | 4              | 4   |
| 4246 | Синеверско новое (Ново-Синеверская), д. вл. | при колодцѣ и рч. Мондровкѣ. | 50                     | 12                 | 99             | 207            | 251   |
| 4247 | Белогорка, мыза вл.                         | при колодцѣ.                 | 55                     | 12                 | 4              | 6              | 9   |
| 4248 | Белогорский, заводъ вл.                     | при р. Оредежи.              | 55                     | 12                 | 4              | 4              | 1   |

Рис. 4. Фрагмент книги «XXXVII. Санкт-Петербургская губерния.

Список населенных мест по сведениям 1862 г.»

Fig. 4. Fragment of the book «XXXVII. St. Petersburg Province.

List of localities according to the information of 1862»

В 1875 году Екатерина и Елизавета Александровны Вансович, внучки Ф.Ф. Беля, продали свою долю имения – 3298 десятин – под названием «Липовый лес» за 44200 рублей князю Петру Львовичу Сайн-Винценштейну, включившему ее в состав заповедного имения Дружноселье-Каменка, учрежденного в роде наследников покойного фельдмаршала П.Х. Витгенштейна. Владельцем оставшейся части имения – 3299 десятин

– стал купеческий сын Зиновьев. Затем, как показывает «Памятная книжка СПб. Губернии» 1898 г., она перешла к баронессе Александре Игнатьевне Радошевской-Ягминой и дочери тайного советника Варваре Ивановне фон Визин [Списки населённых мест Российской Империи.., 1864; Сёмочкин, 2018; Шуваева, 2018; Проект зон охраны..., 2021].

Общие сведения о планировке мызы в середине XIX века могут дать планы 1860–1874 гг., на которых отмечена «Мыза Беля-Горка» (рис. 5).



Рис. 5. Топографическая карта Санкт-Петербургской и Выборгской губерний 1860 года (фрагмент)

Fig. 5. Topographic map of St. Petersburg and Vyborg provinces in 1860 (fragment)

*2-й период. Конец XIX – начало XX века.* В конце XIX – начале XX века владелицей усадьбы становится Елизавета Александровна Новинская, урожденная Елисеева, во втором браке Фомина. Отец Елизаветы Александровны – Александр Григорьевич Елисеев был представителем крупной купеческой династии, совладельцем торгового дома Елисеевых, имевших одни из самых известных магазинов на Невском проспекте Санкт-Петербурга. А.Г. Елисеев приобрел усадьбу Беля-Горка для своей дочери в 1899–1903 годах [Мурашова, 2004, 2005; Проект зон охраны..., 2021]. При Елизавете Александровне Новинской был создан новый усадебный ансамбль, его становление обуславливалось рядом природных факторов – превосходными зелеными насаждениями вдоль обрывистого берега реки Оредеж, обширным открытым пространством с юга, со стороны главным подъездных дорог, – и сугубо утилитарными задачами. Усадьба располагалась на берегу реки, перепад высот составляет 13–15 м, правый берег вы-

раженных террас не имеет, на левом берегу находятся две террасы. При выходе из парка, расположена аллея, справа от которой находятся строения усадебно-паркового комплекса.

На реке в черте д. Белогорка в 1906 году для нужд усадьбы была построена гидроэлектростанция. С советских времен до наших дней сохранилась в рабочем состоянии только плотина, на которой сохранились запорные механизмы; перепад высот составляет приблизительно два метра [Морозова, Финогенова, 2011; Лучинский, Никитин, 2013].

Первоначально в восточной части мызы на окраине парка построили каменную церковь Николая Чудотворца. Строительство велось с 1904 по 1906 годы по проекту архитектора Степана Федоровича Овсянникова (двоюродного брата хозяйки усадьбы) [Хохлова, Степанов, 2014; Проект зон охраны..., 2021]. Поначалу церковь являлась домовым храмом, а в 1910 году стала приходской (рис. 6).

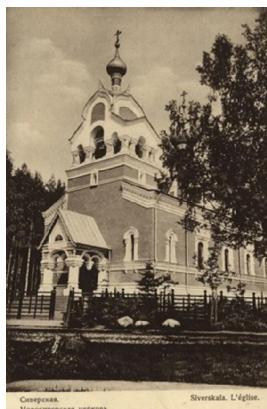


Рис. 6. Новосиверская (Никольская) церковь, 1906 год

Fig. 6. Novosiverskaya (Nikolskaya) church, 1906



Рис. 7. Усадьба Беля-Горка, 1-е – нач. 2-го дес. ХХ в.  
Дом усадебный между 1910–1913 гг.  
Вид с юго-запада

Fig. 7. Belya Gorka manor, 1st – beginning of the 2nd des. of the 20th century. Manor house between 1910–1913. View from the south-west

Рядом с храмом в 1905 году были возведены двухэтажный деревянный дом священника и здание школы (двуухклассного народного училища). Затем в 1906 г. на реке Оредеж была построена электростанция, в 1910 году молочная ферма, казарма для рабочих, сторожка, а также группа экономи-

ческих дач и жилых домов к западу и востоку от главной композиционной оси усадебного комплекса, а в 1911 году был построен кирпичный завод.

В 1910 году начались работы по строительству нового господского дома на месте старого деревянного усадебного дома, который сильно изменил облик старой мызы. Дом был построен в 1912 году, по проекту известного петербургского архитектора Владимира Петровича Тавлинова в стиле северного модерна с шатровыми крышами, башнями и переходами (рис. 7). Ни один его фасад не похож на другой. Лицевой фасад – это прямые плоскости стен, завершенные небольшими щипцами. Вертикали цилиндрических эркеров перемежаются круглыми и гранеными башнями с разнообразными завершениями. Выходящий к реке фасад состоит из разновысотных объемов, этот ритм усиливается и многочисленными дымовыми трубами. Ступенчатость и перепад высот в здании гармонируют с террасами берега. Облицованные светлой керамической плиткой гладкие стеновые плоскости контрастно сочетаются с цоколем, сложенным из грубо отесанных каменных блоков. Из натурального камня выполнены также портал главного входа, оконные проемы и лестница с маршрутами со стороны реки [Морозова, Финогенова, 2011; Лучинский, Никитин, 2013; Проект зон охраны..., 2021].



Рис. 8. Усадьба Беля-Горка, 1-е – нач. 2-го дес. ХХ в. Дом усадебный между 1910–1913 гг. Вид с северо-восточной и восточной стороны.

Фото В.Я. Никифорова, 1990 г.

Fig. 8. Belya Gorka estate, 1st – beginning of the 2nd des. of the 20th century.

Manor house between 1910–1913. View from the northeast and east side.

Photo by V.Ya. Nikiforov, 1990

Великолепное здание расположилось на краю верхней террасы, на южном берегу реки Оредеж. Небольшой партерный парк, с центральной

аллеей и сдвоенной посадкой деревьев по бокам от нее, железной оградой и воротами, расположился к югу от усадебного дома, к западу был комплекс деревянных коммерческих дач. В южной и юго-западной частях усадьбы перед главным усадебным домом были расположены утилитарные здания.

В облике усадьбы второго периода ее развития нашли воплощение художественно-эстетические тенденции начала ХХ века, отражающие новые веяния эпохи. Они коренным образом изменили ее типологию и художественную эстетику, повлияли на планировочную структуру, породили новую форму архитектурного решения – «декларативную естественность» – и новое жизненное пространство [Морозова, Финогенова, 2011; Лучинский, Никитин, 2013; Проект зон охраны..., 2021].

К югу, юго-западу и юго-востоку от главного усадебного дома на протяжении 13 лет была сформирована административно-хозяйственная зона, сильно пересеченная подъездными и внутренними дорогами. Хозяйственный комплекс включал в себя более 50 построек. По своему декоративному оформлению они находились в эстетическом подчинении у особняка и обеспечивали его связь с ландшафтом со стороны подъездных дорог. При этом южная центральная часть была связана с парадным ядром композиционной осью. В ней находились конторский дом, каретный сарай, две конюшни, дом конюха, большой навес, замыкавший главную композиционную ось усадьбы, мастерские. Группа построек юго-западной зоны включала – скотный двор, две оранжереи с домом садовника, теплицы, птичник, казарму, молочную ферму с ледником, несколько сенных сараев и сторожку; юго-восточная группа, вдоль дороги на п. Дружная Горка, – кирпичный завод, амбар, молотильный сарай, кузницу [Морозова, Финогенова, 2011; Лучинский, Никитин, 2013; Проект зон охраны..., 2021].

Вдоль реки Оредеж было построено 23 просторных дачи, которые летом сдавались жителям Петербурга. К настоящему времени сохранились только две постройки. Помещичий уклад отличался высоким уровнем ведения хозяйства. Содержалось очень продуктивное стадо коров и быков голландской породы, состоявшее из 75 голов. Славились и белогорские оранжереи, садовое хозяйство, цветники. При Фоминых здесь работал знаменитый садовод Густав Густавович Арнольд. Липы, растущие в парке, были посажены оригинальным способом – кроной вниз, а корнями вверх, и от этого они имеют довольно необычную крону: из корней выбрасываются десятки стволов-ветвей. Этот способ посадки был очень популярен в Европе эпохи ар-нуво в начале ХХ века [Мурашова, 2004, 2005].



Рис. 9. Усадьба Беля-Горка, 1-е – нач. 2-го дес. ХХ в. Дом усадебный между 1910–1913 гг. Вид с юга. Фото В.Я. Никифорова, 1990 г.

Fig. 9. Belya Gorka estate, 1st – beginning of the 2nd des. of the 20th century. Manor house between 1910–1913. View from the south. Photo by V.Ya. Nikiforov, 1990



Рис. 10. Усадьба Беля-Горка, 1-е – нач. 2-го дес. ХХ в. Дом усадебный между 1910–1913 гг. Вид с запада от центрального въезда. Фото В.Я. Никифорова, 1990 г.

Fig. 10. Belya Gorka manor house, 1st – beginning of the 2nd des. of the XX c. Manor house between 1910–1913. View from the west from the central entrance. Photo by V.Ya. Nikiforov, 1990

Летом 1915 года Елизавета Александровна скончалась от холеры, заразившись ею во время поездки на юг. Ее второй муж, врач, действительный статский советник Яков Иванович Фомин, живший в усадьбе, застрелился в 1917 году. После них остались дети: сын Платон, 1905 г.р., дочь Алла, 1908 г.р. [Проект зон охраны..., 2021].

Общие сведения о планировке усадьбы и прилегающих деревень в XX веке могут дать планы разных периодов (рис. 11).

*3-й период. 1917 год – настоящее время.* На основе ленинского Декрета «О земле» на базе национализированных образцовых поместичьих имений, расположенных в окрестностях Гатчины, в ноябре-декабре 1917 года были созданы советские хозяйства с коллективным землепользованием; та же участь постигла и усадьбу Белогорка [Мурашова, 2004, 2005; Бурлаков, 2015; Шуваева, 2018]. В мае 1919 на основе имения Фоминых был образован совхоз Белогорка, находившийся сначала в ведении Губсовхозов, а с 1922 г. Губсельстреста. В июне 1923 года распоряжением Губсельстреста барский дом и 9 дач были переданы в пользование губернского отдела народного образования для устройства детской колонии. К этому времени (с 1920 г.) уже 11 дач имения находились в ведении Петроградского Института глухонемых.

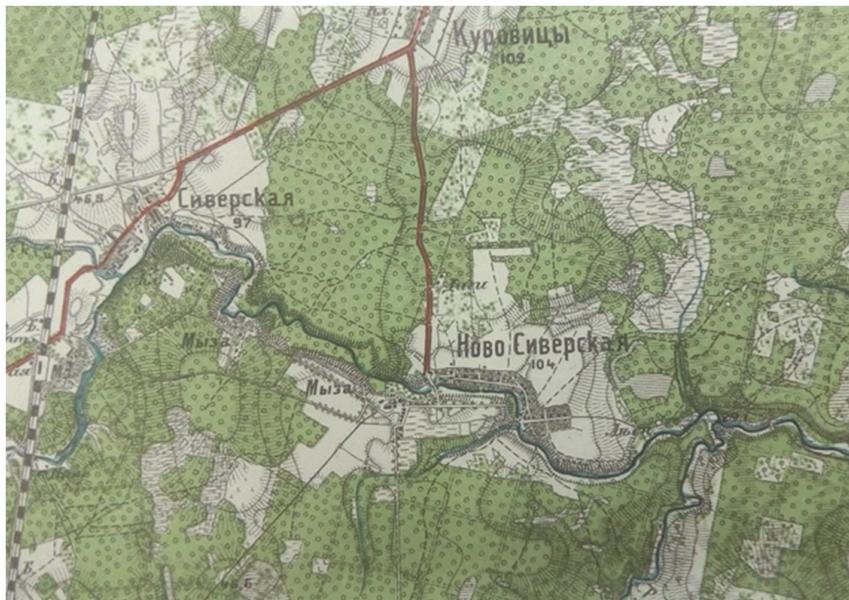


Рис. 11. Северный лист Новой двухверстной карты района маневров Петроградской губернии. 1915 год (фрагмент)

Fig. 11. Northern sheet of the New two-verst map of the maneuvers area of Petrograd province. 1915 (fragment)

К апрелю 1925 первый комиссар совхоза Белогорка Александр Карлович Таммер передал губернскому отделу народного образования господский дом, церковный дом, кирпичную школу и 20 дач. Однако уже в августе 1925 года имущество совхоза было закреплено за Северо-Западной областной опытной станцией, которая приспособила помещения главного усадебного дома под научные отделы. Здесь в 1929 году расположился Институт опытной агрохимии [Мурашова, 2004, 2005; Бурлаков, 2015; Шувалова, 2018; Проект зон охраны..., 2021].

Во время Великой Отечественной войны немецкие военные части в усадебном доме разместили штаб разведки 18-й немецкой армии. Часть парка была вырублена, также сгорели две дачи, были разрушены кирпичная школа и скотный двор. Во время отступления немецких частей в 1944 году фашисты взорвали усадебный дом, в результате чего интерьеры особняка были полностью утрачены, также разрушена крыша и перекрытия [Мурашова, 2004, 2005; Бурлаков, 2015; Проект зон охраны..., 2021] (рис. 12–13).



Рис. 12. Усадьба Белогорка, 1943 год  
*Fig. 12. Belogorka estate, 1943*



Рис. 13. Разрушенная усадьба, 1944 год  
*Fig. 13. Destroyed manor house, 1944*

После Великой Отечественной войны в 1945 году в имении расположилась Ленинградская областная опытная станция (Опытное хозяйство Белогорка и Калитино). К этому времени усадебный дом сохранил свой первоначальный вид и основную внутреннюю планировочную структуру. Были сооружены дополнительные перегородки в крупных помещениях и в подвале. В 1948 году в усадебном доме произвели восстановительные работы [Мурашова, 2004, 2005; Шуваева, 2018] (рис. 14).

С 1 июня 1956 года опытное хозяйство «Белогорка» Ленинградского областного управления сельского хозяйства перешло в ведение Северо-Западного НИИ сельского хозяйства, отделение Всесоюзной академии сельскохозяйственных наук имени В. И. Ленина по Нечерноземной зоне (рис. 15). В усадебном доме располагался лабораторный корпус отделения. Долгое время институт оберегал здание, содержал в хорошем состоянии парк и цветники (рис. 16).

Однако все усадебные хозяйствственные постройки, а именно электростанция, 4 дачи, кузница, оранжереи, кирпичный завод, конюшни, птичник, каретный сарай, конторский дом, баня, амбар, свинарник, лесопилка, казармы, сенные сараи, навес, мастерские, молотильня, дома садовника и конюха, деревянное ограждение усадьбы – были утрачены после 1957 года. На территории усадебного парка к востоку от главного дома было в 1974 году построено новое здание Северо-Западного НИИ сельского хозяйства, а также небольшой жилой поселок. Постройки института сельского хозяйства были расположены достаточно близко к дому и нарушили его исторически сложившееся восприятие, доминируя в пространстве.



*Рис. 14. Усадьба Белогорка, 1947 год.  
Сотрудники объединенного гидрометеоцентра  
на фоне северного фасада усадьбы*  
*Fig. 14. Belogorka estate, 1947. Staff of the United  
Hydrometeorological Center against the  
background of the northern facade of the estate*



*Рис. 15. Белогорка.  
Северо-Западный НИИ  
сельского хозяйства, 1959 год*  
*Fig. 15. Belogorka. North-West  
Research Institute  
of Agriculture, 1959*



*Рис. 16. Усадьба «Белогорка», 1970–1987 гг.  
Fig. 16. Belogorka estate, 1970–1987*

Зеленые насаждения не всегда согласовывались с исторической планировкой иискажали объемно-пространственную структуру ландшафта усадебного комплекса. Усадебный дом и парк хорошо сохранялись до выезда отделения Северо-Западного научно-исследовательского института сельского хозяйства из Белогорки в 1993 году [Проект зон охраны..., 2021] (рис. 17–20).

Начиная с 2000-х годов, пустующее здание начало быстро разрушаться. В результате нескольких пожаров была утрачена конструкция крыши и часть кровельного покрытия, утрачены фрагменты декора фасадов. Территория парка стала зарастать. Подпорная стенка смотровой площадки перед домом руинирована. Однако и сегодня несмотря на разруху дом-замок прекрасно смотрится со всех сторон, особенно со стороны каменных подъездных ворот. Это строение – уникальный образец усадебного строительства России эпохи модерна начала XX века.



Рис. 17. Парк в п. Белогорка.  
Гатчинский район, Ленинградская  
область. Дубовая аллея у въезда.  
Фото 1987 г. Автор не указан

Fig. 18. Park in the village of Belogorka.  
Gatchina district, Leningrad region.  
Oak alley at the entrance. 1987.  
Author is unknown



Рис. 18. Парк в п. Белогорка.  
Гатчинский район, Ленинградская  
область. Рядовая посадка дуба.  
Фото 1987 г. Автор не указан

Fig. 18. Park in Belogorka village.  
Gatchina District, Leningrad Region.  
A row of oak trees. 1987.  
Author is unknown



Рис. 19. Парк в п. Белогорка.  
Гатчинский район, Ленинградская  
область. Вид из парка на въездную  
аллею. Фото 1987 г. Автор не указан

Fig. 19. Park in the village of Belogorka.  
Gatchina district, Leningrad region.  
View from the park to the entrance alley.  
Photo 1987. Author is unknown



Рис. 20. Усадьба Елисеевых  
в Белогорке, 1990–1995 гг.  
Fig. 20. Yeliseyevs' estate  
in Belogorka, 1990–1995



Рис. 21. Никольская церковь в Белогорке, 1995 год

Fig. 21. St. Nicholas Church in Belogorka, 1995



Рис. 22. Парк в п. Белогорка. Гатчинский район, Ленинградская область. Спуск к реке. Видна кладка подпорной стенки. Фото 1987 г. Автор не указан

Fig. 22. Park in the village of Belogorka. Gatchina district, Leningrad region. Descent to the river. The masonry of the retaining wall is visible. Photo taken in 1987. Author is unknown

Службы в Никольской церкви велись до 1936 года. Затем церковь была закрыта и использовалась под склад. В середине 1960-х годов храм приспособили под местный Дом культуры. Для этого снесли купола, колокольню и перестроили внутреннее пространство храма. Храм был возвращен верующим в 1993 году [Хохлова, Степанов, 2014; Бурлаков 2015; Проект зон охраны..., 2021].

В настоящее время церковь частично отремонтирована (без завершения яруса звона колокольни и без пятиглавого завершения храма) (рис. 21).

Усадьба «Белогорка» обрела новых хозяев в 2023 году, они проводят масштабные работы по восстановлению усадебного дома.

В парке (рис. 22) ещё сохранились деревья, возраст которых составляет от 100 до 150 лет. Видовой состав сохранившихся деревьев характерен для усадеб юго-запада Ленинградской области. Из лиственных пород присутствуют старовозрастные деревья дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), вяза шершавого (*Ulmus glabra* Huds.), ясения обыкновенного (*Fraxinus excelsior* L.), липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) и липы европейской (*Tilia europaea* L.). Более поздние вероятно посадки представлены берёзой повислой (*Betula pendula* Roth) и формами тополей (*Populus* ssp.). Из хвойных пород сохранились единичные деревья лиственницы европейской

(*Larix decidua* Mill.), ели европейской (*Picea abies* Karst.) и солитерные деревья пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.). В прибрежной зоне реки Оредеж сохранились деревья сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Из кустарников на территории усадебно-паркового комплекса присутствуют калина канадская (*Viburnum lentago* L.), калина гордовина (*Viburnum lantana* L.), дерен шведский (*Chamaepericlymenum suecicum* L.). и кизильник блестящий (*Cotoneaster lucidus* Schltdl.).

**Заключение.** Исследуемая территория усадебно-паркового комплекса Елисеевой-Фоминой «Белогорка» в исторической перспективе представляла собой загородный владельческий комплекс, увязанный с природным ландшафтом и имеющий достаточно развитую планировочную структуру и разнообразные вспомогательные и хозяйствственные постройки. До настоящего времени сохранились здания усадьбы и церкви, которые являются уникальными по своей архитектуре, выдержаны в духе начала XX века и обладают яркими признаками стилевой принадлежности. Главный дом усадьбы в настоящее время находится в состоянии восстановления новым собственником и требует проведения дальнейших работ по сохранению объекта культурного наследия. Оставшаяся парковая территория усадьбы нуждается в реставрации, восстановлении и уходе.

Проведённый анализ архивных планов и натурное обследование территории выявили, что формировавшаяся последовательно планировочная структура комплекса мызы сохранилась достаточно хорошо и просматривается на местности. Окружающий ландшафт усадьбы малоискажен, но требуются работы по уходу, т.к. не везде сохранились аллеи вдоль дорог, часть территорий заросла. В настоящее время еще возможно предпринять меры для сохранения восприятия ансамбля и его объектов в характерной и подлинной исторической среде, сохранения духа места загородной усадьбы Санкт-Петербургской губернии начала XX века.

Сочетание уникальных природных условий прибрежной зоны реки Оредеж, сохранившихся парковых насаждений и памятников архитектуры и истории могли бы сделать усадебно-парковый комплекс «Белогорка» привлекательным местом для отдыха и экскурсий.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Библиографический список**

Аксенова И.В., Клавир Е.В. Проблемы охраны и современного использования загородных дворянских усадеб // Вестник МГСУ. 2014. № 11. С. 14–25. EDN SZCEZP.

*Бурлаков А.В.* Записки Гатчинского краеведа. Книга первая. Гатчина: Изд-во НЧОУНПО СПУ им. Дона Боско, 2012. 239 с.

*Бурлаков А.В.* Прогулки по южным окрестностям Гатчины. Авторский путеводитель. Гатчина: АНО ДО «СЦДБ», 2015. 128 с.

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

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

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

Карта Санкт-Петербургской губернии. 1860 г. URL: [http://maps.monetonos.ru/tom\\_01/kartSpb/odnoverstka/monetonos\\_9-8.jpg](http://maps.monetonos.ru/tom_01/kartSpb/odnoverstka/monetonos_9-8.jpg) (дата обращения 22.02.2024).

Ленинградская земля: краеведческий альманах. Т. I. Санкт-Петербург: Ленинградский государственный университет им. А.С. Пушкина, 2018. 360 с. ISBN 978-5-8290-1735-4. EDN XWFWGL.

*Лучинский А.А., Никитин Н.В.* Сиверская дачная местность по Варшавской железной дороге (переиздание книги 1910 г.). Гатчина: АНО ДО «СЦДБ», 2013. 80 с.

Материалы по статистике народного хозяйства в С.-Петербургской губернии. Вып. XII. Частновладельческое хозяйство в Царскосельском уезде. СПб. 1891. 127 с. URL: <https://lib.rgo.ru/reader/flipping/Resource7405/RuPRLIB12084184/index.html> (дата обращения 05.12.2023).

*Морозова А.А., Финогенова Л.А.* Наша Сиверская: архитектурно-художественные образы. СПб.: Летопись, 2011. 108 с.

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

*Мурашова Н.В.* Усадьба Белогорка // Адреса Петербурга. 2004. № 15/27. С. 94–99.

Мыза Белогорка, 1874 год. Источник: паспорт памятника истории и культуры «Усадьба в п. Белогорка. Парк», 1978 г., архив ГКУ ЛО «Дирекция по сохранению объектов культурного наследия».

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

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

Проект зон охраны объекта культурного наследия регионального значения «Усадьба Елисеева», расположенного по адресу: Ленинградская область, Гатчинский район, п. Белогорка, ул. Институтская, д. 1, 3. Вологда, 2021. 101 с. URL: <https://kskn.lenobl.ru/ru/deiatelnost/okn/proekty-zon-ohrany/>;  
[https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1719822459&tld=ru&lang=ru&name=04\\_Белого\\_рка\\_Елисеева\\_кн2\\_ПЗО\\_6.pdf&text](https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1719822459&tld=ru&lang=ru&name=04_Белого_рка_Елисеева_кн2_ПЗО_6.pdf&text)

Русская усадьба: сб. О-ва изуч. рус. усадьбы / [науч. ред. Л.В. Иванова]. Вып. 1 (17). М.; Рыбинск: Рыбин. подворье: Михайлов посад, 1994. 239 с.

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

Сёмочкин А.А. Жемчужное ожерелье. Усадьбы Гатчинского района // Дворцы, особняки, усадьбы. Музейный формат: сб. науч. статей XXIV Царскосельской конференции. СПб., 2018. С. 552–561.

Списки населённых мест Российской Империи, составленные и издаваемые центральным статистическим комитетом министерства внутренних дел. XXXVII. Санкт-Петербургская губерния. По состоянию на 1862 год. СПб. 1864. URL: <http://lopress.47lib.ru/imageViewer/img?url=mZaTmpGekprCl4uLj8XQ0JmQh4uNkIvRnpOLjJCZi9GMj53RjYrQk5CPjZqMjNKMi5CNnpia0NDPz8%2FO0M%2FPz87Qz8nNzdGPm5nZnIqNjZqRi6+emJrCztmah4vCj5uZ2Z6Li43CzsfJy8vPys3HyNmMmo2WnpPCztmQnZWanIvCzsfJx8nJz83OzNmYjZCKj8LP> (дата обращения 08.02.2024).

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

Хохлова Г.Г., Степанов С.В. История Никольского храма в имении «Белогорка» Е.А. Фоминой: из истории сельских приходов Петербургской губернии. Балтийский край: историко-краеведческий альманах. 2014. Вып. 1.

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

Шуваева Е.Ю. Проблемы современного использования исторической усадебной застройки на примере усадьбы Елисеевых-Фоминых «Белогорка» в Гатчинском районе Ленинградской области // Охрана и реставрация памятников культурного наследия: матер. Всерос. науч.-теор. конференции. Санкт-Петербург, 2018. С. 177–180.

Шуваева Е.Ю. Формирование загородной усадебной застройки XVIII – начала XX в. на примере Гатчинского района Ленинградской области // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2019. № 12. С. 85–91

## Reference

Aksanova I.V., Klavir E.V. Problems of protection and modern use of country noble estates. *Vestnik MGSU*, 2014, no. 11, pp. 14–25. EDN SZCEZP. (In Russ.)

Belogorka manor house, 1874. Passport of the historical and cultural monument «Manor in Belogorka settlement. Park», 1978, archive of the GCU LO «Direkciya po sohraneniyu ob"ektov kul'turnogo naslediya». (In Russ.)

Burlakov A.V. Walks in the southern suburbs of Gatchina. Author's guide. Gatchina: ANO DO «SDCB», 2015. 128 p. (In Russ.)

Burlakov A.V. Zapiski Gatchina local historian. Book one. Gatchina: Izd-vo NCHOUNPO SPU named after Don Bosco, 2012. 239 p. (In Russ.)

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

Glinka N.V. The Leningrad region. Historical sketches. SPb.: Aurora, 2017. 160 p. (In Russ.)

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

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

Khokhlova G.G., Stepanov S.V. History of St. Nicholas church in the estate «Belogorka». E.A. Fomina: from the history of rural parishes of St. Petersburg province. *Baltic region: historical and local lore almanac*, 2014, iss. 1. (In Russ.)

Leningradskaya zemlya Leningradskaya zemlya: krajevedcheskiy almanac. Vol. I. St. Petersburg: Leningrad State University named after A.S. Pushkin. 2018. 360 p. ISBN 978-5-8290-1735-4. EDN XWFGL. (In Russ.)

Lists of populated places of the Russian Empire, compiled and published by the Central Statistical Committee of the Ministry of the Interior. XXXVII. St. Petersburg Province. 1862. St. Petersburg, 1864. P. 172. URL: <http://lopress.47lib.ru/imageViewer/img?url=mZaTmpGekprCl4uLj8XQ0JmQh4uNkIvRnpOLjJCZi9GMj53RjYrQk5CPjZqMjNKMj5CNnpia0NDPz8%2FO0M%2FPz87Qz8nNzdGPm5nZnIqNjZqRi6+emJrCztmah4vCj5uZ2Z6Li43CzsfJy8vPys3HyNmMmo2WnpPCztmQnZWanIvCzsfJx8nJz83OzNmYjZCKj8LP> (access February 8, 2024). (In Russ.)

Luchinsky A.A., Nikitin N.V. Siverskaya dacha area along the Warsaw railroad (reprint of the book 1910). Gatchina: ANO DO «SDCB», 2013. 80 p. (In Russ.)

Map of St. Petersburg province. 1860. URL: [http://maps.monetonos.ru/tom\\_01/kartSpb/odnoverstka/monetonos\\_9-8.jpg](http://maps.monetonos.ru/tom_01/kartSpb/odnoverstka/monetonos_9-8.jpg) (access February 22, 2024). (In Russ.)

Materials on the statistics of the national economy in S.-Petersburg province. Vol. XII. Private-owner economy in Tsarskoye Selo uyezd. SPb., 1891. 127 p. URL: <https://lib.rgo.ru/reader/flipping/Resource7405/RuPRLIB12084184/index.html> (access December 5, 2023). (In Russ.)

Morozova A.A., Finogenova L.A. Nasha Siverskaya: architectural and artistic images. St. Petersburg: Letopis, 2011. 108 p. (In Russ.)

Murashova N.V. Belogorka estate. *Addresses of Petersburg*, 2004, no. 15/27, pp. 94–99. (In Russ.)

Murashova N.V. One hundred noble estates of St. Petersburg province: a historical guide. St. Petersburg: Vybor, 2005. 399 p. (In Russ.)

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

Russian Manor: Collection of the Society for the Study of Russian Manor / Editor-in-Chief L.V. Ivanova. Iss. 1 (17). M.; Rybinsk: Rybin. podvorye: Mikhailov Posad, 1994. 239 p. (In Russ.)

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

*Semochkin A.A.* Pearl necklace. Estates of the Gatchina district. *Palaces, mansions, estates. Museum format*: collection of scientific articles of the XXIV Tsarskoye Selo Conference. GMZ «Tsarskoye Selo». St. Petersburg, 2018, pp. 552–561. (In Russ.)

*Shuvaeva E. Yu.* Formation of suburban estate development of the XVIII – early XX century. On the example of Gatchina district of the Leningrad region. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*, 2019, no. 12, pp. 85–93. (In Russ.)

*Shuvaeva E.Yu.* Problems of modern use of historical estate buildings on the example of the estate of Eliseev-Fominykh «Belogorka» in the Gatchina district of the Leningrad region. *Protection and restoration of monuments of cultural heritage*: mater. of the All-Russian scientific-theoretical conference. St. Petersburg, 2018, pp. 177–180. (In Russ.)

State Cultural and Cultural Monuments of St. Petersburg under state protection. Reference book. St. Petersburg: Alt-Soft, 2005. 947 p. (In Russ.)

The project of protection zones of the object of cultural heritage of regional significance «Eliseev Estate», located in the Leningrad region, Gatchina district, Belogorka settlement, Institutskaya street 1, 3. Vologda, 2021. 101 p. URL: <https://kskn.lenobl.ru/ru/deiatelnost/okn/proekty-zon-ohrany/>; [https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1719822459&tld=ru&lang=ru&name=04\\_Белогорка\\_Елисеева\\_кн2\\_ПЗО\\_6.pdf&text](https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1719822459&tld=ru&lang=ru&name=04_Белогорка_Елисеева_кн2_ПЗО_6.pdf&text) (In Russ.)

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

*Материал поступил в редакцию 15.03.2023*

---

**Громов Н.П., Данилов Д.А.** Историко-архивное исследование усадебно-паркового комплекса «Белогорка» // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 249. С. 127–151. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.127-151

Усадьба Елисеевой–Фоминой является уникальным для Ленинградской области примером усадебной архитектуры с ярко выраженной эстетикой модерна первого – начала второго десятилетия XX века, выступающей по своим стилевым характеристикам как символ нового времени, воплощение общественных перемен. В исторической перспективе она представляла собой

загородный усадебный комплекс, увязанный с природным ландшафтом и имеющий достаточно развитую планировочную структуру и разнообразные вспомогательные и хозяйственные постройки. До настоящего времени сохранились усадебный дом и церковь. Данные здания являются уникальными по своей архитектуре, выдержаны в духе начала XX века, обладают яркими признаками стилевой принадлежности. Главный дом усадьбы в настоящее время находится в состоянии восстановления новым собственником и требует проведения дальнейших работ по сохранению объекта культурного наследия. Оставшаяся парковая территория усадьбы нуждается в реставрации и восстановлении. Проведённый анализ архивных планов и натурное обследование территории выявили, что формировавшаяся последовательно планировочная структура комплекса мызы сохранилась достаточно хорошо и просматривается на местности. Окружающий ландшафт усадьбы мало искажен, но требует ухода, так как не везде сохранились аллеи вдоль дорог, часть территорий заросла. В настоящее время еще возможно предпринять меры для сохранения восприятия ансамбля и его объектов в характерной и подлинной исторической среде, сохранения духа места загородной усадьбы Санкт-Петербургской губернии начала XX века. Сочетание уникальных природных условий прибрежной зоны реки Оредеж, сохранившихся парковых насаждений и памятников архитектуры и истории могли бы сделать усадебно-парковый комплекс «Белогорка» привлекательным местом для отдыха и экскурсий.

Ключевые слова: парковый комплекс, архитектурный ансамбль, планировка усадьбы, исторический анализ.

**Gromov N.P., Danilov D.A.** Historical and archival study of the estate-park complex «Belogorka». *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2024, iss. 249, pp. 127–151 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.127-151

The Eliseeva-Fomina estate is a unique example of manor architecture in the Leningrad region with a pronounced Art Nouveau aesthetics of the first – early second decade of the XX century, acting in its stylistic characteristics as a symbol of the new time, as an embodiment of social change. In the historical perspective it was a country estate complex, linked to the natural landscape and having a sufficiently developed planning structure and a variety of auxiliary and household buildings. The manor house and the church have been preserved to this day. These buildings are unique in their architecture, are in the spirit of the early XX century, have bright signs of style. The main house of the manor house is currently being restored by the new owner and requires further conservation work. The remaining park area of the estate needs restoration. The analysis of archive plans and field survey of the territory revealed that the successive planning structure of the manor complex has been preserved well enough and can be seen on the ground. The surrounding landscape of the manor house

is not well preserved, but it requires maintenance, as not everywhere alleys along the roads have been preserved and some areas are overgrown. It is still possible to take measures to preserve the perception of the ensemble and its objects in a characteristic and authentic historical environment, to preserve the spirit of the place of a country estate of St. Petersburg province of the early XX century. The combination of unique natural conditions of the coastal zone of the Oredezh River, preserved park plantings and monuments of architecture and history could make the Belogorka estate-park complex an attractive place for recreation and excursions.

**Keywords:** park complex, architectural ensemble, estate layout, historical analysis.

---

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

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

**GROMOV Nikita P.** – PhD student of St.Petersburg State Forestry University.

194021. Institutskiy per. 5. St. Petersburg. Russia.

**ДАНИЛОВ Дмитрий Александрович** – профессор кафедры лесоводства Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор сельскохозяйственных наук.

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

главный научный сотрудник Ленинградского НИИСХ «Белогорка» – филиала ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр картофеля им. А.Г. Лорха». ORCID: 0000-0002-7504-5743;

188338, Институтская ул., д. 1, д. Белогорка, Гатчинский район, Ленинградская область, Россия. E-mail: stown200@mail.ru

**DANILOV Dmitry A.** – DSc (Agriculture), Professor of Forestry Department, St.Petersburg State Forestry University.

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

principal researcher of Department of Agrochemistry and Agrolandscapes, Leningrad Research Agriculture Institute Branch of Russian Potato Research Centre. ORCID: 0000-0002-7504-5743.

188338. Institutskaya str. 1. Belogorka. Leningrad Region. Russia. E-mail: stown200@mail.ru

Х.М. Ань, А.В. Грязькин, Р.Л. Калайджян, Л.К. Волдаев, Р.А. Балковский

## КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСНОВНЫХ ВИДОВ ПОЛЕЗНЫХ РАСТЕНИЙ В ВЫСОКОПРОДУКТИВНЫХ ЕЛЬНИКАХ ОХТИНСКОГО ЛЕСНИЧЕСТВА

*Введение.* Ельники таежной зоны – растительные сообщества, участвующие в формировании ландшафтов. В европейской части России по занимаемой площади ельники занимают второе место после сосновок. На территории Ленинградской области ельники со второго места были вытеснены березняками. Это результат интенсивной эксплуатации хвойного хозяйства и массовой смены пород, о чем более века назад с беспокойством писал Нестор Карлович Генко [1886]. Особенно интенсивная смена пород наблюдается в последние десятилетия на европейской части таежной зоны, о чем свидетельствуют многочисленные публикации [Побединский, 1991; Гусев, 1999; Бобкова, Галенко, 2006; Мельников и др., 2006; Беляева и др., 2012а; Морозова и др., 2017; Стороженко, 2017]. Увеличивающиеся объемы искусственного лесовосстановления ситуацию на сегодняшний день, по разным причинам, не изменили.

Наиболее продуктивные ельники произрастают на богатых суглинистых почвах с оптимальным увлажнением [Бобкова, Галенко, 2006; Мельников и др., 2006; Беляева и др., 2012а; Морозова и др., 2017]. Видовой состав растительности нижних ярусов в ельниках отличается от состава в сосновках, березняках [Банникова, 1967; Грязькин, 2001; Чан Чунг Тхань и др., 2020]. Это связано с тем, что под пологом ельников исследователи отмечают во всех случаях дефицит освещенности [Мельников и др., 2006; Беляева, Григорьева, 2010; Беляева и др., 2012а; Кази, 2012; Schneider, Roeder, 1993; Pretzsch, 2005; Tjoelker et al., 2007; Budeanu, Sofletea, 2013]. Ель – теневыносливая порода с густой плотной кроной, которая не пропускает солнечный свет к растениям нижних ярусов [Грязькин, 2001; Tjoelker et al., 2007; Budeanu, Sofletea, 2013]. В составе подроста и подлеска в ельниках обычно встречаются лишь несколько видов, малотребовательных к режиму освещения. В живом напочвенном покрове произрастает значительно больше видов, чем в составе подроста и подлеска [Грязькин, 2001; Беляева и др., 2012; Грязькин и др., 2020; Чан Чунг Тхань и др., 2020].

В зависимости от условий места произрастания структура ельников меняется [Грязькин, 2001; Бобкова, Галенко, 2006; Беляева и др., 2012а; Моро-

зова и др., 2017; Pretzsch, 2005; Tjoelker et al., 2007]. Ельники кисличного типа леса характеризуются наиболее сложной структурой, в них представлены все компоненты лесного фитоценоза с выраженным видовым разнообразием в каждом компоненте. При одноярусном древостое большой густоты подрост если характеризуется минимальной численностью, другие виды в составе подроста в таких условиях чаще всего отсутствуют. Примерно такая же ситуация и с подлесочными породами. При большой густоте древостоя подлесок редкий и представлен преимущественно рябиной и крушиной. Другие виды в составе этого компонента леса встречаются единично. Состав травяно-кустарничкового яруса беден, а в мохово-лишайниковом ярусе, наоборот, представлено большинство основных видов таежной зоны [Банникова, 1967; Бобкова, Галенко, 2006; Морозова и др., 2017]. Основная часть видов в составе живого напочвенного покрова относится к сырьевым растениям [Грязькин и др., 2020; Чан Чунг Тхань и др., 2020].

Цель исследования – оценка потенциальных сырьевых ресурсов в высокопродуктивных ельниках.

*Объекты и методика.* Объект исследования – высокопродуктивные ельники на территории учебно-опытного лесничества Ленинградской области (Охтинское участковое лесничество, кварталы 19 и 20). Таксационные характеристики древостоев на объектах исследования представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Таксационные характеристики древостоев на объектах исследования**

**Taxation characteristics of forest stands at research sites**

| Таксационная характеристика                | Объект 1   | Объект 2   |
|--|------------|------------|
| Состав, %                                  | 72E20C8Б   | 79E12Б9С   |
| Густота, экз./га                           | 745        | 1085       |
| Относительная полнота                      | 0,6        | 0,8        |
| Сомкнутость крон, %                        | 73         | 89         |
| Средний диаметр стволов, см                | 26,8       | 27,7       |
| Средняя высота, м                          | 24,9       | 26,8       |
| Средний возраст, лет                       | 80         | 90         |
| Класс бонитета                             | I          | I          |
| Запас древесины, м <sup>3</sup> /га        | 308        | 342        |
| Доля отпада, % по запасу                   | 1,7        | 3,6        |
| Географические координаты опытных объектов |            |            |
| Северная широта                            | 59°56'129" | 59°57'969" |
| Восточная долгота                          | 30°33'068" | 30°33'037" |

В составе древостоя на обоих объектах преобладает ель – 583 и 855 экз./га соответственно. Деревья ели разновозрастные. Доля сосны и березы в составе древостоя в несколько раз меньше. Сосна и береза на объектах исследования представлены крупными деревьями.

Учетные работы по исследованию структуры нижних ярусов растительности проводили на круговых площадках по  $10\text{ m}^2$  по апробированной методике [Грязкин, 2001]. Приемлемая точность учетных работ достигалась закладкой необходимого количества учетных площадок [Беляева и др., 2012б; Грязкин и др., 2020].

*Результаты и обсуждение.* На объектах исследования представлены все компоненты еловых фитоценозов. Ель в составе древостоев имеет разный возраст, размах варьирования диаметра стволов от 6 до 62 см (рис. 1).



Рис. 1. Крупномерные деревья ели на опытных участках

Fig. 1. Large spruce trees in experimental plots

На опытных участках общий объем отпада не превышает 4% по запасу и представлен елью и березой. Диаметр стволов сухостоя от 6 до 12 см. В составе подроста, как и в древостое, преобладает ель. Общая численность подроста менее 2 тыс./га (табл. 2). По высоте основная часть подроста относится к мелкому, а по виталитету – к нежизнеспособному.

Подлесок редкий, в составе встречается несколько видов – рябина обыкновенная, крушина ломкая, жимолость обыкновенная и калина обыкновенная. Единично встречается шиповник иглистый. Общая численность подлеска менее 1,4 тыс./га (табл. 3).

Таблица 2

**Основные характеристики подроста под пологом ельника  
на объектах исследования**

**Main characteristics of undergrowth under the spruce forest canopy  
at research sites**

| Таксационная характеристика | Объект 1         | Объект 2    |
|-----------------------------|------------------|-------------|
| Состав, %                   | 81Е11Олс4Кло2Д2Б | 51Е29Д20Кло |
| Численность, экз./га        | 1933             | 980         |
| Средняя высота, см          | 76               | 44          |
| Средний возраст, лет        | 9                | 11          |
| Доля отпада, %              | 13               | 28          |
| Доля жизнеспособного, %     | 36               | 15          |

Таблица 3

**Основные характеристики подлеска на объектах исследования**

**Main characteristics of the undergrowth at the study sites**

| Таксационная характеристика | Объект 1            | Объект 2        |
|-----------------------------|---------------------|-----------------|
| Состав, %                   | 68Ряб18Крш12Кал2Шип | 67Ряб26Круш7Жим |
| Численность, экз./га        | 1397                | 320             |
| Средняя высота, см          | 76                  | 61              |

Живой напочвенный покров на первом опытном участке включает 23 вида сосудистых растений, а на втором – всего 14 видов. При высокой сомкнутости крон (объект 2) в составе живого напочвенного покрова преобладают теневыносливые виды (рис. 2).

В составе мохово-лишайникового яруса и на первом, и на втором опытных участках встречается несколько видов мхов, относящихся к классу листостебельных мхов. Основные представители – дикранумы, мох Шребера, ритидиумы, кукушкин лен (по микропонижениям и в ветровальных воронках).

Травяно-кустарничковый ярус сложен преимущественно из теневыносливых видов – классических представителей таежной растительности: кислицы, майника, седмичника, щитовника, ожики волосистой. По величине встречаемости и проективному покрытию преобладают всего 3-4 вида (табл. 4).



Рис. 2. Преобладание теневыносливых видов в составе живого напочвенного покрова под пологом ельника с высокой сомкнутостью крон

Fig. 2. The predominance of shade-tolerant species in the living ground cover under the canopy of a spruce forest with a high crown density

Таблица 4

**Видовой состав живого напочвенного покрова, встречаемость и проективное покрытие по видам в ельнике кисличном**

**Species composition of living ground cover, occurrence and projective cover by species in the oxalis spruce forest**

| Название вида   | Встречаемость, % |          | Проективное покрытие, % |          |
|---|------------------|----------|-------------------------|----------|
|   | объект 1         | объект 2 | объект 1                | объект 2 |
| Брусника ( <i>Vaccinium vitis-idea</i> L.)                            | 42               | –        | 2,8                     | –        |
| Вейник лесной ( <i>Calamagrostis epigeios</i> (L.) Roth)              | 36               | 24       | 4,2                     | 1,3      |
| Вереск обыкновенный ( <i>Calluna vulgaris</i> (L.) Hull.)             | 7                | –        | 0,1                     | –        |
| Ветренница дубравная ( <i>Anemone nemorosa</i> L.)                    | 12               | –        | 0,3                     | –        |
| Голокучник обыкновенный ( <i>Gymnocarpium dryopteris</i> (L.) Newman) | 12               | 18       | 1,0                     | 1,1      |

Окончание табл. 4

| Название вида   | Встречаемость, % |          | Проективное покрытие, % |          |
|---|------------------|----------|-------------------------|----------|
|   | объект 1         | объект 2 | объект 1                | объект 2 |
| Дудник лесной ( <i>Angelica sylvestris</i> L.)                          | 9                | 12       | 0,1                     | 0,8      |
| Звездчатка ланцетовидная ( <i>Stellaria holostea</i> L.)                | 22               | 36       | 1,8                     | 2,3      |
| Зелёные мхи ( <i>Bryidae</i> sp.)                                       | 94               | 100      | 7,0                     | 10,2     |
| Земляника ( <i>Fragaria vesca</i> L.)                                   | 44               | —        | 1,2                     | —        |
| Золотарник обыкновенный ( <i>Solidago virgáurea</i> L.)                 | 12               | 24       | 0,2                     | 1,6      |
| Иван-чай ( <i>Chamaenerion angustifolium</i> L. Scop.)                  | 6                | —        | 0,1                     | —        |
| Кислица обыкновенная ( <i>Oxalis acetosella</i> L.)                     | 96               | 100      | 34,1                    | 32,0     |
| Костяника каменистая ( <i>Rubus saxatilis</i> L.)                       | 9                | —        | 0,6                     | —        |
| Кукушник лен ( <i>Polytrichum commune</i> Hedw.)                        | 6                | —        | 0,2                     | —        |
| Купырь лесной ( <i>Anthriscus sylvestris</i> (L.) Hoffm.)               | 15               | —        | 1,1                     | —        |
| Ландыш майский ( <i>Convallaria majalis</i> L.)                         | 7                | —        | 0,1                     | —        |
| Майник двулистный ( <i>Maianthemum bifolium</i> (L.) F.W.Schmidt)       | 100              | 100      | 1,3                     | 2,1      |
| Малина обыкновенная ( <i>Rubus idaeus</i> L.)                           | 42               | 20       | 4,7                     | 1,1      |
| Марьянник лесной ( <i>Melampyrum silvaticum</i> L.)                     | 18               | —        | 0,7                     | —        |
| Ожика волосистая ( <i>Luzula pilosa</i> (L.) Willd.)                    | 90               | 100      | 1,0                     | 1,3      |
| Луговик извилистый ( <i>Avenella flexuosa</i> (L.) Drejer)              | 34               | 20       | 3,3                     | 1,1      |
| Седмичник европейский ( <i>Trientalis europaea</i> L.)                  | 31               | 40       | 0,9                     | 1,3      |
| Черника обыкновенная ( <i>Vaccinium myrtillus</i> L.)                   | 58               | 24       | 11,0                    | 3,8      |
| Чина весенняя ( <i>Lathyrus vernus</i> (L.) Bernh.)                     | 4                | —        | 0,1                     | —        |
| Щитовник игольчатый ( <i>Dryopteris carthusiana</i> (Vill.) H.P. Fuchs) | 92               | 94       | 22,0                    | 20,7     |
| Сосудистые растения, кол-во видов                                       | 25               | 13       | 23                      | 13       |
| Общее проективное покрытие, %   | —                | —        | 92,7                    | 70,5     |

Участие каждого вида в составе живого напочвенного покрова по фитомассе зависит от величины встречаемости и проективного покрытия (с учетом биометрических характеристик растения – главным образом высоты и степени развития надземной части). Установлено, что чем больше величина проективного покрытия вида, тем больше общая фитомасса данного растения на лесном участке. По запасам фитомассы как на первом, так и на втором опытных участках преобладает щитовник игольчатый (табл. 5).

Таблица 5

**Фитомасса живого напочвенного покрова по видам под пологом ельника кисличного**

**Phytomass of living ground cover by species under the canopy of the oxalis spruce forest**

| Название вида   | Фитомасса, кг/га |          |
|---|------------------|----------|
|   | объект 1         | объект 2 |
| Брусника ( <i>Vaccinium vitis-idea</i> L.)                              | 62               | 28       |
| Вейник лесной ( <i>Calamagrostis epigeios</i> (L.) Roth)                | 118              | 67       |
| Вереск обыкновенный ( <i>Calluna vulgaris</i> (L.) Hull.)               | 11               | –        |
| Ветренница дубравная ( <i>Anemone nemorosa</i> L.)                      | 61               | –        |
| Голокучник обыкновенный ( <i>Gymnocarpium dryopteris</i> (L.) Newman)   | 42               | 72       |
| Дудник лесной ( <i>Angelica sylvestris</i> L.)                          | 36               | –        |
| Звездчатка ланцетовидная ( <i>Stellaria holostea</i> L.)                | 66               | 33       |
| Зелёные мхи ( <i>Bryidae</i> sp.)                                       | 449              | 622      |
| Земляника ( <i>Fragaria vesca</i> L.)                                   | 9                | –        |
| Золотарник обыкновенный ( <i>Solidago virgáurea</i> L.)                 | 37               | 19       |
| Иван-чай ( <i>Chamaenerion angustifolium</i> L. Scop.)                  | 21               | –        |
| Кислица обыкновенная ( <i>Oxalis acetosella</i> L.)                     | 63               | 53       |
| Костяника каменистая ( <i>Rubus saxatilis</i> L.)                       | 78               | –        |
| Кукушкин лен ( <i>Polytrichum commune</i> Hedw.)                        | 127              | –        |
| Купырь лесной ( <i>Anthriscus sylvestris</i> (L.) Hoffm.)               | 84               | –        |
| Ландыш майский ( <i>Convallaria majalis</i> L.)                         | 29               | 14       |
| Майник двулистный ( <i>Maianthemum bifolium</i> (L.) F.W. Schmidt)      | 21               | 23       |
| Малина обыкновенная ( <i>Rubus idaeus</i> L.)                           | 32               | –        |
| Марьянник лесной ( <i>Melampyrum silvicum</i> L.)                       | 33               | 27       |
| Ожика волосистая ( <i>Luzula pilosa</i> (L.) Willd.)                    | 38               | 41       |
| Луговик извилистый ( <i>Avenella flexuosa</i> (L.) Drejer)              | 45               | 19       |
| Седмичник европейский ( <i>Trifentalis europaea</i> L.)                 | 20               | 13       |
| Черника обыкновенная ( <i>Vaccinium myrtillus</i> L.)                   | 220              | 185      |
| Чина весенняя ( <i>Lathyrus vernus</i> (L.) Bernh.)                     | 27               | –        |
| Щитовник игольчатый ( <i>Dryopteris carthusiana</i> (Vill.) H.P. Fuchs) | 296              | 280      |
| Итого   | 2025             | 1496     |

Проективное покрытие более 10% у кислицы обыкновенной щитовника игольчатого и черники. Встречаемость около 100% установлена для кислицы обыкновенной, майника двулистного, ожика волосистой и щитовника игольчатого.

Растительность в составе живого напочвенного покрова включает представителей из разных сырьевых групп. Распределение растений по сырьевому значению на объектах исследования представлено в табл. 6.

Таблица 6

**Распределение растений, произрастающих под пологом ельников на объектах исследования, по сырьевым группам**

**Distribution of plants growing under the canopy of spruce forests at study sites by raw material groups**

| Номер объекта исследования | Сырьевые группы растений |               |          |             |          |
|----------------------------|--------------------------|---------------|----------|-------------|----------|
|                            | пищевые                  | лекарственные | медоносы | технические | кормовые |
| 1                          | 7                        | 9             | 17       | 5           | 7        |
| 2                          | 3                        | 4             | 8        | 2           | 5        |

**Заключение.** Запасы ресурсных растений по объектам исследования различаются существенным образом. Промышленная заготовка сырьевых растений целесообразна под пологом древостоя с сомкнутостью крон не более 70% и при густоте древостоя не более 700 дер./га. При таких характеристиках древостоя видовой состав сырьевых растений разнообразнее, проективное покрытие и фитомасса существенно выше по сравнению с древостоями большой густоты с высокой сомкнутостью крон. Для промышленной заготовки в данных условиях пригодны кислица (надземная часть – 53-63 кг/га), черника ( побеги – 185-220 кг/га) и брусника (лист – 28-62 кг/га).

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Библиографический список**

*Банникова И.А.* Влияние древесных и кустарниковых растений на развитие нижних ярусов лесных биогеоценозов. М.: Наука, 1967. 103 с.

*Беляева Н.В., Григорьева О.И.* Структурные изменения в живом напочвенном покрове после сплошных рубок, проведенных в комплексе с механической подсушкой осины // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2010. Вып. 190. С. 32-41.

- Беляева Н.В., Грязькин А.В., Кази И.А.* Влияние выборочных рубок на развитие нижних ярусов растительности // Лесной вестник. 2012. № 3. С. 32–41.
- Беляева Н.В., Грязькин А.В., Калинский П.М.* Точность учетных работ при оценке естественного лесовозобновления // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. 2012. № 8. С. 7–12.
- Бобкова К.С., Галенко Э.П.* Коренные еловые леса Севера: биоразнообразие, структура, функции. СПб.: Наука, 2006. 334 с.
- Генко Н.К.* О естественной смене хвойных лиственными породами и, наоборот, лиственных хвойными // Лесной журнал. 1886. Вып. 4. С. 18–33.
- Грязькин А.В.* Возобновительный потенциал таежных лесов (на примере ельников Северо-Запада России): монография. СПб.: СПбГЛТА, 2001. 188 с.
- Грязькин А.В., Сырников И.А., Прокофьев А.Н.* Урожайность промысловых видов растений под пологом древостоев // Лесотехнический журнал. 2020. № 2. С. 8–14.
- Кази И.А.* Исследование конкурентных отношений между древостоем и подростом в насаждениях, сформированных рубками ухода: автореф. дисс. ... канд. с.х. наук: 06.03.02. СПб.: СПбГЛТУ, 2016. 19 с.
- Матвеева А.С., Беляева Н.В., Данилов Д.А.* Возрастная структура подроста ели разных фенологических форм в зависимости от состава и строения древостоя // ИВУЗ. Лесной журнал. 2018. № 1. С. 47–60. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.1.47.
- Мельников Е.С., Беляева Н.В., Богданова Л.С.* Влияние комплексного ухода за лесом на развитие нижних ярусов растительности сосновых и еловых фитоценозов южной тайги // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2006. Вып. 178. С. 4–12.
- Морозова О.В., Семенищенков Ю.А., Тихонова Е.В., Беляева Н.Г., Кожевникова М.В., Черненькова Т.В.* Неморальнотравные ельники Европейской России // Растительность России. 2017. № 31. С. 33–58. URL: <https://doi.org/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. дисс. ... канд. с.х. наук: 06.03.02. СПб.: СПбГЛТУ, 2010. 19 с.
- Побединский А.В.* Лесоводственная оценка смены коренных деревьев тайги производными // Лесное хозяйство. 1991. № 1. С. 19–22.
- Стороженко В.Г.* Естественное возобновление в коренных разновозрастных ельниках европейской тайги России // Сибирский лесной журнал. 2017. № 3. С. 87–92. DOI: 10.15372/SJFS20170309.
- 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. Вып. 233. С. 19–38.

*Bouriaud O., Leban J.M., Bert D., Deleuze C.* Intra-annual variations in climate influence growth and wood density of Norway spruce // *Tree Physiology*. 2005. No. 25(6). P. 651–660.

*Budeanu M., Șofletea N.* Stem and crown characteristics of Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst] populations from Romanian Carpathians // *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 2013. No. 41. P. 593–600.

*Fravolini G., Egli M., Derungs C., Cherubini P., Ascher-Jenull J., Gómez-Brandón M., Marchetti M.* Soil attributes and microclimate are important drivers of initial deadwood decay in sub-alpine Norway spruce forests // *Science of the Total Environment*. 2016. No. 569. P. 1064–1076.

*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. No. 30. P. 1633–1646.

*Pretzsch H.* Stand density and growth of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.): evidence from long term experimental plots // *European Journal of Forest Research*. 2005. No. 124 (3). P. 193–205.

*Schneider B., Roeder A.* Dynamics of Natural Regeneration of Norway Spruce under Shelters of Old Stands // *Allgemeine Forst-Zeitschrift*. 1993. Vol. 48 Extent: v. 57–60 (2). P. 37–43.

*Tjoelker M.G., Boratynski A., Bugal W., eds.* *Biology and Ecology of Norway Spruce* // *Netherlands* Springer Netherlands. 2007. 474 p.

## References

*Bannikova I.A.* Vliyanie drevesny' h i kustarnikovy' h rastenij na razvitiye nizhnih yarusov lesny' h biogeocenozov. M.: Nauka, 1967. 103 p. (In Russ.)

*Belyaeva N.V., Gryaz'kin A.V., Kalinskij P.M.* Tochnost' uchetny' h rabot pri ocenke estestvennogo lesovozobnovleniya. *Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N.I. Vavilova*, 2012, no. 8, pp. 7–12. (In Russ.)

*Belyaeva N.V., Gryaz'kin A.V., Kazi I.A.* Vliyanie vy'borochny' h rubok na razvitiye nizhnih yarusov rastitel'nosti. *Lesnoj vestnik*, 2012, no. 3, pp. 32–41. (In Russ.)

*Bobkova K.S., Galenko E.P.* Korenn'ye elovy'ye lesa Severa: bioraznoobrazie, struktura, funkciia. SPb.: Nauka, 2006. 334 p. (In Russ.)

*Bouriaud O., Leban J.M., Bert D., Deleuze C.* Intra-annual variations in climate influence growth and wood density of Norway spruce. *Tree Physiology*, 2005, no. 25(6), pp. 651–660.

*Budeanu M., Șofletea N.* Stem and crown characteristics of Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst] populations from Romanian Carpathians. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 2013, no. 41, pp. 593–600.

*Chan Chung Than', Gryaz'kin A.V., Belyaeva N.V., Kazi I.A., Bespalova V.V., Sy'rnikov I.A.* Sravnitel'naya ocenka struktury' i zapasov drevesny' h i nedrevesny' h resursov bereznyakov i el'nikov. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2020, iss. 233, pp. 19–38. (In Russ.)

Fravolini G., Egli M., Derungs C., Cherubini P., Ascher-Jenull J., GómezBrandón M., Marchetti M. Soil attributes and microclimate are important drivers of initial deadwood decay in sub-alpine Norway spruce forests. *Science of the Total Environment*, 2016, no. 569, pp. 1064–1076.

Genko N.K. O estestvennoj smene hvojny'h listvenny'mi porodami i, naoborot, listvenny'h hvojny'mi. *Lesnoj zhurnal*, 1886, iss. 4, pp. 18–33. (In Russ.)

Gryaz'kin A.V. Vozobnovitel'ny'j potencial taezhny'h lesov (na primere el'nikov Severo-Zapada Rossii): monografiya. SPb.: SPbGLTA, 2001. 188 p. (In Russ.)

Gryaz'kin A.V., Sy'rnikov I.A., Prokof'ev A.N. Urozhajnost' promy'slovy'h vidov rastenij pod pologom drevostoev. *Lesotehnicheskij zhurnal*, 2020, no. 2, pp. 8–14. (In Russ.)

Kazi I.A. Issledovanie konkurentny'h otnoshenij mezhdu drevostoem i podrostom v nasazhdenniyah, sformirovanny'h rubkami uhoda: avtoref. diss. ... kand. s.-h. nauk: 06.03.02. SPb.: SPbFTU, 2016. 19 p. (In Russ.)

Matveeva A.S., Belyaeva N.V., Danilov D.A. Vozrastnaya struktura podrosta eli razny'h fenologicheskikh form v zavisimosti ot sostava i stroeniya drevostoya. *IVUZ. Lesnoi zhurnal*, 2018, no. 1, pp. 47–60. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.1.47. (In Russ.)

Mel'nikov E.S., Belyaeva N.V., Bogdanova L.S. Vliyanie kompleksnogo uhoda za lesom na razvitiye nizhnih yarusov rastitel'nosti sosnovy'h i elovy'h fitocenozov yuzhnoj tajgi. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2006, iss. 178, pp. 4–12. (In Russ.)

Morozova O.V., Semenishhenkov Yu.A., Tihonova E.V., Belyaeva N.G., Kozhevnikova M.V., Chernenkova T.V. Nemoral'notravny'e el'niki Evropejskoj Rossii. *Rastitel'nost' Rossii*, 2017, no. 31, pp. 33–58. URL: <https://doi.org/10.31111/vegrus/2017.31.33> (In Russ.)

Pavlov Yu.V. Zakonomernosti izmeneniya urozhajnosti rastitel'nogo sy'r'ya v svyazi s transformacijej lesny'h zemel' (na primere Leningradskoj oblasti): avtoref. diss. ... kand. s.h. nauk: 06.03.02. SPb.: SPbFTU, 2010. 19 p. (In Russ.)

Pobedinskij A.V. Lesovodstvennaya ocenka smeny' korennyy'h derev'ev tajgi proizvodny'mi. *Lesnoe hozyajstvo*, 1991, no. 1, pp. 19–22. (In Russ.)

Ponocná T., Spytl B., Kaczka R., Büntgen U., Treml V. Growth trends and climate responses of Norway spruce along elevational gradients in East-Central Europe. *Trees*, 2016, no. 30, pp. 1633–1646.

Pretzsch H. Stand density and growth of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.): evidence from long term experimental plots. *European Journal of Forest Research*, 2005, no. 124 (3), pp. 193–205.

Schneider B., Roeder A. Dynamics of Natural Regeneration of Norway Spruce under Shelters of Old Stands. *Allgemeine Forst-Zeitschrift*, 1993, vol. 48 Extent: v. 57–60 (2), pp. 37–43.

Storozhenko V.G. Estestvennoe vozobnovlenie v korennyyh raznovozrastnyh el'nikah evropejskoj tajgi Rossii. *Sibirskij lesnoj zhurnal*. 2017. no. 3. pp. 87–92. DOI: 10.15372/SJFS20170309. (In Russ.)

Tjoelker M.G., Boratynski A., Bugal W., eds. Biology and Ecology of Norway Spruce. Netherlands: Springer Netherlands, 2007. 474 p.

Материал поступил в редакцию 26.01.2024

---

**Ань Х.М., Грязькин А.В., Калайджян Р.Л., Волдаев Л.К., Балковский Р.А.** Количествоные характеристики основных видов полезных растений в высокопродуктивных ельниках Охтинского лесничества // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 249. С. 152–165. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.152-165

Представлены материалы по оценке количественных характеристик основных видов полезных растений в высокопродуктивных ельниках Охтинского участкового лесничества Учебно-опытного лесничества Ленинградской области. Цель исследования – оценка потенциальных сырьевых ресурсов в высокопродуктивных ельниках. Установлены видовой состав, встречаемость, проективное покрытие и фитомасса растений, имеющих сырьевое значение. Показано, что в зависимости от характеристик доминанта и эдификатора видовой состав и количественные характеристики сырьевых растений в живом напочвенном покрове различаются существенным образом. Густота древостоя и сомкнутость крон – основные факторы, от которых зависят видовой состав, встречаемость, проективное покрытие и фитомасса растений в составе живого напочвенного покрова. При сомкнутости крон 89% и густоте древостоя около 1,1 тыс./га под пологом ельника кисличного зафиксировано 14 видов сосудистых растений, а при сомкнутости крон 73% и густоте древостоя 745 экз./га – 25 видов. В составе мохово-лишайникового яруса и на первом, и на втором опытных участках выявлено несколько видов мхов, относящихся к классу листостебельных мхов – дикранумы, мох Шребера, ритидиумы, кукушкин лен. Сырьевое значение имеют 12 видов под пологом густого ельника и 20 видов – под пологом изреженного ельника. По величине встречаемости и проективному покрытию к преобладающим видам отнесены кислица, майник, щитовник. По фитомассе доминируют зеленые мхи и щитовники. Полученные результаты могут быть использованы для пополнения базы данных по сырьевым растениям и видовому разнообразию коренных ельников таежной зоны европейской части России.

**Ключевые слова:** ельники, структурные элементы фитоценоза, полезные растения, встречаемость, проективное покрытие, фитомасса.

**An Kh.M., Gryazkin A.V., Kalaydzhyan R.L., Voldaev L.K., Balkovsky R.A.**  
Quantitative characteristics of the main types of useful plants in highly productive spruce forests of the Okhtinsky forestry. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 249, pp. 152–165 (in Russian with English summary).  
DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.152-165

Materials are presented on assessing the quantitative characteristics of the main species of useful plants in highly productive spruce forests of the Okhtinsky district forestry of the Scientific and Experimental Forestry of the Leningrad region. The species composition, occurrence, projective cover and phytomass of plants of raw material importance have been established. It has been shown that, depending on the characteristics of the dominant and the edifier, the species composition and quantitative characteristics of raw plants in the living ground cover differ significantly. The density of the forest stand and the density of the crowns are the main factors on which the species composition, occurrence, projective cover and phytomass of plants in the living ground cover depend. With a crown closure of 89% and a stand density of about 1.1 thousand /ha, 14 species of vascular plants were recorded under the canopy of the sour spruce, and with a crown closure of 73% and a stand density of 745 specimens /ha – 25 species. Several species of mosses belonging to the class of leaf-stem mosses – dicranums, Schreber moss, rhytidiums, cuckoo flax – were identified in the composition of the moss-lichen layer at both the first and second experimental sites. The raw material value is 12 species under the canopy of dense spruce and 20 species under the canopy of sparse spruce. According to the magnitude of occurrence and projective cover, the predominant species include sourdough, mayberry, and buckthorn. The phytomass is dominated by green mosses and thistles. The obtained results can be used to replenish the database on raw plants and species diversity of indigenous spruce forests of the taiga zone of the European part of Russia. The purpose of the study is to assess potential raw materials in highly productive spruce forests.

**Keywords:** spruce stands, structural elements of phytocenosis, useful plants, occurrence, projective cover, phytomass.

---

**АНЬ Хоанг Минь** – аспирант кафедры лесоводства, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова. Researcher ID: ABB-5138-2021. ORCID: 0000-0003-3025-803X.

194021, Институтский пер., д. 5, Литер У. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: minhhanh\_hoang@outlook.com

**AN Hoang M.** – Post-Graduate Student of the Department «Forestry». St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov. Researcher ID: ABB-5138-2021. ORCID: 0000-0003-3025-803X.

194021, St. Petersburg, Institutsky lane, building 5, Liter U. E-mail: minhhanh\_hoang@outlook.com

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

194021, 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 Forestry University. SPIN-code: 7206-1050, Researcher ID: C-6699-2018, ORCID: 0000-0002-3497-9312, SCOPUS Author ID: 55988504200.

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

**КАЛАЙДЖЯН Рафик Леонович** – директор Охтинского учебно-опытного лесхоза. Охтинское лесничество Учебно-опытного лесничества Ленинградской области.

195030, Сосновский пр., д. 2, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: redshoot16@gmail.com

**KALAYDZHYAN Rafik L.** – Director of the Okhtinskiy educational and experimental forestry department. Okhtinskiy forestry department of the Educational and experimental forestry department of the Leningrad region.

195030. Sosnovsky av. 1. 2. St. Petersburg. Russia. E-mail: redshoot16@gmail.com

**ВОЛДАЕВ Леонид Константинович** – магистрант кафедры лесоводства, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова. SPIN-код: 6864-0225.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: voldaev01@list.ru

**VOLDAEV Leonid K.** – undergraduate student of the Department «Forestry». St.Petersburg State Forestry University. SPIN-code: 6864-0225.

194024. Institutsky per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: voldaev01@list.ru

**БАЛКОВСКИЙ Рафаэль Андреевич** – магистрант кафедры лесоводства, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: puma-raf2011@yandex.ru

**BALKOVSKIY Rafael A.** – undergraduate student of the Department «Forestry». St.Petersburg State Forestry University.

194024. Institutsky per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: puma-raf2011@yandex.ru

## 2. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ЛЕСОЗАГОТОВОВОК

---

УДК 536.24

**А.А. Куликов, И.В. Иванова, И.Н. Дюкова**

### **МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ**

*Введение.* Основной закон теплопроводности Фурье позволяет вычислять тепловые потоки через различные поверхности по векторной характеристике неоднородности температурного поля – градиенту температуры. При формулировке этого закона рассматривается вектор плотности теплового потока. Подробное описание процесса теплопроводности, раскрывающее связь вектора плотности теплового потока со скоростью распространения энергии в сплошной среде за счёт теплопроводности, является актуальной задачей развития основ общей теории теплопроводности.

Цель исследования – построение физической модели теплопроводности, учитывающей скорость перемещения энергии в веществе.

*Методика исследования.* При теплопроводности перенос энергии в веществе не связан с переносом массы вещества. В модели сплошной среды при теплопроводности энергия непрерывным потоком распространяется через все точки пространства, занятого некоторым телом, что позволяет рассматривать это распространение как процесс, связанный с переносом некоторой материальной субстанции [Умов, 1950; Цветков, 2011]. Перемещение в пространстве любой материальной субстанции можно характеризовать скоростью её перемещения [Умов, 1950; Сивухин, 2005]. Например, в физической модели процесса теплового излучения энергия переносится в пространстве невесомыми фотонами, которые движутся со скоростью света [Зигель, 1975].

Известно, что вектор скорости по направлению всегда совпадает с вектором, характеризующим перемещение материального объекта [Сивухин, 2005]. Таким образом, направление перемещения любой материальной субстанции всегда совпадает с направлением вектора скорости. При теп-

лопроводности энергия движется непрерывным потоком, и в каждой конкретной точке пространства, заполненного сплошной средой, перемещение энергии в данный момент времени характеризуется какой-то конкретной скоростью этого перемещения.

При теплопроводности в конкретном теле достаточно очевидно, что чем больше скорость в рассматриваемой точке, тем больше через эту точку проходит энергии за счет теплопроводности. Если скорость равна нулю, то теплопроводность отсутствует. Скорость, с которой перемещается энергия в сплошной среде за счет теплопроводности, формирует в пространстве, занятом рассматриваемым телом, некоторое векторное поле [Умов, 1950]. Следует отметить, что найти значение модуля вектора этой скорости, например, в некоторой точке тела в данный момент времени весьма непросто. Однако в теории теплопроводности, как известно, это значение не востребовано. Для формулировки закона Фурье, описывающего процесс теплопроводности, достаточным является представление о направленности вектора скорости, то есть о направленности переноса энергии за счет теплопроводности в упомянутой точке [Цветков, 2011].

По определению направление вектора плотности теплового потока, построенного в произвольной точке  $M$  с координатами  $x, y, z$  пространства, в котором расположено рассматриваемое тело, в момент времени  $\tau, \text{ с}$ , совпадает с направлением переноса энергии теплопроводностью через эту точку, то есть совпадает с направлением вектора скорости  $\vec{\omega}_q, \text{ м/с}$ , с которой через точку  $M$  движется энергия за счет теплопроводности.

Это направление может быть задано ортом  $\vec{e}_\omega$ , всегда направленным вдоль вектора скорости  $\vec{\omega}_q$ . Таким образом, из определения направленности вектора плотности теплового потока вытекает следующая предварительная формула, в которой модуль этого вектора еще не определен:

$$\vec{q}(x, y, z, \tau) = |\vec{q}(x, y, z, \tau)| \cdot \vec{e}_\omega, \quad (1)$$

где  $\vec{q}(x, y, z, \tau)$  – вектор плотности теплового потока,  $\text{Вт/м}^2$ ;  $|\vec{q}(x, y, z, \tau)|$  – модуль вектора  $\vec{q}$ ,  $\text{Вт/м}^2$ .

В соответствии с формулой (1), вектор  $\vec{q}$  всегда направлен в ту сторону, в которую переносится энергия за счет теплопроводности. Это направление задается ортом  $\vec{e}_\omega$ , и оно никак не связано с тем, какой конкретной поверхности принадлежит рассматриваемая точка  $M (x, y, z)$ . Таким образом, вектор  $\vec{q}$  формирует в области пространства, занятого рассматривае-

мым телом, некоторое векторное поле  $\vec{q}(x, y, z, \tau)$ , то есть является объемной характеристикой процесса теплопроводности.

Общее определение вектора плотности теплового потока  $\vec{q}$  может быть получено на базе определения известной величины, которая называется вектором плотности энергии  $\vec{j}_{\text{эн}}$ , Вт/м<sup>2</sup> [Умов, 1950; Цветков, 2011]:

$$\vec{j}_{\text{эн}} = \rho_{\text{эн}} \cdot \vec{\omega}, \quad (2)$$

где  $\vec{\omega}$  – скорость, с которой энергия распространяется в пространстве, м/с;  $\rho_{\text{эн}}$  – объёмная плотность энергии, Дж/м<sup>3</sup>.

Следует отметить, что определение (2) подобно также хорошо известному определению вектора плотности потока массы  $\vec{j}$ , кг/с·м<sup>2</sup> [Цветков, 2011; Лойцянский, 1970]:

$$\vec{j} = \rho \cdot \vec{v}, \quad (3)$$

где  $\vec{v}$  – скорость, с которой масса распространяется в пространстве, м/с;  $\rho$  – плотность распределения в пространстве массы сплошной среды, или сокращенно – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>.

Известно, что величина  $\rho$ , которая в общем случае может зависеть от времени, определяется на базе следующих построений. В пространстве, где расположено рассматриваемое тело, например, некоторый газ, выбирается произвольная точка  $M$  с координатами  $x, y, z$ . Вокруг точки  $M$  выделяется малый объем произвольной формы  $\Delta V$ , м<sup>3</sup>, включающий в себя точку  $M$ . Малая масса малого объема  $\Delta V$  обозначается как  $\Delta M$ , кг.

По определению: плотность вещества в точке  $M(x, y, z)$  в момент времени  $\tau$  равна пределу отношения  $\Delta m$  к  $\Delta V$ , при стремлении  $\Delta V$  к нулю таким образом, что точка  $M$  остается всегда принадлежащей  $\Delta V$ :

$$\rho(M, \tau) = \rho(x, y, z, \tau) = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} = \frac{dm}{dV}, \quad (4)$$

где  $dV$  – бесконечно малый объем, «стягиваемый» в точку  $M$ , в котором находится рассматриваемая среда, м<sup>3</sup>;  $dm$  – бесконечно малая масса среды, находящейся в  $dV$ , кг;  $\rho(x, y, z, \tau)$  – плотность распределения в пространстве массы сплошной среды (плотность среды), в общем случае зависящая от времени  $\tau$ , кг/м<sup>3</sup>.

В (4)  $dV$  – это дифференциал объема – бесконечно малое приращение объема вокруг точки  $M$ , а  $dm$  – это дифференциал массы среды – бесконечно малое приращение массы, соответствующее приращению объема на  $dV$ .

Применяя определение (2) для случая теплопроводности, получаем:

$$\begin{aligned}\vec{q}(x, y, z, \tau) &= \rho_q(x, y, z, \tau) \cdot \vec{\omega}_q(x, y, z, \tau) = \\ &= \rho_q(x, y, z, \tau) \cdot |\vec{\omega}_q(x, y, z, \tau)| \cdot \vec{e}_\omega,\end{aligned}\quad (5)$$

где  $\vec{q}(x, y, z, \tau)$  – вектор плотности теплового потока, формирующий в области пространства, занятого телом, где происходит теплопроводность, векторное поле,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $\rho_q(x, y, z, \tau)$  – объемная плотность энергии, перемещающейся за счет теплопроводности, формирующая в пространстве скалярное поле, – плотность распределения в пространстве энергии, переносимой за счет теплопроводности,  $\text{Дж}/\text{м}^3$ ;  $|\vec{\omega}_q(x, y, z, \tau)|$  – модуль вектора  $\vec{\omega}_q$ ,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $\vec{e}_\omega$  – орт, направленный вдоль вектора  $\vec{\omega}_q$ .

Сравнивая определение (5) с формулой (1), получаем:

$$|\vec{q}(x, y, z, \tau)| = \rho_q(x, y, z, \tau) \cdot |\vec{\omega}_q(x, y, z, \tau)|. \quad (6)$$

Входящая в (5) величина  $\rho_q$  может определяться по формуле, аналогичной (4). Для этого в пространстве, где расположено рассматриваемое тело, выбирается произвольная точка  $M$  с координатами  $x, y, z$ . Вокруг точки  $M$  выделяется малый объем произвольной формы  $\Delta V$ ,  $\text{м}^3$ , включающий в себя точку  $M$ . Количество энергии, которое переносится за счет теплопроводности и находится в объеме  $\Delta V$ , обозначается как  $\Delta E$ .

По определению плотность распределения в пространстве энергии, переносимой за счет теплопроводности,  $\rho_q$  в точке  $M$  в момент времени  $\tau$  равна пределу отношения  $\Delta E$  к  $\Delta V$ , при стремлении  $\Delta V$  к нулю таким образом, что точка  $M$  остается всегда принадлежащей  $\Delta V$ :

$$\rho_q(M, \tau) = \rho(x, y, z, \tau) = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\Delta V} = \frac{dE}{dV}, \quad (7)$$

где  $dV$  – дифференциал объема – бесконечно малый объем, «стягиваемый» в точку  $M$ , в котором находится энергия, переносимая за счет теплопроводности;  $dE$  – дифференциал энергии, соответствующий  $dV$ , – бесконечно малое количество энергии, переносимой за счет теплопроводности, которая находится в  $dV$ , Дж.

Для практического применения определения (7) в фиксированный момент времени  $\tau$  проведем через рассматриваемую точку  $M$  плоскость  $S_\perp$ , перпендикулярную вектору скорости  $\vec{\omega}_q(M)$ , а значит и вектору  $\vec{q}(M)$ .

После этого построения рассматриваемую точку  $M$  обозначим как  $M_{S\perp}$ , где индекс  $S$  означает, что точка рассматривается как принадлежащая некоторой конкретной поверхности, а индекс  $\perp$  означает, что эта поверхность перпендикулярна векторам  $\vec{\omega}_q$  и  $\vec{q}$ , построенным в рассматриваемой точке. После этого в качестве элементарного объёма  $dV$  в (7) может быть рассмотрен объём элементарного прямоугольного цилиндра, у которого бесконечно малая площадь основания, содержащая в себе точку  $M_{S\perp}$ , располагается в пространстве перпендикулярно вектору скорости  $\vec{\omega}_q(M_{S\perp})$  и обозначается как  $dS_{\perp}$ , м<sup>2</sup>. При этом очевидно, что: направление вектора  $\vec{\omega}_q(M_{S\perp})$  будет совпадать с направлением орта нормали  $\vec{n}_M$ , построенного из точки  $M_{S\perp}$  к лицевой стороне площадки  $dS_{\perp}$ ; элементарная площадка  $dS_{\perp}$  принадлежит некоторой конечной плоской поверхности  $S_{\perp}$ , перпендикулярной вектору  $\vec{\omega}_q(M_{S\perp})$ , а, следовательно, и вектору  $\vec{q}(M_{S\perp})$ .

За бесконечно малую высоту цилиндра принимается расстояние, на которое за бесконечно малый интервал времени  $d\tau$ , с, перемещается энергия, проходящая через площадку  $dS_{\perp}$  за счёт теплопроводности. Эта высота вычисляется по очевидной формуле:

$$dh = |\vec{\omega}_q(M_{S\perp})| \cdot d\tau, \quad (8)$$

где  $dh$  – высота элементарного прямоугольного цилиндра, м;  $|\vec{\omega}_q(M_{S\perp})|$  – модуль скорости, с которой через  $dS_{\perp}$  переносится энергия за счёт теплопроводности, м/с.

Объём рассматриваемого элементарного прямоугольного цилиндра вычисляется по известной формуле [Бронштейн, Семенджев, 1953]:

$$dV = dS_{\perp} \cdot dh = dS_{\perp} \cdot |\vec{\omega}_q(M_{S\perp})| \cdot d\tau. \quad (9)$$

Очевидно, что в построенном таким образом элементарном объёме  $dV$  будет находиться такое элементарное количество энергии  $dE$ , которое переносится за счёт теплопроводности через бесконечно малую площадку  $dS_{\perp}$ , перпендикулярную вектору  $\vec{q}$ , за бесконечно малое время  $d\tau$ .

Подставляя (9) в (7), получаем:

$$\rho_q(x, y, z, \tau) = \frac{dE}{dS_{\perp} \cdot d\tau \cdot |\vec{\omega}_q(M_{S\perp})|}. \quad (10)$$

Подставляя (10) в (5), получаем:

$$\vec{q}(x, y, z, \tau) = \frac{dE}{dS_{\perp} \cdot d\tau} \cdot \vec{e}_{\omega}. \quad (11)$$

Обозначим количество теплоты (энергии), которое проходит за счёт теплопроводности через всю поверхность  $S_{\perp}$ , перпендикулярную вектору  $\vec{q}$  в точке  $M_{S\perp}$  за конечный интервал времени  $\Delta\tau$ , с, как  $Q_{\perp}$ , Дж. Тогда, за бесконечно малый интервал времени  $d\tau$ , с, через  $S_{\perp}$  будет проходить бесконечно малое количество энергии  $dQ_{\perp}$ , Дж. По определению теплового потока за счёт теплопроводности  $N_{\perp}$ , Вт, через эту конечную поверхность  $S_{\perp}$  определяется формулой:

$$N_{\perp} = \frac{dQ_{\perp}}{d\tau} = (Q_{\perp})'_{\tau}, \quad (12)$$

где  $\frac{dQ_{\perp}}{d\tau}$  и  $(Q_{\perp})'_{\tau}$  – производная от величины  $Q_{\perp}$  по времени, Вт.

Очевидно, что через бесконечно малую часть  $dS_{\perp}$ , м<sup>2</sup>, всей поверхности  $S_{\perp}$  будет проходить бесконечно малая часть  $dN_{\perp}$ , Вт, всего потока  $N_{\perp}$ . Величина  $dN_{\perp}$  является дифференциалом теплового потока  $N_{\perp}$ , соответствующим бесконечно малому приращению площади  $S_{\perp}$  поверхности вокруг точки  $M_{S\perp}$  на  $dS_{\perp}$ . Соответственно  $dN_{\perp}$  вычисляется из (12) по известной формуле:

$$dN_{\perp} = (N_{\perp})'_{S\perp} \cdot dS_{\perp} = [(Q_{\perp})'_{\tau}]'_{S\perp} \cdot dS_{\perp}, \quad (13)$$

где  $(N_{\perp})'_{S\perp}$  – производная от  $N_{\perp}$  по  $S_{\perp}$ , Вт/м<sup>2</sup>.

Из определения локальной поверхностной плотности теплового потока для поверхности  $S_{\perp}$  с учётом (13) получаем:

$$q_n(M_{S\perp}) = \frac{dN_{\perp}}{dS_{\perp}} = [(Q_{\perp})'_{\tau}]'_{S\perp} = \frac{d}{dS_{\perp}} \left( \frac{dQ_{\perp}}{d\tau} \right) = \frac{d(dQ_{\perp})}{dS_{\perp} \cdot d\tau}, \quad (14)$$

где  $q_n(M_{S\perp})$  – значение локальной поверхностной плотности теплового потока  $N_{\perp}$ , проходящего через поверхность  $S_{\perp}$  в точке  $M_{S\perp}$ , Вт/м<sup>2</sup>.

В числителе (14) стоит величина  $d(dQ_{\perp})$ , Дж, которая по физическому смыслу равна элементарной энергии, переносимой за счёт теплопроводности, которая проходит через бесконечно малую площадку  $dS_{\perp}$  за бесконечно малое время  $d\tau$ . Это величина равна  $dE$ , входящей

в (7) и (10). Соответственно формула (14), с учётом (9), (8) и (6), преобразуется к виду:

$$\begin{aligned} q_n(M_{S\perp}) &= \frac{dN_{\perp}}{dS_{\perp}} = \frac{d(dQ_{\perp})}{dS_{\perp} \cdot d\tau} \cdot \frac{|\bar{\omega}_q(M_{S\perp})|}{|\bar{\omega}_q(M_{S\perp})|} = \frac{dE \cdot |\bar{\omega}_q(M_{S\perp})|}{dS_{\perp} \cdot d\tau \cdot |\bar{\omega}_q(M_{S\perp})|} = \\ &= \frac{dE}{dV} \cdot |\bar{\omega}_q(M_{S\perp})| = \rho_q(x, y, z, \tau) \cdot |\bar{\omega}_q| = |\bar{q}(x, y, z, \tau)|. \end{aligned} \quad (15)$$

С учётом (15) определение (5) может быть записано в виде:

$$\bar{q}(x, y, z, \tau) = \frac{dN_{\perp}}{dS_{\perp}} \cdot \vec{e}_{\omega}. \quad (16)$$

Равенство (16) позволяет сформулировать следующее определение: вектор плотности теплового потока  $\bar{q}$  в момент времени  $\tau$  в любой точке тела  $M$  с координатами  $x, y, z$  направлен в сторону переноса энергии за счёт теплопроводности, а его длина (модуль) равна отношению бесконечно малой части  $dN_{\perp}$  теплового потока  $N_{\perp}$ , проходящего через поверхность  $S_{\perp}$ , перпендикулярную к вектору  $\bar{q}$ , к соответствующему бесконечно малому приращению поверхности  $dS_{\perp}$  поверхности  $S_{\perp}$ , включающему точку  $M$ .

Величина в правой части равенства (16) находится по закону Фурье. Таким образом, определение (16) непосредственно позволяет найти важную для практических расчётов величину – локальную поверхностную плотность теплового потока  $q_n$  для одного частного случая, когда рассматриваемая поверхность перпендикулярна к вектору плотности теплового потока  $\bar{q}$ :

$$q_n(M_{S\perp}) = |\bar{q}(x, y, z, \tau)|. \quad (17)$$

В общем случае, при нахождении локальной поверхностной плотности теплового потока  $q_n$ , рассматривается некоторая поверхность  $S$ ,  $\text{м}^2$ , принадлежащая телу, в котором происходит теплопроводность, произвольным образом расположенная в пространстве. Расположение поверхности  $S$  в пространстве в любой точке  $M_s$ , принадлежащей  $S$  с координатами  $x, y, z$ , однозначно характеризуется ортом нормали  $\vec{n}_M$ , построенным в точке  $M_s$  к лицевой стороне поверхности  $S$ . В общем случае между вектором плотности теплового потока  $\bar{q}(x, y, z, \tau)$  и ортом  $\vec{n}_M$  образуется некоторый угол  $\phi$ , рад.

Тепловой поток, проходящий через всю поверхность  $S$ , обозначается как  $N$ , Вт. По определению значение локальной поверхностной плотности теплового потока  $q_n(M_s)$  в точке  $M_s$  поверхности  $S$  равно отношению дифференциала  $dN$ , Вт, теплового потока  $N$ , проходящего через бесконечно

малый участок  $dS$ , м<sup>2</sup>, поверхности  $S$ , включающий в себя точку  $M_S$ , к величине  $dS$  (дифференциальному  $S$ ):

$$q_n(M_S) = \frac{dN}{dS}. \quad (18)$$

Через рассматриваемую точку  $M_S$  проводится плоскость, перпендикулярная к орту  $\vec{n}_M$ . Проекция  $dS$  на эту плоскость обозначается как  $dS_{np}$ , м<sup>2</sup>. Из геометрического анализа можно показать, что отношение  $dS_{np}$  к  $dS$  равно единице, то есть то, что  $dS$  и  $dS_{np}$  практически неразличимы. Следовательно, элементарный тепловой поток  $dN$ , который проходит через  $dS$ , будет проходить и через  $dS_{np}$ .

В момент времени  $\tau$  в точке  $M_s$  скорость переноса энергии за счёт теплопроводности равна  $\vec{\omega}_q(x, y, z, \tau)$ . Известно, что любой вектор скорости можно разложить, например, на два составляющих вектора, перпендикулярных друг другу. Такое разложение скорости эквивалентно тому, что движение рассматривается как сумма двух происходящих одновременно перемещений: одно перемещение происходит в сторону первого вектора, второе – в сторону второго. Соответственно, вектор  $\vec{\omega}_q(x, y, z, \tau)$  может быть представлен в виде:

$$\vec{\omega}_q(x, y, z, \tau) = \vec{\omega}_q(x, y, x, \tau)_{\perp} + \vec{\omega}_q(x, y, z, \tau)_{\parallel}, \quad (19)$$

где  $\vec{\omega}_q(x, y, x, \tau)_{\perp}$  – составляющая скорости, перпендикулярная элементарной площадке  $dS_{np}$ , м/с;  $\vec{\omega}_q(x, y, z, \tau)_{\parallel}$  – составляющая скорости, параллельная элементарной площадке  $dS_{np}$ , м/с.

Очевидно, что энергия, переносимая за счёт теплопроводности, будет пересекать элементарную площадку  $dS_{np}$  только при наличии составляющей скорости  $\vec{\omega}_q(x, y, x, \tau)_{\perp}$ , так как за счёт составляющей  $\vec{\omega}_q(x, y, z, \tau)_{\parallel}$  энергия будет переноситься вдоль  $dS_{np}$ , не пересекая её.

Из (5) следует, что подобным образом раскладывается вектор плотности теплового потока:

$$\vec{q}(x, y, z, \tau) = \vec{q}(x, y, x, \tau)_{\perp} + \vec{q}(x, y, z, \tau)_{\parallel}, \quad (20)$$

где  $\vec{q}(x, y, x, \tau)_{\perp}$  – составляющая вектора, перпендикулярная элементарной площадке  $dS_{np}$ , Вт/м<sup>2</sup>;  $\vec{q}(x, y, z, \tau)_{\parallel}$  – составляющая вектора, параллельная элементарной площадке  $dS_{np}$ , Вт/м<sup>2</sup>.

*Результаты исследований.* Очевидно, что элементарный тепловой поток  $dN$ , проходящий через  $dS_{np}$ , существует только благодаря наличию составляющей  $\vec{q}(x, y, x, \tau)_{\perp}$  вектора  $\vec{q}(x, y, x, \tau)$ .

В любой конкретной точке  $M_S$ , принадлежащей поверхности  $S$ , для составляющей  $\vec{q}(x, y, x, \tau)_\perp$  и элементарной площадки  $dS_{\text{пр}}$  выполняются условия, соответствующие частному случаю (17). Следовательно, в общем случае локальная поверхностная плотность теплового потока  $q_n(M_S)$  в любой точке  $M_S$ , принадлежащей произвольно выбранной в теле поверхности  $S$ , равняется модулю вектора  $\vec{q}(x, y, x, \tau)_\perp$ :

$$q_n(M_S) = |\vec{q}(x, y, x, \tau)_\perp|. \quad (21)$$

Модуль вектора в правой части (21) вычисляется по очевидной формуле:

$$|\vec{q}(x, y, z, \tau)_\perp| = |\vec{q}(x, y, z, \tau)| \cdot \cos \varphi. \quad (22)$$

После подстановки (22) в (21) получается формула, позволяющая в самом общем случае находить значение локальной поверхностной плотности теплового потока при известном поле вектора плотности теплового потока  $\vec{q}(x, y, x, \tau)$ :

$$q_n(M_S) = |\vec{q}(x, y, z, \tau)| \cdot \cos \varphi. \quad (23)$$

Следует отметить, что величина  $q_n$  не формирует в пространстве скалярное поле, так как её значение в некоторой точке зависит от того, какой конкретной поверхности эта точка принадлежит.

Формула (23), с привлечением закона Фурье, позволяет находить распределение локальной поверхностной плотности теплового потока  $q_n$  на любой поверхности, принадлежащей телу, в котором наблюдается теплопроводность, в частности, на наружных поверхностях тела.

#### *Выводы.*

1. С помощью физической модели проанализирована роль скорости, с которой в сплошной среде распространяется энергия за счёт теплопроводности.

2. На базе общего определения вектора плотности энергии дано определение вектора плотности теплового потока и получена формула для определения объёмной плотности энергии, переносимой за счёт теплопроводности.

3. Из общих определений строго выведена формула, позволяющая для общего случая находить распределение локальной поверхностной плотности теплового потока при известном поле вектора плотности теплового потока.

*Конфликт интересов.* Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Библиографический список**

Бронштейн И.Н., Семеняев К.А. Справочник по математике. М.: Гос-техиздат, 1953. 608 с.

- Зигель Р. Теплообмен излучением. М.: Мир, 1975. 934 с.
- Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1970. 904 с.
- Сивухин Д.В. Общий курс физики. В 5 т. Т. 1. Механика. М.: МФТИ, 2005. 560 с.
- Умов Н.А. Математика. Механика. Физика. Астрономия. М.: Изд-во технико-теоретической литературы, 1950. 446 с.
- Цветков Ф.Ф. Тепломассообмен. М.: МЭИ, 2011. 562 с.

### **References**

- Bronstein I.N., Semendyaev K.A.* Handbook of Mathematics. М.: Gostekhiteoretizdat, 1953. 608 p. (In Russ.)
- Loitsyansky L.G.* Mechanics of liquid and gas. М.: Nauka, 1970. 904 p. (In Russ.)
- Siegel R.* Heat transfer by radiation. М.: Mir, 1975. 934 p. (In Russ.)
- Sivukhin D.V.* General course of physics. In 5 vols. Vol. 1. Mechanics. М.: MFTI, 2005. 560 p. (In Russ.)
- Tsvetkov F.F.* Heat and mass transfer. М.: MEI, 2011. 562 p. (In Russ.)
- Umov N.A.* Mathematics. Mechanics. Physics. Astronomy. М.: Publishing house of technical and theoretical literature, 1950. 446 p. (In Russ.)

*Материал поступил в редакцию 01.03.2023*

---

**Куликов А.А., Иванова И.В., Дюкова И.Н.** Методологические особенности описания процессов теплопроводности // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 249. С. 166–176. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.166-176

В физической модели процесса теплопроводности анализируется роль скорости, с которой в сплошной среде распространяется энергия. На базе общего определения вектора плотности энергии даётся основное определение вектора плотности теплового потока и выводится формула для определения объёмной плотности энергии, переносимой за счёт теплопроводности. Для общего случая выводится формула расчёта распределения локальной поверхностной плотности теплового потока на произвольной поверхности, принадлежащей телу, при известном поле вектора плотности теплового потока.

**Ключевые слова:** теплообмен, теплопроводность, вектор плотности теплового потока, скорость распространения энергии.

**Kulikov A.A., Ivanova I.V., Dyukova I.N.** Methodological features of the description of thermal conductivity processes. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 249, pp. 166–176 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.166-176

In the physical model, the role of the velocity at which energy propagates in a continuous medium is analyzed in the process of thermal conductivity. Based on the general definition of the energy density vector, the basic definition of the heat flux

density vector is given and a formula is derived for determining the volumetric energy density transferred due to thermal conductivity. For the general case, a formula is derived for calculating the distribution of the local surface heat flux density on an arbitrary surface belonging to a body with a known field of the heat flux density vector.

**Keywords:** heat transfer, thermal conductivity, heat flux density vector, energy propagation velocity.

---

**КУЛИКОВ Александр Александрович** – заведующий кафедрой промышленной энергетики Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, старший научный сотрудник, кандидат технических наук. ORCID: 0009-0009-6113-7397. SPIN-код: 7746-2999. Author ID: 967857.

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

**KULIKOV Alexander A.** – PhD (Technical), Associate Professor, Head of the Department of Industrial Energy, St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0009-0009-6113-7397. SPIN-код: 7746-2999. Author ID: 967857.

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

**ИВАНОВА Ирена 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. Author ID: 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-код: 9424-7866. Author ID: 955471.

194021. Institute 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. Author ID: 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-код: 1314-2594. Author ID: 961143.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: i.n.dyukova@mail.ru

И.К. Говядин, А.Н. Чубинский, А.С. Алексеев

## МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДИАМЕТРОВ ДЕРЕВЬЕВ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

*Введение.* В современном лесном хозяйстве, где стремление к устойчивому использованию ресурсов является одним из приоритетов, применение информационных технологий становится критически важным фактором. Одним из вызовов, стоящих перед специалистами в области лесного сектора экономики и исследователями, является точная оценка лесных ресурсов для эффективной заготовки и последующей переработки древесины.

Целью исследования является разработка метода распознавания стволов деревьев и измерения их диаметров с использованием современных информационных технологий. Наше внимание направлено на применение этого метода для более эффективной и точной оценки объема древесины с целью улучшения производственных процессов и уменьшения потерь в ходе последующей переработки. В дальнейшем расширение возможностей системы для оценки пород деревьев, их сбега, формы и кривизны стволов и других структурных особенностей позволит не только уточнить объем деловой древесины, доступной на лесосеке, но и повысить эффективность заготовки, предоставляя заготовителям детализированную информацию о качестве и количестве лесных ресурсов.

Кроме этого, повышение точности определения запасов древесины имеет значение для решения вопросов, связанных с ролью лесов в регулировании и компенсации возможных изменений климата, так как пуль и потоки углерода в лесных экосистемах определяются на основе их таксационных характеристик.

Для успешной реализации такого подхода крайне важно собрать обширный и разнообразный набор данных, который будет включать изображения и 3D-модели деревьев, снятые в различных условиях и локациях. Эти данные станут основой для тренировки и тестирования ИИ-моделей, обеспечивая их способность адаптироваться к реальным условиям работы на местности.

Ключевым моментом проекта является не только разработка алгоритма распознавания и анализа, но и создание интегрированной системы, спо-

собой обрабатывать полученные данные и предоставлять их в удобной форме для конечных пользователей. Это предполагает разработку пользовательского интерфейса и программной платформы, которые могут эффективно интегрировать различные источники информации, обеспечивая работникам лесного хозяйства и заготовителям доступ к актуальным и точным данным о лесных ресурсах.

В последние десятилетия, благодаря расширению применения искусственного интеллекта, в области распознавания и измерения физических объектов произошли революционные изменения в методах и подходах. Разработаны разнообразные подходы для автоматизации процессов оценки размеров и характеристик этих объектов, которые обеспечивают повышение точности и эффективности измерений [Войтов, 2023; Жук, Угрюмов, 2023; Портнов и др., 2022; Song et al., 2021; Grondin et al., 2022; Putra et al., 2021].

Среди методов распознавания стволов деревьев и измерения их диаметров технологии компьютерного зрения и машинного обучения играют ключевую роль. Эти методы включают в себя: обработку изображений и анализ текстур; выделение контуров; стереовидение и 3D-моделирование; глубокое обучение и нейронные сети и т. д.

Алгоритмы компьютерного зрения анализируют характеристики изображений, такие как контраст, цвет и текстура, для выделения деревьев на их природном фоне и определения их геометрических параметров. Это включает расчеты, основанные на перспективных искажениях и других визуальных маркерах, что позволяет точно измерять диаметр стволов деревьев даже в сложных лесных условиях [Селянкин, 2021].

Существующие методы измерений диаметра деревьев действительно продемонстрировали в последние годы значительные успехи [Лебедев, 2023; Sandim et al., 2023; Ficko, 2020], которые основаны на применении технологий искусственного интеллекта и компьютерного зрения. Однако важно понимать, что каждый из этих методов имеет свои преимущества и ограничения. Выбор конкретного метода обычно зависит от ряда факторов, включая специфические требования задачи, доступные ресурсы и условия окружающей среды. Например, методы, основанные на лазерных радарных данных, могут предложить высокую точность в трехмерном измерении стволов, но их применение может быть ограничено из-за высокой стоимости оборудования и обработки данных. С другой стороны, методы, основанные на обработке изображений, могут быть более доступными и гибкими, но их точность может варьироваться в зависимости от условий освещения и числа стволов в кадре съемки.

В свете этих соображений, нашей целью является разработка собственной системы распознавания стволов деревьев и измерения их диаметров, которая будет оптимизирована под конкретные природные условия и требования к точности измерений. Эта система будет включать в себя специализированную базу данных, содержащую информацию о местных видовых особенностях деревьев, их геометрии и фактуре коры, что позволит повысить точность идентификации и измерений. Благодаря обучению на собственных данных, система сможет учитывать региональные различия в высоте и форме деревьев, что является ключевым фактором для эффективного и точного измерения их диаметра [Говядин, Каримов, 2023; Говядин и др., 2023].

Разработка такой системы откроет перед работниками лесного хозяйства и лесозаготовителями новые возможности для повышения эффективности работы, позволяя им не только точно оценивать объем заготавливаемой древесины, но и оптимизировать процессы заготовки и переработки. Система будет способствовать более устойчивому управлению лесными ресурсами, обеспечивая высокую точность данных для экологического планирования, оценки запасов и мониторинга состояния лесов. В конечном счете, наша система станет инструментом, позволяющим работникам лесного хозяйства и лесозаготовителям не только повысить производительность и экономическую эффективность, но и внести вклад в сохранение лесных экосистем за счет более осознанного и ответственного подхода к использованию лесных ресурсов.

*Материалы и методика исследования.* Чтобы оценить эффективность нашего метода, сравнивали результаты, полученные с помощью комплекса технических средств, с результатами, полученными с помощью традиционных методов инвентаризации лесов.

Диаметр ствола дерева измерялся на высоте 1,3 метра от комля, что соответствует уровню груди человека среднего роста. Используя этот показатель диаметра, было создано множество таксационных таблиц, которые включают видовые числа, объемы стволов, динамику роста, а также сортиментные и товарные характеристики.

Для измерения диаметра ствола на высоте груди применяют разные инструменты и методы. В нашем случае определяли длину окружности дерева с помощью измерительной ленты (рис. 1). Вначале измерялась длина окружности ствола (обхват). Диаметр ствола находился делением измеренной длины окружности на постоянное число  $\pi$ .



Рис. 1. Ручные измерения в парке СПбГЛТУ  
Fig. 1. Manual measurements in the SPbSFTU park

Оценка проводилась на территории парка Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. Сбор данных проводился в период с декабря 2023 года по конец января 2024 года.

Каждый участок был тщательно разбит на зоны, учитывая густоту деревьев, их размеры и распределение по территории. Затем, в пределах каждой зоны, были выбраны участки с наиболее схожими диаметрами стволов деревьев. Это позволило получить репрезентативные данные о диаметрах стволов на каждом участке, учитывая разнообразие деревьев и их характеристики на изучаемой территории.

Выбор участков с наиболее близкими диаметрами стволов позволил снизить влияние переменных, таких как возраст и порода деревьев, и обеспечить более точные и сопоставимые результаты измерений. Этот подход к сегментации участков обеспечил надежную основу для дальнейшего анализа и интерпретации полученных данных.

Данные с мест, где проводились измерения, и отчеты были организованы в таблицы Excel по участкам. Затем информация была перенесена в статистическое программное обеспечение. При обработке данных также учитывалась плотность древостоя.

*Результаты исследования.* Полученные данные свидетельствуют о том, что оптимальными условиями для проведения измерений с использо-

ванием специализированных технических устройств являются зрелые лесные массивы с низкой степенью плотности древостоев, характеризующиеся специфической пространственной структурой (то есть, равномерным расположением деревьев на территории), находящиеся в равнинных условиях рельефа местности и отличающиеся отсутствием плотного подлеска. Факторы, такие как плотность древостоя и присутствие обильного подроста и подлеска, в настоящее время оказывают значительное влияние на точность измерений, поскольку для корректного функционирования алгоритмов необходимы четкие визуальные образы, позволяющие дифференцировать стволы деревьев без их взаимного перекрытия, что является предпосылкой для точного распознавания и измерения.

В рамках проведенного анализа данных наблюдалось, что параметры яркости и контрастности, диктуемые уровнем освещенности, оказывают значимое воздействие на разнообразные компоненты исследуемой зоны, а также выступают в роли ограничивающих факторов для достижения оптимальной точности. Было выявлено, что колебания цветового спектра могут существенно влиять на точность распознавания объектов в полученных визуальных данных.

В ответ на требование повышенной точности идентификации деревьев на фотографиях был разработан алгоритм, специализирующейся на создании изображений с предварительно заданными уровнями контрастности. Данный алгоритм целенаправленно ориентирован на оптимизацию процесса идентификации деревьев, способствуя повышению общей точности аналитических операций. Это особенно актуально в контексте использования искусственного интеллекта, для распознавания и измерения диаметра стволов деревьев на основе визуальных данных (рис. 2).

Наш алгоритм объединяет методики коррекции цветовой палитры и усиления контраста, специально оптимизированные для анализа фотографий с деревьями. В его основу заложены следующие процедуры:

- *Конвертация цветового пространства:* Первоначальные изображения трансформируются в выбранное цветовое пространство, что улучшает манипуляции с контрастом и освещенностью для повышения эффективности обработки.

- *Регулировка яркости и насыщенности:* Применение методов коррекции яркости и насыщенности повышает выразительность деревьев, делая их более отчетливыми на природном фоне.

- *Усиление контрастности:* Интеграция алгоритмов для увеличения контрастности подчеркивает границы и текстурные особенности деревьев, упрощая их идентификацию.



Рис. 2. Увеличенное изображение накладки стволов деревьев и обучение модели  
Fig. 2. Enlarged image of tree trunks overlay and model training

• *Адаптивная обработка изображений*: Алгоритм адаптируется к содержанию изображения, сохраняя природную эстетику сцен и улучшая визуализацию деревьев в разнообразных условиях, включая зимние сценарии.

Для дальнейшего усовершенствования распознавания деревьев алгоритм включает дополнительные функции:

- *сегментацию фона с использованием технологии ROI (Region of Interest)*. Алгоритм эффективно выделяет деревья, применяя сегментацию фона с акцентом на интересующие области (ROI), что существенно уменьшает влияние окружающей среды на процесс идентификации.

- *автоматическую настройку яркости и контрастности*. Параметры яркости и контрастности корректируются автоматически в соответствии с уровнем освещения и особенностями изображения, гарантируя стабильные и верные результаты.

Эти усовершенствования, совместно с механизмами коррекции контрастности, делают подход к идентификации деревьев на изображениях эффективным и точным по сравнению с традиционными методами.

Результаты исследований (табл. 1) показывают, что применение данной технологии демонстрирует ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами инвентаризации.

Применение методологий компьютерного зрения в задачах аналитики и оценки состояния лесных экосистем демонстрирует значительные преимущества перед традиционными подходами в плане объема обрабатываемых данных и глубины их анализа. Данная технология, интегрируя алгоритмы искусственного интеллекта, способствует комплексному изучению состояния лесных массивов, обеспечивая обработку и интерпретацию многомерных датасетов, состоящих из разнородных источников информации. Такой подход значительно увеличивает презентативность выборки и обеспечивает высокую степень объективности оценок за счет анализа объемов данных, недоступных для традиционной экспертной оценки.

Таблица 1

**Сравнение измерений диаметра стволов деревьев ручным способом (РС) и искусственным интеллектом (ИИ)**

**Comparison of tree trunk diameter measurements manually (MS) and artificial intelligence (AI)**

| ID дерева  | Диаметр, (ИИ), см | Диаметр (РС), см | Разница в измерениях, см | Эффективность       |
|--|-------------------|------------------|--------------------------|---------------------|
| 1  | 45,2              | 45,5             | -0,3                     | 0,993               |
| 2  | 30,1              | 30,0             | 0,1                      | 0,997               |
| 3  | 50,5              | 51,0             | -0,5                     | 0,990               |
| 4  | 40,0              | 39,8             | 0,2                      | 0,995               |
| 5  | 35,3              | 35,5             | -0,2                     | 0,994               |
| 6  | 53,3              | 53,6             | -0,3                     | 0,994               |
| 7  | 35,7              | 36,0             | -0,3                     | 0,992               |
| ...  | ...               | ...              | ...                      | ...                 |
| 28   | 45,3              | 45,6             | -0,3                     | 0,993               |
| 29   | 46,1              | 46,4             | -0,3                     | 0,994               |
| 30   | 35,2              | 35,5             | -0,3                     | 0,992               |
| Средняя эффективность измерений диаметра деревьев: |                   |                  |                          | 0,9841 (или 98,41%) |

Кроме того, автоматизация процессов сбора, обработки и анализа информации минимизирует человеческое участие, снижая тем самым вероятность субъективных ошибок и повышая эффективность исследовательских процедур. В контексте сохранения и управления лесными ресурсами применение данного метода открывает новые перспективы для проведения научно обоснованной оценки состояния лесных экосистем, их мониторинга и прогнозирования изменений, обусловленных антропогенным воздействием и климатическими факторами.

Измеренные ручным способом диаметры деревьев принимались за их истинные значения. Для оценки качества определения диаметров деревьев на основе данного этапа обучения ИИ вычислялись систематическая и случайная ошибки измерений:

- Систематическая ошибка (смещение) представляет собой среднюю разницу между измерениями, сделанными двумя способами. При наличии она указывает знак и величину постоянной ошибки, которую вносит предлагаемый метод измерения.
- Случайная ошибка оценивается как стандартное отклонение разностей между измерениями, сделанными методом ИИ и ручным способом.

В нашем случае систематическая ошибка измерений диаметра стволов деревьев составляет  $-0,58$  см, что указывает на занижение диаметров деревьев, измеренных с помощью искусственного интеллекта. Случайная ошибка составляет  $0,83$  см, отражая изменчивость и непредсказуемость ошибок при измерениях методом ИИ.

Систематические и случайные ошибки не должны превосходить нормативов, установленных лесоустроительной инструкцией\*. Средние диаметры совокупности измеренных деревьев составляют  $42,4$  и  $43,0$  см при измерениях методом ИИ и ручным способом, соответственно. Систематическая ошибка в этом случае равна  $1,4$  % при допустимой величине для самого точного глазомерно-измерительного метода таксации  $5\%$ , случайная –  $2\%$  при допустимой величине  $10\%$ .

Таким образом, можно сделать вывод, что метод измерения диаметров деревьев, основанный на применении технологий искусственного интеллекта, удовлетворяет требованиям по точности измерений согласно действующим нормативно-правовым документам.

Из выражения (1) видно, что эффективность в данном контексте была рассчитана как отношение меньшего из двух измерений диаметра дерева

---

\* Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 5.08.2022 № 510 «Об утверждении лесоустроительной инструкции».

(ИИ или ручное измерение) к большему из этих двух значений. Этот расчёт позволяет оценить, насколько близки друг к другу результаты измерений, выполненных разными методами. Формула для расчёта эффективности выглядит следующим образом:

$$\text{Эффективность} = \frac{\min(\text{Диаметр (ИИ)}, \text{Диаметр (ручное измерение)})}{\max(\text{Диаметр (ИИ)}, \text{Диаметр (ручное измерение)})}. \quad (1)$$

Эффективность выражается в долях единицы (или в процентах, если умножить на 100). Значение 1 (или 100%) указывает на идеальное совпадение измерений, выполненных с помощью ИИ и ручным методом, что означает максимальную эффективность измерительных методов. Чем ближе значение эффективности к 1, тем меньше разница между двумя методами измерения, и наоборот, чем значение меньше, тем больше разница между измерениями.

Анализ данных показал, что в большинстве случаев разница между измерениями, выполненными с помощью ИИ и традиционным ручным способом, не превышает критически значимых порогов, что свидетельствует о высокой точности и надёжности алгоритмов ИИ для выполнения данного типа задач. Показатель эффективности в большинстве случаев близок к единице, что демонстрирует высокую степень согласованности между методами измерения.

Для статистического анализа данных по измерению диаметра деревьев с использованием искусственного интеллекта и ручными методами рассмотрим следующие статистические показатели (табл. 2):

Таблица 2

**Результаты статистического анализа данных**

**Results of statistical data analysis**

| №<br>п/п | Наименование           | Искусственный ин-<br>теллект | Ручное измерение |
|----------|------------------------|------------------------------|------------------|
| 1        | Среднее значение       | 42,43                        | 43,01            |
| 2        | Стандартное отклонение | 9,06                         | 8,79             |
| 3        | Минимальное значение   | 28,1                         | 30,0             |
| 4        | Максимальное значение  | 58,7                         | 59,0             |
| 5        | 25% квартиль           | 35,23                        | 35,5             |
| 6        | 75% квартиль           | 48,28                        | 49,48            |
| 7        | Коэффициент вариации   | 21,35%                       | 20,43%           |

1. Среднее значение – показывает средний размер диаметра деревьев, измеренный каждым методом.
2. Стандартное отклонение – отражает степень разброса измерений относительно среднего значения.
3. Минимальное и максимальное значения – позволяют оценить диапазон измеренных диаметров.
4. Квартили (25-й и 75-й) – информируют о распределении значений диаметра внутри выборки, позволяя увидеть, где сосредоточена основная масса измерений.
5. Коэффициент вариации – это отношение стандартного отклонения к среднему значению, выраженное в процентах, показывает относительный разброс данных вокруг среднего значения и используется для сравнения степени вариабельности между различными наборами данных.

Центральная тенденция: средние значения диаметра деревьев, измеренные с помощью ИИ и ручными методами, близки друг к другу, что указывает на согласованность результатов обоих методов.

Разброс данных: стандартные отклонения для обоих методов также схожи, что свидетельствует о сопоставимом уровне вариабельности измерений в обеих группах.

Коэффициент вариации показывает, что относительный разброс данных вокруг среднего значения сопоставим между методами измерения, с незначительно более высоким значением для измерений, выполненных с помощью ИИ. Это может указывать на чуть большую вариативность в измерениях ИИ по сравнению с ручными измерениями.

В целом результаты статистического анализа подтверждают высокую степень согласованности и сопоставимость между измерениями диаметра деревьев, выполненными с помощью искусственного интеллекта и традиционными ручными методами. Это демонстрирует потенциал интеграции алгоритмов ИИ в процессы сбора и анализа данных для повышения эффективности и точности измерений.

Анализ корреляции проводился для определения степени зависимости между двумя переменными. В нашем случае исследуем корреляцию между результатами измерений диаметра деревьев, выполненных с помощью искусственного интеллекта и ручными методами. Для этого используем коэффициент корреляции Пирсона.

Корреляция считается значимой на уровне 0,05 (5%) или 0,01 (1%), если р-значение (вероятность ошибки первого рода) соответствующего статистического теста меньше этих порогов.

Коэффициент корреляции Пирсона между результатами измерений диаметра деревьев, выполненных с использованием искусственного интеллекта, и ручными методами, составляет 0,996. Это указывает на очень вы-

сокую положительную линейную корреляцию между измерениями диаметра деревьев, выполненными с помощью ИИ и ручными методами. Такой высокий коэффициент корреляции говорит о том, что с увеличением значений одной переменной соответственно увеличиваются и значения другой переменной, что подтверждает согласованность и взаимозаменяемость обоих методов измерения в данном исследовании.

Сравнительный анализ средних значений диаметра деревьев, измеренных с помощью искусственного интеллекта и ручными методами, был выполнен с использованием t-критерия Стьюдента для независимых выборок.

Значение t-критерия Стьюдента, равное  $-0,253$ , указывает на незначительную разницу между средними значениями диаметра, измеренными различными методами. Отрицательное значение этой статистики свидетельствует о том, что среднее значение, полученное с помощью ИИ, незначительно ниже по сравнению с результатами ручных измерений.

Значение вероятности  $p$ , равное  $0,801$ , превышает общепринятый порог статистической значимости ( $0,05$  или  $5\%$ ), что демонстрирует отсутствие статистически значимых различий между сравниваемыми группами данных.

В рамках исследования представлены два графика для анализа данных измерений диаметра деревьев, выполненных с использованием искусственного интеллекта и ручными методами.

График распределения измерений диаметра деревьев (рис. 3) показывает, что оба метода измерения имеют схожие распределения с небольшими различиями в плотности распределения. Это указывает на то, что оба метода предоставляют сопоставимые результаты с некоторым перекрытием в измеренных значениях диаметра деревьев.

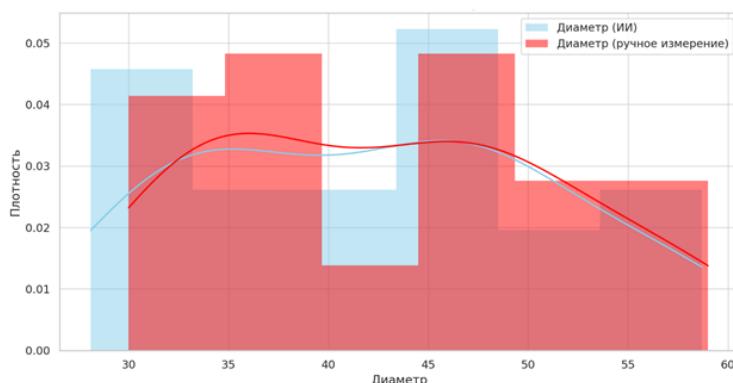


Рис. 3. График плотности распределения измерений диаметра деревьев

Fig. 3. Density distribution plot of tree diameter measurements

График корреляции между ИИ и ручными измерениями диаметра деревьев (рис. 4) демонстрирует сильную линейную зависимость между результатами, полученными двумя методами. Большинство точек данных тесно сгруппированы вокруг диагонали, что подтверждает высокий уровень корреляции, ранее рассчитанный как 0,996.

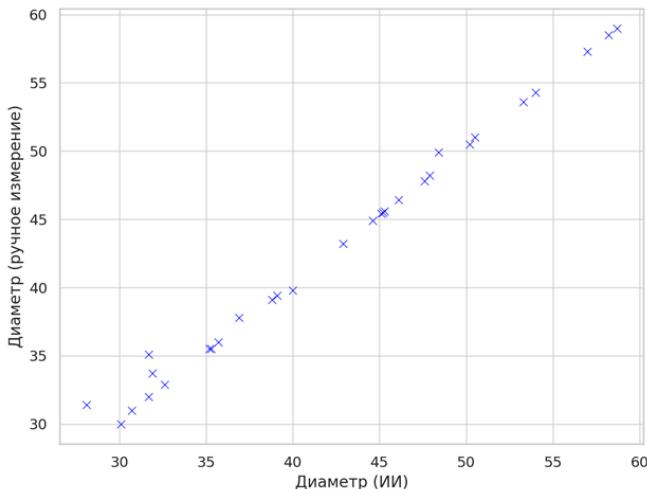


Рис. 4. График корреляции между ИИ и ручными измерениями

Fig. 4. Correlation plot between AI and manual measurements

Задача, связанная с сегментацией взаимно перекрывающихся объектов на изображениях, в данном контексте – деревьев, представляет собой значимый вызов для технологии ИИ, для решения которого были разработаны многочисленные методологии:

расширенное обнаружение и сегментация, мультиперспективный анализ, применение методов обработки изображений и предварительной фильтрации, интерактивные методы коррекции, интеграция дополнительных данных, обучение с учителем, усиленное глубокое обучение, оптимизация параметров модели.

**Заключение.** В ходе исследования было проведено сравнение методик измерения диаметров стволов деревьев с использованием технологий искусственного интеллекта с традиционными ручными методами измерения. Полученные данные демонстрируют, что результаты, полученные с помощью искусственного интеллекта, во многом приближены к значениям, за-

фиксированным в ходе ручных измерений, что подтверждает высокий потенциал применения данной технологии в лесном хозяйстве.

Однако, несмотря на значительные достижения в области автоматизации измерений, были выявлены определенные трудности, в частности, проблема распознавания отдельных деревьев при их плотном, одновременном расположении относительно друг друга. В таких случаях система может воспринимать несколько стволов как единый объект, что затрудняет точное измерение диаметра ствола дерева.

Для преодоления этого барьера предлагается в дальнейшем использовать беспилотные летательные аппараты (БПЛА) для сбора визуальных данных. Преимущество данного подхода заключается в возможности получения видеоматериалов и фотографий с различных ракурсов, что позволяет более детально рассмотреть каждое дерево и определить его параметры с высокой степенью точности. Использование БПЛА не только упростит процесс идентификации и измерения диаметров стволов в условиях их плотной посадки, но и значительно повысит эффективность исследований лесных массивов в целом [Говядин, 2023].

Таким образом, сочетание современных технологий и возможностей БПЛА открывает новые перспективы для автоматизации и усовершенствования методик измерения и анализа лесных ресурсов, способствуя повышению точности и объективности получаемых данных.

Для повышения точности и надёжности измерений рекомендуется развитие и оптимизация алгоритмов ИИ, а также проведение дополнительных исследований с увеличенным объёмом данных. Это поможет улучшить адаптацию технологий ИИ к специфическим условиям различных типов лесных экосистем.

Исследование выполнено в контексте участия ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова» во Всероссийском инновационном проекте государственного значения (ВИП ГЗ) «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ».

*Конфликт интересов.* Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### **Библиографический список**

Войтов Д.Ю., Васильев С.Б., Кормилицын Д.В. Разработка технологии определения породы деревьев с применением компьютерного зрения // Лесной вестник. 2023. Т. 27, № 1. С. 60–66. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-60-66. EDN: PXEBDF.

*Говядин И.К.* Инновационные подходы к сбору данных о высотах и диаметрах деревьев в насаждениях // Перспективы развития лесного комплекса : сб. науч. трудов Междунар. науч.-практич. конференции, Брянск, 18–19 декабря 2023 года. С. 179–182. EDN: JWJABM.

*Говядин И.К., Каримов Б.М.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023686447 Российская Федерация. Система учета и анализа : № 2023686474 : заявл. 05.12.2023 : опубл. 06.12.2023; заяв. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова». EDN: FJVAWI.

*Говядин И.К., Каримов Б.М., Шеремет В.А.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023612089 Российская Федерация. Система визуализации данных : № 2022668020 : заявл. 30.09.2022 : опубл. 30.01.2023. EDN: QVAQKV.

*Жук К.Д., Угрюмов С.А.* Выбор оптимального алгоритма машинного обучения для задачи классификации породы ствола дерева // Цифровые технологии в лесном секторе: матер. IV Всерос. науч.-технич. конференции, Санкт-Петербург, 19–20 октября 2023 года. С. 32–34. EDN: WAQLFH.

*Лебедев А.В.* Инвентаризация древесных насаждений урбанизированных территорий с использованием смартфона // Лесотехнический журнал. 2023. Т. 13. № 3 (51). С. 56–70. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/5>.

*Портнов А.М., Иванова Н.В., Шашков М.П.* Опыт использования нейронной сети DeepForest для детектирования деревьев в широколиственном лесу // Математическая биология и биоинформатика: докл. IX Междунар. конференции, Пущино, 17–19 октября 2022 года. Т. 9. С. 211–216. DOI: 10.17537/icmbb22.12. EDN: ODUVAY.

*Селянкин В.В.* Компьютерное зрение. Анализ и обработка изображений: учебное пособие для вузов. 2-е изд., стер. СПб.: Лань, 2021. 152 с.

*Ficko A.* Bayesian Evaluation of Smartphone Applications for Forest Inventories in Small Forest Holdings // Forests. 2020. 11. P. 1148. DOI: 10.3390/f11111148.

*Grondin V., Fortin J.-M., Pomerleau F., Giguère Ph.* Tree Detection and Diameter Estimation Based on Deep Learning. 2022. DOI: 10.1093/forestry/cpac043.

*Putra B., Indarto I., Marhaenanto B., Janna N., Yualianto, Soedibyo D.* The use of computer vision to estimate tree diameter and circumference in homogeneous and production forests using a non-contact method // Forest Science and Technology. 2021. 17. 10.1080/21580103.2021.1873866.

*Sandim A., Amaro M., Silva M., Cunha J., Morais S., Marques A., Ferreira A., Louzada J., Fonseca T.* New Technologies for Expedited Forest Inventory Using Smartphone Applications // Forests. 2023. 14. DOI: 10.3390/f14081553.

*Song C., Yang B., Zhang L. et al.* A handheld device for measuring the diameter at breast height of individual trees using laser ranging and deep-learning based image recognition. Plant Methods. 2021. 17, 67. <https://doi.org/10.1186/s13007-021-00748-z>.

*Tatsumi Sh., Yamaguchi K., Furuya N.* Forest Scanner: A mobile application for measuring and mapping trees with LiDAR-equipped iPhone and iPad. *Methods in Ecology and Evolution*. 2022. 14. 10.1111/2041-210x.13900.

## References

*Ficko A.* Bayesian Evaluation of Smartphone Applications for Forest Inventories in Small Forest Holdings. *Forests*, 2020, 11, p. 1148. DOI: 10.3390/f11111148.

*Govyadin I.K.* Innovative approaches to collecting data on the heights and diameters of trees in plantations. *Prospects for the development of the forestry complex*: collection of scientific papers of the international scientific and practical conference, Bryansk, December 18–19, 2023, pp. 179–182. EDN JWJABM. (In Russ.)

*Govyadin I.K., Karimov B.M.* Certificate of state registration of a computer program No. 2023686447 Russian Federation. Accounting and analysis system: No. 2023686474: application. 12/05/2023: publ. 12/06/2023; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Saint-Petersburg State Forest Technical University». EDN FJVAWI. (In Russ.)

*Govyadin I.K., Karimov B.M., Sheremet V.A.* Certificate of state registration of a computer program No. 2023612089 Russian Federation. Data visualization system: No. 2022668020: application. 09/30/2022: publ. 01/30/2023. EDN QVAQKV. (In Russ.)

*Grondin V., Fortin J.-M., Pomerleau F., Giguère Ph.* Tree Detection and Diameter Estimation Based on Deep Learning. 2022. DOI: 10.1093/forestry/cpac043.

*Lebedev A.V.* Inventory of tree plantations in urban areas using a smartphone. *Forestry Journal*, 2023, vol. 13, no. 3 (51), pp. 56–70. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/5>. (In Russ.)

*Portnov A.M., Ivanova N.V., Shashkov M.P.* Experience of using the DeepForest neural network for detecting trees in a broad-leaved forest, *Mathematical biology and bioinformatics*: Reports of the IX International Conference, Pushchino, October 17–19, 2022, vol. 9, pp. 211–216. DOI: 10.17537/icmmb22.12. EDN: ODUVAY. (In Russ.)

*Putra B., Indarto I., Marhaenanto B., Janna N. Yualianto, Soedibyo D.* The use of computer vision to estimate tree diameter and circumference in homogeneous and production forests using a non-contact method. *Forest Science and Technology*, 2021, 17. 10.1080/21580103.2021.1873866.

*Sandim A., Amaro M., Silva M., Cunha J., Morais S., Marques A., Ferreira A., Louzada J., Fonseca T.* New Technologies for Expedited Forest Inventory Using Smartphone Applications. *Forests*, 2023, 14. DOI: 10.3390/f14081553.

*Selyankin V.V.* Computer vision. Image analysis and processing: textbook for universities. 2nd ed., erased. St. Petersburg: Lan, 2021. 152 p. (In Russ.)

*Song C., Yang B., Zhang L. et al.* A handheld device for measuring the diameter at breast height of individual trees using laser ranging and deep-learning based image recognition. *Plant Methods*, 2021, 17, 67. <https://doi.org/10.1186/s13007-021-00748-z>.

*Tatsumi Sh., Yamaguchi K., Furuya N. Forest Scanner: A mobile application for measuring and mapping trees with LiDAR-equipped iPhone and iPad. Methods in Ecology and Evolution, 2022, 14. 10.1111/2041-210x.13900.*

*Voitov D.Yu., Vasilyev S.B., Kormilitsyn D.V. Development of technology for determining tree species using computer vision. Forest Bulletin, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 60–66. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-60-66. EDN: PXEBDF. (In Russ.)*

*Zhuk K.D., Uglyumov S.A. Selection of the optimal machine learning algorithm for the task of classifying tree trunk species. Digital technologies in the forest sector: materials of the IV All-Russian scientific and technical conference, St. Petersburg, October 19–20, 2023, pp. 32–34. EDN WAQLFH. (In Russ.)*

*Материал поступил в редакцию 03.04.2024*

---

**Говядин И.К., Чубинский А.Н., Алексеев А.С.** Метод измерения диаметров деревьев на основе технологий искусственного интеллекта // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 249. С. 177–194. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.177-194

В современном лесном хозяйстве, акцентирующем внимание на устойчивом использовании ресурсов, ключевым становится внедрение информационных технологий, обеспечивающих точную оценку лесных ресурсов для обеспечения эффективного управления, заготовки и переработки. Исследование фокусируется на разработке метода распознавания стволов деревьев с применением современных технологических решений. Применение технологий искусственного интеллекта (ИИ) значительно трансформировало подходы к измерению и анализу физических объектов, предлагая методы автоматизации оценки размеров и характеристик деревьев с повышенной точностью и эффективностью. Исследование подчеркивает, что оптимальные условия для проведения замеров с использованием специализированных технических средств предполагают низкую плотность древостоя и отсутствие обильного подроста и подлеска. Анализ показывает, что интеграция алгоритмов ИИ в процессы сбора и анализа данных обеспечивает высокую точность и надежность измерений, сравнимую с традиционными ручными методами, демонстрируя таким образом свой потенциал практического применения. В работе обозначена проблема идентификации отдельных деревьев при их плотном расположении, когда система может ошибочно воспринимать несколько стволов как единый объект, что мешает точному измерению диаметров. Для дальнейшего улучшения точности и надежности измерений рекомендуется использование беспилотных летательных аппаратов для сбора визуальных данных с разных ракурсов, развитие и оптимизация алгоритмов ИИ, а также проведение исследований на расширенном объеме данных, что поможет адаптировать технологии ИИ к разнообразным условиям лесных экосистем.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, компьютерное зрение, измерение диаметра деревьев, распознавание деревьев, алгоритмы ИИ.

**Govyadin I.K., Chubinsky A.N., Alekseev A.S.** Method for measuring tree diameters based on artificial intelligence technologies. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 249, pp. 177–194 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.177-194

In modern forestry, which emphasizes the sustainable use of resources, the key is the introduction of information technologies that provide accurate assessment of forest resources to ensure effective management, harvesting and processing. The research focuses on developing a tree trunk recognition method using modern technological solutions. The application of artificial intelligence (AI) technologies has significantly transformed approaches to measuring and analyzing physical objects, offering methods to automate the estimation of tree size and characteristics with increased accuracy and efficiency. The study emphasizes that optimal conditions for carrying out measurements using specialized technical means involve low tree density and the absence of abundant undergrowth and shrubs. The analysis shows that the integration of AI algorithms into data collection and analysis processes provides high measurement accuracy and reliability comparable to traditional manual methods, thus demonstrating its potential for practical application. The work identifies the problem of identifying individual trees when they are densely located, when the system may mistakenly perceive several trunks as a single object, which interferes with the accurate measurement of diameters. To further improve the accuracy and reliability of measurements, it is recommended to use unmanned aerial vehicles to collect visual data from different angles, develop and optimize AI algorithms, and conduct research on an expanded volume of data, which will help adapt AI technologies to the diverse conditions of forest ecosystems.

**Keywords:** artificial intelligence, computer vision, tree diameter measurement, tree recognition, AI algorithms.

---

**ГОВЯДИН Илья Константинович** – доцент кафедры технологии материалов, конструкций и сооружений из древесины Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук. Researcher ID: AAF-5782-2019. ORCID: 0000-0002-0143-1916.

194021, Институтский пер. д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: govyadin812@gmail.com

**GOVYADIN Ilya K.** – PhD (Technical), St.Petersburg State Forest Technical University. Researcher ID: AAF-5782-2019. ORCID: 0000-0002-0143-1916.

194021. Institutskii per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: govyadin812@gmail.com

**ЧУБИНСКИЙ Анатолий Николаевич** – профессор кафедры технологии материалов, конструкций и сооружений из древесины Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор технических наук. Researcher ID: I-9432-2016. ORCID: 0000-0001-7914-8056.

194021, Институтский пер. д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: a.n.chubinsky@gmail.com

**CHUBINSKY Anatoly N.** – DSc (Technical), professor St.Petersburg State Forest Technical University. Researcher ID: I-9432-2016. ORCID: 0000-0001-7914-8056.

194021. Institutskii per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: a.n.chubinsky@gmail.com

**АЛЕКСЕЕВ Александр Сергеевич** – заведующий кафедрой лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор географических наук, профессор. SPIN-код: 8115-9103. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8795-2888>

194021, Институтский пер. д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: a\_s\_alekseev@mail.ru

**ALEKSEEV Aleksandr S.** – DSc (Geography), professor, head of the department of forest inventory, management and GIS, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-код: 8115-9103. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8795-2888>

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: a\_s\_alekseev@mail.ru

В.А. Александров, А.В. Александров, А.А. Бучников

**ВИБРОНАГРУЖЕННОСТЬ ОПЕРАТОРА  
ВАЛОЧНО-ПАКЕТИРУЮЩЕЙ МАШИНЫ  
ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПЕРЕЕЗДЕ  
С УДЕРЖАНИЕМ СРЕЗАННОГО ДЕРЕВА В ЗСУ  
ПРИ ЕГО ГОРИЗОНТАЛЬНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ**

*Введение.* В процессе работы валочно-пакетирующей машины (ВПМ) одним из основных приёмов, оказывающих на сменную производительность значительное влияние, является время, затрачиваемое на технологические переезды. В связи с этим исследование этого процесса является актуальной задачей. Одним из часто применяемых операторами приёмов является приём переезда машины с удержанием срезанного дерева в захватно-срезающем устройстве в горизонтальном положении.

*Материалы и методика исследования.* Для решения поставленной цели была составлена расчетная схема динамической системы «Оператор – валочно-пакетирующая машина – предмет труда – дерево». Расчетная схема представлена на рис. 1.

*Принятые обозначения:*

$m_0$  – масса оператора;

$m_1$  – масса валочно-пакетирующей машины;

$m_2$  – масса захватно-срезающей головки и манипулятора;

$m_3$  – масса дерева;

$X_1, X_2, X_0$  и  $X_3$  – обобщенные координаты масс  $m_1, m_2, m_0$  и  $m_3$ , соответственно;

$C_c$  – приведенная жесткость спинки сидения;

$C_{12}$  – жесткость манипулятора;

$C_{23}$  – жесткость дерева;

$P_0$  – касательная сила;

$F$  – сопротивление перемещению машины.

*Результаты исследования.*

Кинетическая энергия динамической системы:

$$T = \frac{1}{2}m_0(\dot{X}_0)^2 + \frac{1}{2}m_1(\dot{X}_1)^2 + \frac{1}{2}m_2(\dot{X}_2)^2 + \frac{1}{2}m_3(\dot{X}_3)^2. \quad (1)$$

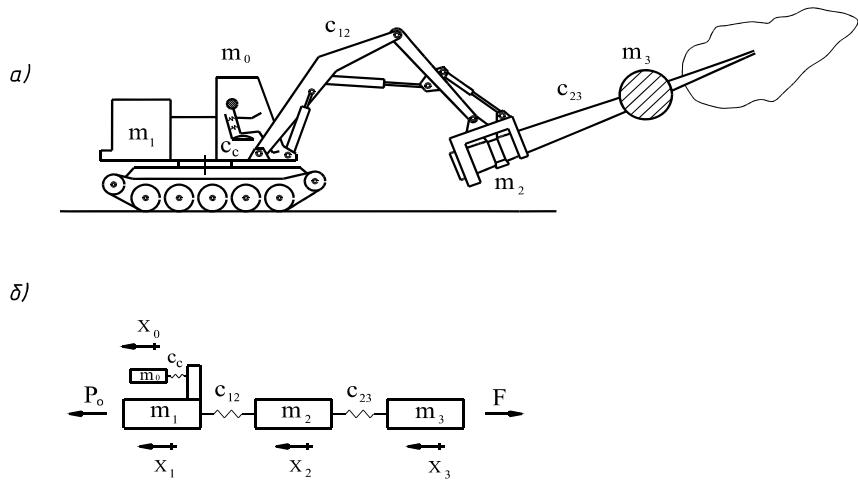


Рис. 1. Расчетные схемы динамической системы «Оператор–ВПМ–предмет труда–дерево»: а – исходная, б – эквивалентная

Fig. 1. Calculation scheme of the dynamic system  
«Operator–feller buncher–subject of labor–tree»: a – basic, б – equivalent

Потенциальная энергия системы:

$$\Pi = \frac{1}{2} C_c (X_1 - X_0)^2 + \frac{1}{2} C_{12} (X_1 - X_2)^2 + \frac{1}{2} C_{23} (X_2 - X_3)^2. \quad (2)$$

В соответствии с уравнением Лагранжа 2-го рода получим следующую систему уравнений [Александров, 2023].

$$\begin{cases} m_1 \left| m_0 \ddot{X}_0 + C_c X_0 = C_c X_1, \right. \\ m_2 \left| m_1 \ddot{X}_1 + C_c (X_1 - X_0) + C_{12} (X_1 - X_2) = P_0. \right. \\ m_1 \left| m_2 \ddot{X}_2 + C_{23} (X_2 - X_3) = C_{12} (X_1 - X_2), \right. \\ m_2 \left| m_3 \ddot{X}_3 + F = C_{23} (X_2 - X_3). \right. \end{cases} \quad (3)$$

Преобразуя систему уравнений (3), окончательно получим:

$$-(X_1^{VI} - X_0^{VI}) - A(X_1^{IV} - X_0^{IV}) - B(\ddot{X}_1 - \ddot{X}_0) - C(X_1 - X_0) = D, \quad (4)$$

$$A = \left[ \frac{m_3 m_2^2 (m_0 + m_1) C_c + [m_2 m_3 (m_1 + m_2) C_{12} + \dots + (m_2 + m_3) m_2 m_1 C_{23}] m_0}{m_0 C_{12} C_{23}} \right] \times \frac{C_{23} C_{12}}{m_3 m_2^2 m_1}, 1/c^2; \quad (5)$$

где

$$B = \left[ \frac{[m_2 m_3 (m_1 + m_2) C_{12} + (m_2 + m_3) m_2 m_1 C_{23}] (m_0 + m_1) C_c -}{m_1 C_{23} m_0 C_{12}} \right. \\ \left. - m_3 m_2^2 C_c m_0 C_{12} + [(m_2 + m_3)(m_1 + m_2) C_{12} - m_3 C_{12} m_1] m_1 C_{23} m_0 \right] \times \\ \times \frac{C_{23} C_{12}}{m_3 m_2^2 m_1}, 1/c^4; \quad (6)$$

$$C = \left[ \frac{[(m_2 + m_3)(m_1 + m_2) C_{12} - m_3 C_{12} m_1] (m_0 + m_1) C_c -}{m_1 m_0 C_{12}} \right. \\ \left. - (m_2 + m_3) m_2 C_c m_0 C_{12} \right] \times \frac{C_{23} C_{12}}{m_3 m_2^2 m_1}, 1/c^6; \quad (7)$$

$$D = \left[ \frac{m_2 m_1 C_{12} F - m_3 m_1 C_{12} F_1 + (m_2 + m_3) m_2 P_0 C_{12} +}{m_1 C_{12}} \right. \\ \left. + (m_2 + m_3) F_1 m_1 C_{12} - [(m_2 + m_3)(m_1 + m_2) C_{12} - m_3 C_{12} m_1] P_0 \right] \times \\ \times \frac{C_{23} C_{12}}{m_3 m_2^2 m_1}, M/c^6; \quad (8)$$

Введя новую переменную:

$$X_{01} = (X_1 - X_0) - D/C, \quad (9)$$

получим однородное уравнение вида [Александров, 2022]:

$$X_{01}^VI + AX_{01}^IV + BX_{01}^III + CX_{01}^II = 0. \quad (10)$$

Определяем коэффициенты дифференциального уравнения (10) при исходных данных применительно к ВПМ ЛП-19А:

$$m_0 = 80 \text{ кг}; m_1 = 25000 \text{ кг}; m_2 = 2140 \text{ кг}; m_3 = 1023 \text{ кг}; C_{12} = 420 \text{ кН/м}; \\ C_{23} = 65 \text{ кН/м}; C_c = 5 \text{ кН/м}; V = 2,0 \text{ м}^3; V/t_p = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 \text{ м}^2/\text{с}^2 \\ A = 306,94 \text{ 1/c}^2; B = 13,947 \cdot 10^3 \text{ 1/c}^4; C = 87146,1 \text{ 1/c}^6.$$

Решая дифференциальное уравнение (10) методом Рунге-Кутта с помощью среды программирования MathCAD при начальных условиях, соответствующих режиму разгона системы, получаем результаты исследований, приведенные в табл. 1 и на рис. 2.

Таблица 1

**Характеристики вибрационного воздействия на оператора ВПМ  
в режиме разгона ( $C_c = 5$  кН/м)**

**Characteristics of vibration impact on the operator of feller-buncher  
in the acceleration mode ( $C_c = 5$  kN/m)**

| Характеристики                | $V/t_p, \text{м/с}^2$ |       |       |       |
|-------------------------------|-----------------------|-------|-------|-------|
|                               | 0,2                   | 0,4   | 0,6   | 0,8   |
| $X_{01}, \text{м}$            | 0,013                 | 0,024 | 0,036 | 0,052 |
| $\dot{X}_{01}, \text{м/с}$    | 0,064                 | 0,127 | 0,191 | 0,254 |
| $\ddot{X}_{01}, \text{м/с}^2$ | 0,388                 | 0,776 | 1,163 | 1,551 |
| $Q_{\text{дин.}}, \text{Н}$   | 65                    | 120   | 195   | 260   |

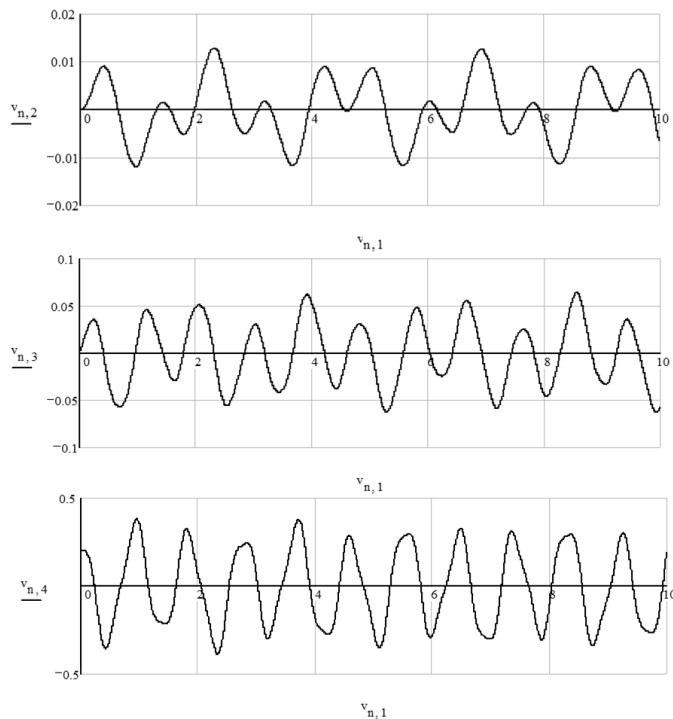


Рис. 2. Графики вибрационного воздействия на оператора ВПМ  
в режиме разгона при технологическом переезде ( $V/t_p = 0,2 \text{ м/с}^2$ ):  
 $V_{n,2}$  – виброперемещение;  $V_{n,3}$  – виброскорость;  $V_{n,4}$  – виброускорение

Fig. 2. Plots of vibration impact on the operator of feller-buncher  
in the acceleration mode at the technological crossing ( $V/t_p = 0,2 \text{ m/s}^2$ ):  
 $V_{n,2}$  – vibration displacement,  $V_{n,3}$  – vibration velocity,  $V_{n,4}$  – vibration acceleration

*Обсуждение.* Анализируя полученные расчетные данные, видим, что технологические переезды с деревом в захватно-срезающем устройстве, расположенному горизонтально, сопровождаются более значительным вибровоздействием по сравнению с предыдущими случаями [Александров, 2017]. Так, при разгоне системы виброперемещения оператора на сиденье составляют 0,013...0,052 м. При этом уровень виброускорения при разгоне находится в диапазоне 0,388...1,551 м/с<sup>2</sup>. Наблюдается и значительное динамическое воздействие на оператора (65..260 Н).

### *Выходы*

1. Анализируя полученные расчетные данные видим, что определяющее влияние на уровень вибровоздействия на оператора в режимах разгона оказывает форсирование пускового режима.

2. Для обеспечения нормальных условий работы оператору валочно-пакетирующей машины время разгона при трогании с места при технологических переездах должно быть не менее 3...4 секунд ( $V/t_p = 0,2...0,4$  м/с<sup>2</sup>). Максимальное динамическое воздействие на оператора происходит при интенсивности  $V/t_p = 0,5...0,6$  м/с<sup>2</sup>.

3. Разработанная модель системы «оператор – валочно-пакетирующая машина – предмет труда – дерево» позволяет определить вибрационное воздействие на оператора в режимах разгона при трогании с места при технологических переездах с погрешностью 6,0...10%.

*Конфликт интересов.* Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### **Библиографический список**

Александров В.А., Александров А.В. Вибронагруженность оператора валочно-пакетирующих машин. СПб.: СПбГЛТУ, 2017. 317 с.

Александров В.А., Александров А.В., Бучников А.А. Вибронагруженность оператора валочно-пакетирующей машины при технологических переездах без груза // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. Вып. 243. С. 188–196. DOI 10.21266/2079-4304.2023.243.188-196.

Александров В.А., Александров А.В., Бучников А.А. Вибронагруженность оператора валочно-пакетирующей машины при технологических переездах // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 239. С. 151–160. DOI 10.21266/2079-4304.2022.239.151-160.

Александров В.А., Александров А.В., Бучников А.А. Вибронагруженность оператора валочно-пакетирующей машины // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. Вып. 245. С. 191–199. DOI 10.21266/2079-4304.2023.245.191-199.

Александров В.А., Александров А.В., Бучников А.А. Вибронагруженность оператора валочно-пакетирующей машины в процессе подтрелевки пачки деревьев // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 239. С. 141–150. DOI 10.21266/2079-4304.2022.239.141-150.

### References

Aleksandrov V.A., Aleksandrov A.V. Vibronagruzhennost operatora valochnopaketiruyushchikh mashin. SPb.: SPbGLTU. 2017. 317 p. (In Russ.).

Aleksandrov V.A., Aleksandrov A.V., Buchnikov A.A. Vibration load of the feller buncher machine operator during technological transfers without load. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2023, iss. 243, pp. 188–196. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.243.188-196. (In Russ.)

Aleksandrov V.A., Aleksandrov A.V., Buchnikov A.A. Vibration load of fellerbuncher machine operator during technological transfers. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2022, iss. 239, pp. 151–160. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.239.151-160. (In Russ.)

Aleksandrov V.A., Aleksandrov A.V., Buchnikov A.A. Vibration load of the feller buncher machine operator. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2023, iss. 245, pp. 191–199. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.245.191-199. (In Russ.)

Aleksandrov V.A., Aleksandrov A.V., Buchnikov A.A. Vibration loading of a feller-buncher machine operator in the process of skidding a bunch of trees. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2022, iss. 239, pp. 141–150. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.239.141-150. (In Russ.).

Материал поступил в редакцию 07.02.2024

---

Александров В.А., Александров А.В., Бучников А.А. Вибронагруженность оператора валочно-пакетирующей машины при технологическом переезде с удержанием срезанного дерева в ЗСУ при его горизонтальном расположении // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 249. С. 195–201. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.195-201

Разработана динамическая модель системы «Оператор – валочно-пакетирующая машина – предмет труда – дерево». Математическое описание составлено в форме уравнения Лагранжа 2-го рода. Система уравнений решена относительно упругой деформации спинки сидения оператора методом Рунге-Кутта, с помощью среды программирования MathCAD. Апробация модели осуществлена на примере серийно выпускаемых валочно-пакетирующих машин ЛП-19А.

**Ключевые слова:** валочно-пакетирующая машина, математическая модель, колебания, вибрация, оператор.

**Aleksandrov V.A., Aleksandrov A.V., Buchnikov A.A.** Vibration load of the feller buncher machine operator during technological transfers without load. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 249, pp. 195–201 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.195-201

A dynamic model of the "operator-feller-buncher machine-object of labor-tree" has been developed. The mathematical description is in the form of the Lagrange equation of the second kind. The system of equations is solved for the elastic deformation of the operator's seat back by the Runge-Kutta method, using the MathCAD programming environment. Approbation of the model was carried out on the example of commercially available feller-bunchers machines LP-19A.

**Keywords:** feller buncher machine, mathematical model, fluctuations, vibration, operator.

---

**АЛЕКСАНДРОВ Валентин Александрович** – профессор Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор технических наук, профессор.

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

**ALEKSANDROV Valentin A.** – DSc (Technical), professor, St.Petersburg State Forest Technical University.

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

**АЛЕКСАНДРОВ Алексей Валентинович** – доцент Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук.

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

**ALEKSANDROV Aleksei V.** – PhD (Technical), Associate Professor, St.Petersburg State Forest Technical University.

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

**БУЧНИКОВ Александр Андреевич** – аспирант Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

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

**BUCHNIKOV Aleksandr A.** – PhD student, St.Petersburg State Forest Technical University.

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

С.А. Угрюмов, Р.А. Шадрин, И.К. Козлова

**ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЛЕСОСЕЧНЫЕ РАБОТЫ  
В УСЛОВИЯХ ЛЕСНИЧЕСТВ  
СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

*Введение.* В феврале 2021 года Лесной кодекс Российской Федерации (№ 200-ФЗ от 04.12.2006) был дополнен Главой 1.1. «Рубки и подсочка лесных насаждений» в составе статей 23.1-23.6. Это дополнение введено Федеральным законом № 304-ФЗ от 02.07.2021.

Статья 23.2. «Лесосечные работы» Лесного кодекса Российской Федерации (№ 200-ФЗ от 04.12.2006), в том числе, определяет состав лесосечных работ:

1. Лесосечные работы состоят из подготовительных, основных и заключительных работ, связанных с рубками лесных насаждений при осуществлении различных видов использования лесов в соответствии с главой 2 настоящего Кодекса, а также при проведении мероприятий по сохранению лесов.

2. Лесосечные работы выполняются с использованием или без использования машин (в том числе самоходных машин, других видов техники) и (или) оборудования, предназначенных для рубки лесных насаждений, а также для вывоза из леса древесины, и проводятся в соответствии с таксационным описанием лесосеки и технологической картой лесосечных работ.

3. Выполнение лесосечных работ без таксационного описания лесосеки, предусмотренного статьей 23.4 настоящего Кодекса, не допускается.

4. Подготовительные лесосечные работы выполняются в целях создания необходимых условий для безопасного осуществления рубок лесных насаждений, размещения лесных складов, иных объектов лесной инфраструктуры.

5. Основные лесосечные работы представляют собой совокупность технологических процессов, указанных в части 1 статьи 23.1 настоящего Кодекса.

6. Заключительные лесосечные работы представляют собой очистку лесосек и снос объектов лесной инфраструктуры.

По мнению Патякина В.И. [Технология..., 2012], «объем трудовых и финансовых затрат на очистку мест рубок перед сдачей лесосек органам лесного хозяйства значителен. Проведение этой завершающей операции лесозаготовок вызывает определенные проблемы для лесозаготовителей. Основные из них:

- практическое отсутствие эффективных средств механизации этой операции и значительные затраты ручного труда на ее выполнение;
- выраженная сезонность ее проведения (особенно после рубок леса зимой – необходимость прочистки мест зимних рубок), а соответственно необходимость аккумулирования трудовых ресурсов на сжатый период времени для выполнения разовой операции;
- имеющая место нечеткость ряда требований и последовательности выполнения работ по очистке мест рубок, в результате чего органами лесного хозяйства принимаются необоснованные решения при освидетельствовании лесосек;
- практическое отсутствие эффективных методов и технических средств для переработки порубочных остатков в качестве вторичного сырья».

В отношении вышеприведённого мнения необходимо уточнить следующее:

- нельзя в полной мере согласиться с «выраженной сезонностью» очистки лесосек, поскольку лесозаготовки осуществляются круглогодично, а при проведении лесозаготовок одновременно с заготовкой древесины должна производиться и очистка мест рубок (лесосек) от порубочных остатков;
- «нечеткость ряда требований по очистке мест рубок» – это положение обычно относится к такому способу очистки лесосек, как укладка и оставление на перегнивание порубочных остатков на месте рубки, поскольку может расцениваться как отсутствие очистки лесосеки;
- также нельзя полностью согласиться с «практическим отсутствием эффективных методов и технических средств для переработки порубочных остатков в качестве вторичного сырья», поскольку существуют обоснования параметров и режимов работы устройств для измельчения порубочных остатков, например, работы Фокина С.В. [Фокин. Фомина, 2023].

*Цель и задачи исследования.* Целью настоящего исследования является обоснование необходимости качественного проведения заключительных лесосечных работ как элемента технологии лесозаготовительных произ-

водств в контексте их влияния на экологию леса и лесовосстановление, а также в анализе практики заключительных лесосечных работ в условиях лесничеств Северо-Запада Российской Федерации.

Задачи исследования:

- изучить современную нормативно-методическую основу лесосечных работ, в том числе, заключительных лесосечных работ;
- проанализировать практику заключительных лесосечных работ в условиях лесничеств Северо-Запада Российской Федерации;
- на основании этого анализа определить наиболее распространённые способы очистки лесосек в условиях лесничеств Северо-Запада Российской Федерации;
- определить технологические особенности проведения заключительных лесосечных работ применительно к условиям лесозаготовительных предприятий Северо-Запада Российской Федерации;
- определить направление дальнейших научных исследований в отношении заключительных лесосечных работ как части мероприятий по охране объектов животного мира и среды их обитания и интеграции таких мероприятий в систему технологий лесозаготовительного производства.

*Материалы и методика исследования.* Методической основой настоящего исследования послужили следующие нормативно-методические документы:

1. Лесной кодекс Российской Федерации № 200-ФЗ от 04.12.2006 (ред. от 04.08.2023), (с изменениями и дополнениями, вступившими в силу с 01.01.2024);
2. Приказ Минприроды России № 993 от 01.12.2020 (ред. от 17.10.2022) «Об утверждении Правил заготовки древесины и особенностей заготовки древесины в лесничествах, указанных в статье 23 Лесного кодекса Российской Федерации»;
3. Приказ Минприроды России № 534 от 30.07.2020 «Об утверждении Правил ухода за лесами»;
4. Приказ Минприроды России № 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»;
5. Распоряжение Правительства РФ № 1283-р от 17.07.2012 (ред. от 10.09.2021) «Об утверждении Перечня объектов лесной инфраструктуры для защитных лесов, эксплуатационных лесов и резервных лесов»;

6. Приказ Минприроды России № 565 от 05.08.2020 «Об утверждении Порядка проектирования, создания, содержания и эксплуатации объектов лесной инфраструктуры»;

7. Приказ Минприроды России № 1024 от 29.12.2021 (ред. от 03.08.2023) «Об утверждении Правил лесовосстановления, формы, состава, порядка согласования проекта лесовосстановления, оснований для отказа в его согласовании, а также требований к формату в электронной форме проекта лесовосстановления»;

8. Постановление Правительства РФ № 1614 от 07.10.2020 «Об утверждении Правил пожарной безопасности в лесах»;

9. Постановление Правительства РФ № 2047 от 09.12.2020 «Об утверждении Правил санитарной безопасности в лесах»;

10. Постановление Правительства РФ № 1509 от 21.09.2020 (ред. от 08.06.2022) «Об особенностях использования, охраны, защиты, воспроизведения лесов, расположенных на землях сельскохозяйственного назначения» (вместе с «Положением об особенностях использования, охраны, защиты, воспроизведения лесов, расположенных на землях сельскохозяйственного назначения») (с изменениями и дополнениями, вступившими в силу с 01.01.2024).

Кроме того, в настоящем исследовании были использованы материалы лесосечных работ, в том числе, заключительных лесосечных работ, Киришского лесничества Ленинградской области и Боровичского лесничества Новгородской области РФ.

*Результаты исследования.* Изучение современной нормативно-методической основы лесосечных работ, в том числе, заключительных лесосечных работ, мы начали со статьи 23.2. «Лесосечные работы» Лесного кодекса Российской Федерации (№ 200-ФЗ от 04.12.2006). Согласно требованиям п. 10 этой статьи был принят 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».

Виды лесосечных работ, порядок и последовательность их выполнения, среди прочего, содержат следующую информацию:

1. Лесосечные работы состоят из подготовительных, основных и заключительных работ, связанных с рубками лесных насаждений при осуществлении различных видов использования лесов в соответствии с главой

2 Лесного кодекса Российской Федерации, а также при проведении мероприятий по сохранению лесов.

2. Лесосечные работы выполняются с использованием или без использования машин (в том числе самоходных машин, других видов техники) и (или) оборудования, предназначенных для рубки лесных насаждений, а также для вывоза из леса древесины.

3. Лесосечные работы выполняются в соответствии с технологической картой лесосечных работ, составляемой юридическими лицами, индивидуальными предпринимателями, осуществляющими заготовку древесины или мероприятия по сохранению лесов.

4. При выполнении лесосечных работ должны соблюдаться условия договора аренды лесного участка, договора купли-продажи лесных насаждений, контракта, указанного в части 5 статьи 19 Лесного кодекса Российской Федерации, права постоянного (бессрочного) пользования, проекта освоения лесов, лесной декларации, технологической карты лесосечных работ, требования лесного законодательства, нормативных правовых актов, регулирующих лесные отношения.

5. Виды осуществляемых последовательно лесосечных работ:

- 1) подготовительные лесосечные работы;
- 2) основные лесосечные работы;
- 3) заключительные лесосечные работы.

Далее в рамках настоящего исследования было обращено особое внимание именно на заключительные лесосечные работы.

8. Заключительные лесосечные работы представляют собой очистку лесосек и снос объектов лесной инфраструктуры. К заключительным лесосечным работам относятся следующие работы:

- 1) очистка (доочистка) мест рубок от порубочных остатков;
- 2) снос созданных лесных складов, других строений и сооружений;
- 3) приведение в состояние, пригодное для использования по назначению, лесных дорог, имевшихся до осуществления лесосечных работ;
- 4) приведение в надлежащее состояние нарушенных мостов, просек, водотоков, ручьев, рек.

Здесь авторы считают необходимым высказать некоторые замечания относительно вышеприведённого подпункта 3) пункта 8.

Считаем, что выражение «приведение в состояние, пригодное для использования по назначению» необходимо заменить термином «ремонт». Какое назначение может быть у дороги? Возможность безаварийного и

безопасного перемещения подвижного состава по ней. А для этого в большинстве случаев требуется чётко определённое действие – ремонт дороги. Именно это и должно отражаться и в нормативно-методических документах, и в проектах освоения лесов.

Очистке лесосек (мест рубок) от порубочных остатков в рассматриваемом нормативно-методическом документе уделяется особое внимание. Очистка мест рубок от порубочных остатков на практике осуществляется следующими способами:

- укладкой порубочных остатков на волоки с целью их укрепления и предохранения почвы от сильного уплотнения и повреждения при трелевке;
- сбором порубочных остатков в кучи и валы с последующим сжиганием их в пожаробезопасный период;
- сбором порубочных остатков в кучи и валы с оставлением их на месте для перегнивания и для подкормки диких животных в зимний период;
- разбрасыванием измельченных порубочных остатков в целях улучшения лесорастительных условий;
- укладкой и оставлением на перегнивание порубочных остатков на месте рубки;
- вывозом порубочных остатков в места их дальнейшей переработки.

Указанные способы очистки мест рубок при необходимости могут применяться комбинированно (рис. 1).

После проведения указанных работ допускается доочистка лесосек. Очистка лесосек от порубочных остатков должна осуществляться с соблюдением требований Правил пожарной безопасности в лесах и Правил санитарной безопасности в лесах.

Очистка лесосек сплошных рубок с последующим искусственным лесовосстановлением должна производиться способами, обеспечивающими создание условий для проведения всего комплекса лесовосстановительных работ (подготовка участка и обработка почвы, посадка или посев лесных культур, агротехнические уходы), а также ухода за молодняками.

Очистка лесосек сплошных рубок с наличием подроста ценных пород должна осуществляться способами, обеспечивающими его сохранность. При трелевке деревьев с кронами сжигание порубочных остатков должно производиться по мере их накопления на специально подготовленных площадках. Сжигание порубочных остатков сплошным палом не допускается.



*Рис. 1. Очистка лесосеки комбинированным способом*

*Fig. 1. Clearing the cutting area in a combined way*

Обязательному сжиганию подлежат порубочные остатки при проведении санитарных рубок в очагах вредных организмов, в которых они могут оказаться источником распространения инфекции или средой для ее сохранения и заселения вторичными вредными организмами, если такие порубочные остатки не вывозятся в места их дальнейшей переработки.

Правила пожарной безопасности в лесах и Правила санитарной безопасности в лесах к очистке лесосек от порубочных остатков нормированы Постановлением Правительства РФ № 1614 от 07.10.2020 «Об утверждении Правил пожарной безопасности в лесах» и включают следующие основные пункты:

26. При проведении рубок лесных насаждений одновременно с заготовкой древесины следует производить очистку мест рубок (лесосек) от порубочных остатков.

В случаях, когда граждане и юридические лица, осуществляющие использование лесов, обязаны сохранить подрост и молодняк, огневые способы очистки мест рубок (лесосек) от порубочных остатков запрещаются.

27. При проведении очистки мест рубок (лесосек) осуществляются:

а) весенняя доочистка в случае рубки в зимнее время;

б) укладка порубочных остатков длиной не более 2 метров в кучи или валы шириной не более 3 метров с уплотнением их к земле для перегнивания, сжигания или разбрасывания в измельченном виде по площади места рубки (лесосеки) на расстоянии не менее 10 метров от прилегающих лесных насаждений. Расстояние между валами должно быть не менее 20 метров, если оно не обусловлено технологией лесосечных работ;

в) завершение сжигания порубочных остатков при огневом способе очистки мест рубок (лесосек) до начала пожароопасного сезона. Сжигание порубочных остатков от летней заготовки древесины и порубочных остатков, собранных при весенней доочистке мест рубок (лесосек), производится осенью, после окончания пожароопасного сезона.

28. В отдельных районах в виде исключения сжигание порубочных остатков допускается в период пожароопасного сезона (при установлении первого класса пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды) по решению органов государственной власти или органов местного самоуправления, указанных в пункте 4 настоящих Правил.

При сжигании порубочных остатков должны обеспечиваться сохранность имеющихся на местах рубок (лесосеках) подроста, деревьев-семенников и других несрубленных деревьев, а также полное сгорание порубочных остатков. Сжигание порубочных остатков сплошным палом запрещается.

Кроме того, согласно Постановлению Правительства РФ № 2047 от 09.12.2020 «Об утверждении Правил санитарной безопасности в лесах»:

20. В лесах не допускается:

в) невыполнение или несвоевременное выполнение работ по очистке лесосек, а также работ по приведению лесных участков, предоставленных физическим или юридическим лицам в пользование в установленном лесным законодательством порядке, в состояние, пригодное для использования этих участков по целевому назначению, или работ по их рекультивации.

21. Для предотвращения усыхания деревьев по опушкам вырубок не допускается проведение чересполосных рубок в еловых и пихтовых лесных насаждениях.

При разработке лесосек, строительстве и реконструкции линейных объектов запрещается сдвигание порубочных остатков к краю леса (стене леса). При проведении рубок в очагах вредных организмов порубочные остатки подлежат сжиганию, измельчению, обработке пестицидами или вывозу в места, предназначенные для переработки древесины.



Рис. 2. Сжигание порубочных остатков на лесосеке  
выборочной санитарной рубки

Fig. 2. Burning of felling residues in a cutting area  
of the selective sanitary cutting

34. Порубочные остатки после выборочных и сплошных санитарных рубок в очагах вредных организмов подлежат сжиганию (рис. 2), измельчению, обработке пестицидами или вывозу в места, предназначенные для переработки древесины.

35. При проведении рубок лесных насаждений осуществляется очистка мест рубок от порубочных остатков в соответствии с утвержденным порядком проведения лесосечных работ.

При изучении современной нормативно-методической основы лесосечных работ, в том числе, заключительных лесосечных работ, необходимо учитывать требования Приказа Минтруда России № 644н от 23.09.2020 «Об утверждении Правил по охране труда в лесозаготовительном, деревообрабатывающем производствах и при выполнении лесохозяйственных работ», прописанные в пунктах:

116. При механизированной очистке лесосек порубочные остатки диаметром более 8 см должны быть раскряжеваны на отрезки длиной не более 3 м.

117. Запрещается работникам находиться ближе 5 м по отношению друг к другу при ручной очистке лесосеки.

409. Лесосечные работы должны организовываться и выполняться в соответствии с технологической картой, утвержденной работодателем или

иным уполномоченным работодателем должностным лицом, которая должна устанавливать порядок и способы ведения работ. При работе в лесу технологическая карта должна включать схему участка, на которой указывают границы участка, пути подхода к нему, опасные для работы места, размещение транспорта, домиков, предупредительных знаков.

410. Запрещается выполнять лесохозяйственные работы при скорости ветра более 11 м/с, в грозу, в период ливневых дождей и при густом тумане (при видимости менее 50 м).

411. Площадь, предназначенная для выполнения работ, должна быть заранее обследована, подготовлена, опасные места (обрывы, поваленные деревья, камни, ямы, промоины) и места отдыха отмечены знаками безопасности.

412. При работе машинотракторных агрегатов должна быть обеспечена безопасность обслуживающего персонала. Запрещается нахождение в кабине трактора, а также на участке выполнения работ лиц, не связанных с осуществлением технологического процесса.

Заключительные лесосечные работы, кроме очистки лесосек, включает щё и снос объектов лесной инфраструктуры. В отношении объектов лесной инфраструктуры необходимо руководствоваться требованиями таких нормативно-методических документов, как Распоряжение Правительства РФ № 1283-р от 17.07.2012 (ред. от 10.09.2021) «Об утверждении Перечня объектов лесной инфраструктуры для защитных лесов, эксплуатационных лесов и резервных лесов» и Приказ Минприроды России № 565 от 05.08.2020 «Об утверждении Порядка проектирования, создания, содержания и эксплуатации объектов лесной инфраструктуры».

Для анализа практики заключительных лесосечных работ и определения на основании этого анализа наиболее распространённых способов очистки лесосек, а также для обозначения технологических особенностей проведения заключительных лесосечных работ применительно к условиям лесозаготовительных предприятий Северо-Запада Российской Федерации в настоящем исследовании были использованы материалы лесосечных работ, в том числе, заключительных лесосечных работ, Киришского лесничества Ленинградской области и Боровичского лесничества Новгородской области РФ.

Результаты обследования лесосек с целью анализа практики заключительных лесосечных работ и определения на основании этого анализа наиболее распространённых способов очистки лесосек, а также обозначения технологических особенностей проведения заключительных лесосечных работ приведены в табл. 1.

Таблица 1

## Результаты обследования лесосек

## The results of inspection of cutting areas

| Месторасположение лесосеки  | Характеристика заключительных лесосечных работ согласно технологической карте лесосечных работ и результатов обследования лесосек   |
|---|---|
| Киришское лесничество, Пчевжинское участковое лесничество, кв. 187, выд. 17             | Комбинированно применённые способы очистки мест рубок:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• укладка порубочных остатков на волоки с целью их укрепления и предохранения почвы от сильного уплотнения и повреждения при трелевке;</li> <li>• сбор порубочных остатков в кучи и валы с оставлением их на месте для перегнивания и для подкормки диких животных в зимний период;</li> <li>• разбрасывание измельченных порубочных остатков в целях улучшения лесорастительных условий;</li> <li>• укладка и оставление на перегнивание порубочных остатков на месте рубки.</li> </ul> Произведено приведение в состояние, пригодное для использования по назначению, лесных дорог, имевшихся до осуществления лесосечных работ, а также приведение в надлежащее состояние нарушенных мостов, просек, водотоков, ручьев, рек |
| Киришское лесничество, Пчевжинское участковое лесничество, кв. 135, выд. 31, 32, 34, 35 |   |
| Боровичское лесничество, Боровичское участковое лесничество, кв. 208, выд. 38.1         | Комбинированно применённые способы очистки мест рубок:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• укладка порубочных остатков на волоки с целью их укрепления и предохранения почвы от сильного уплотнения и повреждения при трелевке;</li> <li>• сбор порубочных остатков в кучи и валы с оставлением их на месте для перегнивания и для подкормки диких животных в зимний период;</li> </ul> Произведено приведение в состояние, пригодное для использования по назначению, лесных дорог, имевшихся до осуществления лесосечных работ  |
| Боровичское лесничество, Волокское участковое лесничество, кв. 151, выд. 11, 15         | Также произведено приведение в состояние, пригодное для использования по назначению, лесных дорог, имевшихся до осуществления лесосечных работ  |

В Киришском лесничестве Ленинградской области для изучения были выбраны две лесосеки 2023 года:

1. Пчевжинское участковое лесничество, квартал 187, лесотаксационный выдел 17, лесосека № 1, общая площадь лесосеки 3,6 га, эксплуатационная площадь лесосеки 3,6 га, вид рубки – рубка спелых и перестойных лесных насаждений, форма рубки – сплошная рубка, фактически заготовлено 1015 м<sup>3</sup>.

2. Пчевжинское участковое лесничество, квартал 135, лесотаксационные выделы 31, 32, 34, 35, лесосека № 1, общая площадь лесосеки 6,0 га, эксплуатационная площадь лесосеки 6,0 га, вид рубки – рубка спелых и перестойных лесных насаждений, форма рубки – сплошная рубка, фактически заготовлено 1420 м<sup>3</sup>.

В Боровичском лесничестве Новгородской области для изучения также были выбраны две лесосеки 2023 года:

1. Боровичское участковое лесничество, квартал 208, лесотаксационный выдел 38.1, лесосека № 1, общая площадь лесосеки 1,9 га, эксплуатационная площадь лесосеки 1,9 га, вид рубки – рубка погибших и повреждённых лесных насаждений, форма рубки – сплошная рубка, фактически заготовлено 488 м<sup>3</sup>.

2. Волокское участковое лесничество, квартал 151, лесотаксационные выделы 11, 15, лесосека № 1, общая площадь лесосеки 3,7 га, эксплуатационная площадь лесосеки 3,7 га, вид рубки – рубка спелых и перестойных лесных насаждений, форма рубки – сплошная рубка, фактически заготовлено 941 м<sup>3</sup>.

Таким образом, из табл. 1 следует, что наиболее распространёнными способами очистки лесосек служат комбинированно применяемые способы:

- укладка порубочных остатков на волоки с целью их укрепления и предохранения почвы от сильного уплотнения и повреждения при трелевке;
- сбор порубочных остатков в кучи и валы с оставлением их на месте для перегнивания и для подкормки диких животных в зимний период.

Реже применяются:

- разбррасывание измельченных порубочных остатков в целях улучшения лесорастительных условий;
- укладка и оставление на перегнивание порубочных остатков на месте рубки.

Также наиболее распространённым видом заключительных лесосечных работ определено приведение в состояние, пригодное для использования по назначению, лесных дорог, имевшихся до осуществления лесосечных работ. Как уже отмечалось, авторы считают необходимым привести более конкретную формулировку – ремонт лесных дорог.

Реже применяется приведение в надлежащее состояние нарушенных мостов, просек, водотоков, ручьев, рек, а также снос созданных лесных складов, других строений и сооружений.

*Обсуждение.* Необходимо отметить, что как в научном сообществе, так и среди специалистов-практиков в области лесного хозяйства и лесной

промышленности нет единого мнения относительно необходимости работ по очистке лесосек, хотя нормативно-методические документы, как уже отмечалось, содержат чёткое требование о необходимости очистки мест рубок. Однако совершенно необходимо учитывать запросы практики. С точки зрения специалистов-практиков лесной промышленности есть следующее мнение.

Как отмечал в своей фундаментальной работе в области очистки лесосек Г.К. Виногоров, «...очистка лесосек – одна из самых трудоемких операций в лесозаготовительном процессе. Трудовые и денежные затраты на нее исключительно велики. Непосредственно при проведении лесосечных работ на долю очистки (сбор и переноску сучьев) приходится 15-18 % рабочего времени малых комплексных бригад». На весеннюю доочистку каждого гектара затрачивается в среднем 3,9 чел.-дня. «Для лесозаготовок очистка лесосек не нужна, в производственном процессе она является совершенно излишней, более того, она требует усложнения технологии, отрицательно влияет на смежные операции». «В результате постоянного повторения (в учебниках, инструкциях, и т. д.) взгляды на очистку лесосек стали настолько привычными, что обычно не возникает даже сомнений в достоверности и всесторонней изученности этого вопроса. Однако при детальном подходе к этой проблеме выясняется, что лесохозяйственная наука не имеет серьезных доказательств необходимости очистки лесосек» [Технология..., 2012].

Действительно, какими же доказательствами необходимости очистки лесосек располагает лесохозяйственная наука?

«Очистка лесосек – обязательная часть лесозаготовительного процесса. С лесоводственной точки зрения эта мера важна для достижения трех целей:

- уменьшения пожарной опасности;
- улучшения санитарного состояния леса;
- создания благоприятных условий для естественного и искусственно-го возобновления» [Никонов, 2022].

«Для правильной организации работы по очистке лесосек необходимо установить ее способы и сроки, иногда с разделением их по выделам в пределах лесосеки. Очистка одновременно с лесозаготовкой предпочтительнее, потому что в этом случае уменьшается трудоемкость и тех и других работ, увеличивается их безопасность» [Сеннов, 2022].

Очевидно, что существование различных мнений, как в научном сообществе, так и среди специалистов-практиков в области лесного хозяйства и лесной промышленности относительно необходимости и технологических особенностей заключительных лесосечных работ, в том числе,

очистки лесосек, определяет необходимость проведения дальнейших научных исследований на данную тему.

При определении направления дальнейших научных исследований в отношении заключительных лесосечных работ как части мероприятий по охране объектов животного мира и среды их обитания и интеграции таких мероприятий в систему технологий лесозаготовительного производства считаем возможным классифицировать ряд способов очистки лесосек как биотехнические способы очистки лесосек. Это, например, такой способ очистки лесосек, как сбор порубочных остатков в кучи и валы с оставлением их на месте для перегнивания и для подкормки диких животных в зимний период.

В процессе дальнейших научных исследований необходимо будет уточнить, как быстро порубочные остатки тех или иных древесных пород теряют свою кормовую ценность, например, в отношении диких копытных животных, как влияет на скорость потери кормовой ценности порубочных остатков способ очистки лесосек, в свете полученных данных сформулировать предложения по оптимальным способам и срокам очистки лесосек для биотехнических целей.

В работе Данилкина А.А. [2006] отмечается: «... потенциальный запас кормов для копытных на лесосеках, у нас обычно сразу же сжигаемый, огромен. Лишь одна срубленная осина диаметром 20-55 см даёт от 45 до 400 кг веточного корма. Следовательно, сохранение порубочных остатков до весны и подрубка осин должны быть одним из основных элементов биотехнических работ. Не лишним будет омолаживание кустарниковых и древесных зарослей, а также удобрение отдельных участков леса фосфатами и калийными солями, что приводит к увеличению кормовой ёмкости угодий в 2-5 раз. В принципе, любые лесные рубки, посадки, рекультивации или реконструкции малоценных насаждений должны преследовать и биотехнические цели».

В этом отношении представляет интерес опыт получения витаминного концентрата (осинового жира) из коры осины [Грязькин, 2005].

*Заключение.* Действующие нормативные документы в области лесного хозяйства и лесной промышленности однозначно определяют необходимость заключительных лесосечных работ, в том числе, очистки лесосек. Тем не менее, как в научном сообществе, так и среди специалистов-практиков в области лесного хозяйства и лесной промышленности нет единого мнения относительно необходимости работ по очистке лесосек.

Существование различных мнений, как в научном сообществе, так и среди специалистов-практиков в области лесного хозяйства и лесной промышленности относительно необходимости и технологических особенностей заключительных лесосечных работ, в том числе, очистки лесосек, определяет необходимость проведения дальнейших научных исследований на данную тему.

Исходя из действующих нормативно-методических документов могут быть выбраны следующие основные направления промышленного использования порубочных остатков:

- использование порубочных остатков в качестве удобрения мест рубок для повышения уровня их плодородия;
- использование порубочных остатков в качестве дорожно-строительного материала для укрепления волоков (технологических коридоров), по которым движутся лесозаготовительные машины;
- использование порубочных остатков в качестве вторичного сырья для промышленной переработки, например:
  - выделение древесины для переработки на щепу;
  - переработка порубочных остатков на топливо;
  - выделение хвойно-веточного корма для животных;
  - выделение хвои для лесохимической промышленности (например, экстрагирования);
  - комплексная переработка порубочных остатков;
- использование древесной щепы в качестве сорбента при очистке площадок (верхних складов), мест работы машин и лесных дорог от горюче-смазочных материалов.

Соблюдение требований по своевременной и качественной очистке лесосек позволит существенно сократить расходы на лесовосстановление примерно на 10-15%.

*Конфликт интересов.* Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### **Библиографический список**

*Данилкин А.А.* Дикие копытные в охотниччьем хозяйстве. М.: ГЕОС, 2006. 366 с.

*Никонов М.В.* Лесоводство: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2022. 224 с.

*Сеннов С.Н.* Лесоведение и лесоводство: учебник. 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: Лань, 2022. 336 с.

*Технология и машины лесосечных работ: учебник / под ред. В.И. Патякина.* СПб.: СПбГЛТУ, 2012. 362 с.

Фокин С.В., Фомина О.А. Совершенствование конструкции технических средств для производства топливной щепы из отходов лесозаготовок: монография. Тюмень: ФГБОУ ВО ГАУ Северного Зауралья, 2023. 119 с.

### References

Danilkin A.A. Wild ungulates in the hunting economy. M.: GEOS, 2006. 366 p. (In Russ.)

Fokin S.V., Fomina O.A. Improving the design of technical means for the production of fuel chips from logging waste: monograph. Tyumen: Federal State Budgetary Educational Institution of the Northern Trans-Urals, 2023. 119 p. (In Russ.)

Nikonov M.V. Forestry: A study guide. St. Petersburg: Lan, 2022. 224 p. (In Russ.)

Sennov S.N. Forest science and forestry: Textbook. 3rd ed., reprint. and additional. St. Petersburg: Lan, 2022. 336 p. (In Russ.)

Technology and machines of logging operations: textbook / edited by V.I. Patyakin. St. Petersburg: SPbGLTU, 2012. 362 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 20.12.2023

---

**Угрюмов С.А., Шадрин Р.А., Козлова И.К.** Заключительные лесосечные работы в условиях лесничеств Северо-Запада Российской Федерации // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 249. С. 202–219. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.202-219

Работа посвящена обоснованию необходимости качественного проведения заключительных лесосечных работ как элемента технологии лесозаготовительных производств в контексте их влияния на экологию леса и лесовосстановление, а также анализу практики заключительных лесосечных работ в условиях лесничеств Северо-Запада Российской Федерации. Действующие нормативные документы в области лесного хозяйства и лесной промышленности однозначно определяют необходимость заключительных лесосечных работ, в том числе, очистки лесосек. Тем не менее, как в научном сообществе, так и среди специалистов-практиков в области лесного хозяйства и лесной промышленности нет единого мнения относительно необходимости работ по очистке лесосек. Существование различных мнений, как в научном сообществе, так и среди специалистов-практиков в области лесного хозяйства и лесной промышленности относительно необходимости и технологических особенностей заключительных лесосечных работ, в том числе, очистки лесосек, определяет необходимость проведения дальнейших научных исследований на данную тему. При определении направления дальнейших научных исследований в отношении заключительных лесосечных работ как части мероприятий по охране объектов

животного мира и среды их обитания и интеграции таких мероприятий в систему технологий лесозаготовительного производства считаем возможным классифицировать ряд способов очистки лесосек как биотехнические способы очистки лесосек. Это, например, такой способ очистки лесосек, как сбор порубочных остатков в кучи и валы с оставлением их на месте для перегнивания и для подкормки диких животных в зимний период. Соблюдение требований по своевременной и качественной очистке лесосек позволит существенно сократить расходы на лесовосстановление примерно на 10-15%.

**Ключевые слова:** заключительные лесосечные работы, очистка лесосек, технология лесозаготовительных производств, биотехнические способы очистки мест рубок, использование порубочных остатков.

**Ugryumov S.A., Shadrin R.A., Kozlova I.K.** Final logging operations in the conditions of forestry in the North-West of the Russian Federation. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2024, iss. 249, pp. 202–219 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.202-219

The article is devoted to substantiate the need for high-quality final logging operations as an element of logging technology in the context of their impact on forest ecology and reforestation, as well as to analyze the practice of final logging operations in the conditions of forestry in the North-West of the Russian Federation. The current regulatory documents in the field of forestry and the forest industry clearly define the need for final logging operations, including clearing of cutting areas. Nevertheless, both in the scientific community and among practitioners in the field of forestry and the forest industry, there is no consensus on the need for clearing logging sites. The existence of different opinions, both in the scientific community and among practitioners in the field of forestry and the forest industry, regarding the necessity and technological features of final logging operations, including clearing of cutting areas, determines the need for further scientific research on this topic. When determining the direction of further scientific research regarding the final logging operations as part of measures to protect wildlife and their habitat and integrate such measures into the system of logging production technologies, we consider it possible to classify a number of methods of clearing cutting areas as biotechnical methods of clearing cutting areas. These are, for example, such methods of clearing cutting areas as collecting felling residues in heaps and shafts, leaving them in place for rotting and for feeding wild animals in winter. Compliance with the requirements for timely and high-quality clearing of cutting areas will significantly reduce the cost of reforestation by about 10-15%.

**Keywords:** final logging operations, clearing of cutting areas, technology of logging industries, biotechnical methods of clearing logging sites, use of felling residues.

**УГРЮМОВ Сергей Алексеевич** – профессор кафедры технологии лесозаготовительных производств Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор технических наук. ResearcherID: F-6510-2016. ORCID: 0000-0002-8077-3542.

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

**UGRYUMOV Sergei A.** – DSc (Technical), Professor of the Technologies of Logging Industries Department, St.Petersburg State Forest Technical University. ResearcherID: F-6510-2016. ORCID: 0000-0002-8077-3542.

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

**ШАДРИН Роман Александрович** – старший преподаватель кафедры технологии лесозаготовительных производств Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, SPIN-код: 1768-1512.

194021, Институтский пер. д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: shadrin-ra1976@yandex.ru

**SHADRIN Roman A.** – Lecturer of the Technologies of Logging Industries Department, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN code: 1768-1512.

194021. Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: shadrin-ra1976@yandex.ru.

**КОЗЛОВА Ирина Константиновна** – ассистент кафедры технологии лесозаготовительных производств Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

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

**KOZLOVA Irina K.** – Assistant of the Technologies of Logging Industries Department, St.Petersburg State Forest Technical University.

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

Д.М. Ласточкин, Ю.Н. Сидыганов, В.И. Кретинин, А.А. Медяков

АНАЛИЗ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ  
ВЕРТИКАЛЬНО УДЕРЖИВАЕМОГО ДЕРЕВА  
НА ВИБРОПОДВЕСЕ

*Введение.* Для уменьшения негативного воздействия лесозаготовок на лесную среду некоторые технологии рубок ухода предполагают вертикальный вынос срезанного дерева из лесосеки лесозаготовительной машиной [Жуков и др., 1997; Сидыганов и др., 2008; Lastochkin et al., 2017]. Удержание дерева в вертикальном положении при этом происходит или за счет жестких связей и массогабаритных параметров базового трактора, или за счет применения системы автоматической стабилизации.

Технология валки леса, при которой дерево удерживается в вертикальном положении за счет преобладающей массы базовой машины, в практике лесозаготовок достаточно распространена и известна [Андронов и др., 2022]. А вот система автоматической стабилизации вертикально удерживаемого дерева, компенсирующая внешние возмущающие воздействия, из-за своего несовершенства не получила практического применения, что говорит нам о необходимости дополнительного изучения данного вопроса и поиска соответствующих новых решений [Сидыганов и др., 2011]. Поэтому в рамках поискового научного исследования был рассмотрен вопрос удержания дерева в вертикальном положении за счет эффекта динамической стабилизации перевернутого маятника на осциллирующем подвесе. В основе исследования были использованы разработки, при которых устанавливалась связь верхнего предела устойчивости перевернутого маятника с потерей устойчивости нижнего положения [Бутиков, 2010].

*Целью работы* является анализ частоты колебаний вертикально удерживаемого дерева на виброподвесе при варьировании значений высоты дерева и амплитуды колебаний, позволяющий определить условия, при которых вертикальное дерево сохранит свою устойчивость.

*Материалы и методика исследования.* Удерживаемое в вертикальном положении дерево из-за своих физических свойств является довольно сложной системой, и для эффективного исследования его динамических параметров целесообразна определенная идеализация. Поэтому исследова-

ние динамической стабилизации вертикально удерживаемого дерева на виброподвесе было рассмотрено через анализ механических систем в виде математического и физического перевернутых маятников.

Определение условий динамической стабилизации на виброподвесе срезанного дерева в вертикальном положении было основано на известном условии, при котором момент силы инерции, действующий на отклоненный из перевернутого положения маятник, превосходит момент силы тяжести, стремящийся привести маятник в нижнее положение [Бутиков, 2010]:

$$a^2\omega^2 > 2gL, \quad (1)$$

где  $a$  – амплитуда колебаний;  $\omega$  – частота колебаний;  $g$  – ускорение свободного падения;  $L$  – длина перевернутого маятника.

Данное выражение нам показывает, что вертикальное положение перевёрнутого математического маятника устойчиво, если максимальная скорость  $\omega a$  осциллирующей оси больше, чем скорость  $\sqrt{2gL}$ , которую маятник, свободно падающий в поле тяжести, приобретает при падении с высоты, равной длине центра тяжести маятника.

*Результаты исследования.* В первом варианте при максимальной идеализации вертикально удерживаемое дерево было представлено в виде математического маятника, где вся его масса сосредоточена в центре тяжести дерева. При этом одной из характеристик, описывающих динамическую устойчивость вертикально удерживаемого дерева на виброподвесе, является частота его колебаний, которая, исходя из выражения (1), должна удовлетворять следующему условию:

$$\omega = \frac{\sqrt{2gL}}{a}. \quad (2)$$

Основываясь на варианте вибропривода захватно-срезающего устройства, который был ранее проработан авторами данного исследования, максимальную амплитуду колебания  $a$  вертикально удерживаемого дерева примем равной 0,4 м [Lastochkin et al., 2023].

Длина  $L$  для расчета будет равна высоте центра тяжести дерева  $h_{цт}$ , которую в зависимости от породы дерева можно определить по следующему выражению [Жуков и др., 2001]:

$$h_{цт} = k \cdot h_d, \quad (3)$$

где  $h_{цт}$  – высота центра тяжести дерева;  $h_d$  – высота дерева;  $k$  – коэффициент, равный для сосны – 0,37; березы и осины – 0,36; ели – 0,4.

Высоту деревьев, вырубаемых на рубках ухода в европейской части России, зададим для расчета от 6 до 18 м.

Подставляя заданные параметры амплитуды колебаний и высоты центра тяжести дерева в формулу (2), получим результаты минимально необходимой частоты колебаний для деревьев различной высоты (рис. 1) при динамическом удержании вертикального дерева в виде математического маятника.

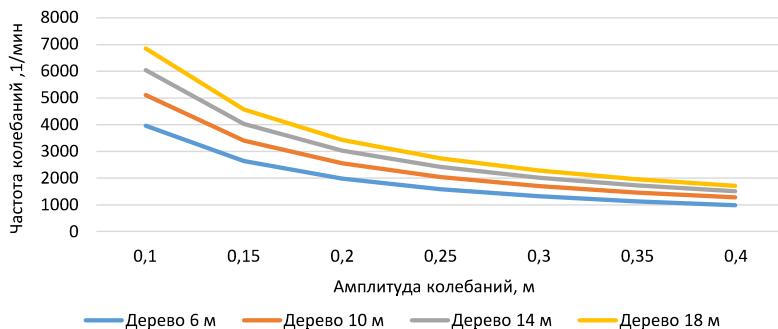


Рис. 1. Минимально необходимые частоты колебаний дерева (сосна) в виде математического маятника

Fig. 1. Graphs of the minimum required vibration frequency of a tree (pine) in the form of a mathematical pendulum

Из результатов видно, что минимально необходимая частота колебаний вертикально удерживаемого дерева соответствует максимальной амплитуде. Так при амплитуде 0,4 м для сосны высотой от 6 до 18 м минимально необходимая частота колебаний будет составлять от 16,5 до 28,5 Гц. Отдельно сравнивая результаты частот колебаний для сосны, ели и берескы, можно сказать, что максимальные отклонения не превышают 5,5%.

Во втором варианте дерево представили в виде физического маятника, имеющего известную длину, массу и момент инерции. В качестве длины маятника  $L$  в выражении (1) использовали приведенную длину физического маятника [Панченко и др., 2018]:

$$L = \frac{I}{ml}, \quad (4)$$

где  $I$  – момент инерции относительно оси вращения,  $m$  – масса стержня и  $l$  – длина стержня.

Если подставить данные физического маятника (4) в формулу (2), выражение необходимой частоты колебаний вертикально удерживаемого дерева в виде физического маятника будет иметь следующий вид:

$$\omega = \sqrt{\frac{2gI}{mla^2}}. \quad (5)$$

В первоначальном расчете вертикального дерева в виде физического маятника приняли, что масса кроны компенсирует неравномерность распределения массы ствола у вершины дерева. Поэтому более равномерное распределение массы ствола и вершины дерева по высоте позволило идеализировать его до однородного стержня.

Момент инерции прямого однородного стержня длиной  $l$  и массой  $m$ , где ось перпендикулярна к стержню и проходит через его конец, с учетом теоремы Гюйгенса – Штейнера имеет следующий вид [Панченко и др., 2018]:

$$I = \frac{1}{3}ml^2. \quad (6)$$

Тогда формула необходимой частоты колебания динамически удерживаемого вертикально дерева в виде однородного стержня с равномерно распределенной массой будет иметь следующий вид:

$$\omega > \sqrt{\frac{2gl}{3a^2}}. \quad (7)$$

Подставляя заданные параметры варьирования в формулу (7), получаем значения минимально необходимой частоты колебаний вертикального дерева в виде однородного стержня с равномерно распределенной массой (рис. 2).

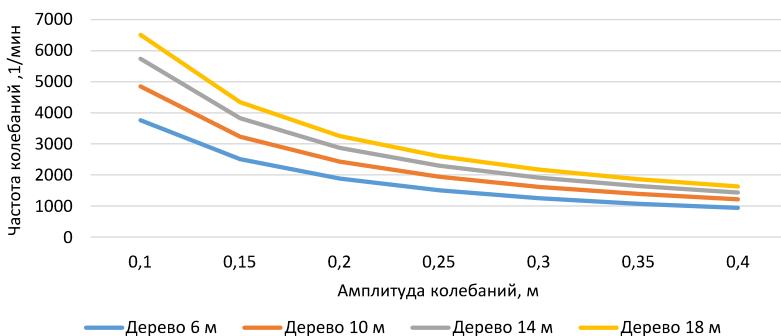


Рис. 2. Минимально необходимые частоты колебаний дерева (сосна) на основе физического маятника в виде однородного стержня

Fig. 2. Minimum required vibration frequencies of wood (pine) based on a physical pendulum in the form of a homogeneous rod

Из графика (рис. 2) видно, что при расчете частоты колебаний вертикально удерживаемого дерева разной высоты в виде однородного стержня при максимальной амплитуде колебаний 0,4 м частота варьируется от 15,6 Гц до 27,1 Гц, что почти на 5,5% меньше, чем при расчете для математического маятника.

В другом случае для расчета физического маятника был взят известный момент инерции дерева при валке относительно спила [Жуков и др., 2001]:

$$I = (0,21 \dots 0,22) \cdot m_d \cdot h_d^2, \quad (8)$$

где  $m_d$  – масса дерева,  $h_d$  – высота дерева.

Тогда выражение необходимой частоты колебания (5) динамически удерживаемого дерева в вертикальном положении на основе известного момента инерции относительно спила будет иметь следующий вид:

$$\omega = \frac{\sqrt{0,41gh_d}}{a}. \quad (9)$$

Визуальное представление результатов расчета минимально необходимой частоты колебаний дерева на основе известного момента инерции при валке относительно спила представлено на рис. 3.

График на рис. 3 показывает, что значения частот колебаний на основе физического маятника с известным моментом инерции относительно спила для деревьев высотой от 6 до 18 м при максимальной амплитуде колебаний 0,4 варьируются от 12,2 Гц до 21,2 Гц. Данный расчет позволил сократить на 21% значение частоты колебаний по сравнению с физическим маятником в виде однородного стержня.

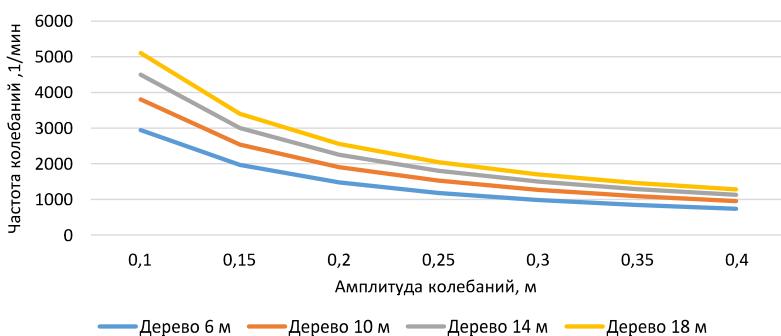


Рис. 3. Минимально необходимые частоты колебаний дерева (сосна) на основе физического маятника с известным моментом инерции при валке относительно спила

*Fig. 3. Minimum required vibration frequencies of a tree (pine) based on a physical pendulum with a known moment of inertia when felling relative to the cut*

*Выводы.* Проведен анализ частоты колебаний вертикально удерживающего дерева на виброподвесе при варьировании значений высоты дерева и амплитуды колебаний, позволяющий определить условия, при которых вертикальное дерево сохранит свою устойчивость.

Проведенный анализ частоты колебаний деревьев различной высоты показал, что минимальные значения дает расчет, выполненный на основе физического маятника с известным моментом инерции относительно спила. Например, для деревьев высотой от 6 до 18 м при максимальной амплитуде колебаний 0,4 значения минимально необходимых колебаний варьируются от 12,2 Гц до 21,2 Гц, что на 21% меньше значений, полученных в результате расчета на основе физического маятника в виде однородного стержня и на 26 % меньше значений, полученных в результате расчета на основе математического маятника.

Анализ графиков частоты колебаний показывает, что при амплитуде колебаний, начиная от 0,4 м и выше, разница частот колебаний деревьев различной высоты становится минимальной, и появляется возможность подбора на практике элементов вибропривода, при которых возможно реализовать принцип вертикального удержания дерева на осциллирующем подвесе для определенных параметров деревьев.

*Сведения о финансировании исследования.* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00421 «Обоснование конструкции и параметров узкозахватного навесного технологического оборудования с вибрирующим подвесом лесозаготовительной машины», <https://rscf.ru/project/23-29-00421/>.

*Конфликт интересов.* Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### **Библиографический список**

*Андронов А.В., Зверев И.А., Тюрина М.С., Тарадин Г.С., Михайлов О.А.* Модели формирования основных параметров колесных узкозахватных валочно-пакетирующих машин фронтального типа // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. № 241. С. 184–195. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.241.184-195

*Бутиков Е.И.* Стабилизация перевернутого маятника (60 лет маятнику Капицы) // Компьютерные инструменты в образовании. 2010. № 5. С. 39–51.

*Жуков А.В., Аслоловский М.К., Мохов С.П.* Эксплуатационные испытания узкозахватных валочных машин на рубках ухода // Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 1997. № 5. С. 43–48.

*Жуков А.В., Гороновский А.Р., Мохов С.П., Клоков Д.В.* Определение основных параметров динамических систем «Лесная машина – предмет труда»: учеб. пособие. Минск: БГТУ, 2001. 48 с.

Панченко В.А., Дубровин В.С. Механика. Теоретическая механика, техническая механика: учеб. пособие. М.: Российский университет транспорта (МИИТ), 2018. 191 с.

Патент 2010125781/21 РФ, Захватно-срезающее устройство №100874 / Сидыганов Ю.Н., Онучин Е.М., Ласточкин Д.М. Опубл. 10.01.2011. Бюл. № 1.

Патент 2023111991 РФ, Захватно-срезающее устройство №2810547 / Ласточкин Д.М., Медяков А.А., Осташенков А.П. Опубл. 27.12.2023. Бюл. № 36.

Сидыганов Ю.Н., Онучин Е.М., Ласточкин Д.М. Модульные машины для рубок ухода и лесовосстановления: монография. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2008. 336 с.

Lastochkin D.M., Onuchin E.M., Medyakov A.A., Kostromin D.V., Ostashenkov A.P. Study of parameters of elements of a felling head for lifting and moving trees for the purpose of clearing agricultural lands and agroforestry // Journal of Applied Engineering Science. 2017. T.15. № 3. P. 247-257. DOI: 10.5937/jaes15-13713.

## References

Andronov A.V., Zverev I.A., Tyurina M.S., Taradin G.S., Mikhailov O.A. Models for the formation of the main parameters of wheeled narrow-grip front-type feller bunchers. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2022, iss. 241, pp. 184–195. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.241.184-195. (In Russ.)

Butikov E.I. Stabilization of an inverted pendulum (60 years of the Kapitsa pendulum). *Computer tools in education*, 2010, no. 5, pp. 39–51. (In Russ.)

Lastochkin D.M., Onuchin E.M., Medyakov A.A., Kostromin D.V., Ostashenkov A.P. Study of parameters of elements of a felling head for lifting and moving trees for the purpose of clearing agricultural lands and agroforestry. *Journal of Applied Engineering Science*, 2017, vol. 15, no. 3, pp. 247–257. DOI: 10.5937/jaes15-13713.

Panchenko V.A., Dubrovin V.S. Mechanics. Theoretical mechanics, technical mechanics: textbook. M.: Russian University of Transport (MIIT), 2018. 191 p. (In Russ.)

Patent 2010125781/21 RU, Zakhvatno-srezayushcheye ustroystv [Grabbing and cutting device] / Sidiganov Yu.N., Onuchin E.M., Lastochkin D.M. Publ. 10.01.2011; bul. no. 1. (In Russ.)

Patent 2023111991 RU, Zakhvatno-srezayushcheye ustroystv [Grabbing and cutting device]. / Lastochkin D.M., Medyakov A.A., Ostashenkov A.P. Publ. 27.12.2023; bul. no. 36. (In Russ.)

Sidiganov Yu.N., Onuchin E.M., Lastochkin D.M. Modular machines for thinning and reforestation: monograph. Yoshkar-Ola: MarGTU, 2008. 336 p. (In Russ.)

Zhukov A.V., Asmolovsky M.K., Mokhov S.P. Operational tests of narrow-cut felling machines on thinnings. *Proceedings of the Belarusian State Technological University. Series 2. Forestry and woodworking industry*, 1997, no. 5, pp. 43–48. (In Russ.)

Zhukov A.V., Goronovsky A.R., Mokhov S.P., Klokov D.V. Determination of the main parameters of dynamic systems «Forestry machine – an object of labor»: textbook. Minsk: BSTU, 2001. 48 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 21.03.2024

**Ласточкин Д.М., Сидыганов Ю.Н., Кретинин В.И., Медяков А.А.**  
Анализ частоты колебаний вертикально удерживаемого дерева на виброподвесе  
// Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 249.  
С. 220–229. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.220-229

В статье приводится анализ частоты колебаний вертикально удерживаемого дерева разной высоты на виброподвесе, который позволяет определить условия, при которых вертикальное дерево сохранит свою устойчивость. Были рассмотрены механические системы в виде математического и физического перевернутых маятников. В расчете при максимальной идеализации вся масса вертикально удерживаемого дерева была сосредоточена в его центре тяжести. В расчете на основе физического маятника в первом случае идеализация дерева была проведена в виде равномерного распределения массы ствола и вершины дерева по высоте, во втором случае рассматривалась система с известным моментом инерции дерева при вальке относительно его спила. Проведенный анализ показал, что оптимальные значения частоты колебаний деревьев различной высоты – у системы на основе физического маятника с известным моментом инерции относительно спила. Например, для деревьев высотой от 6 до 18 м при максимальной амплитуде колебаний 0,4 значения минимально необходимых колебаний варьируются от 12,2 Гц до 21,2 Гц, что на 21% меньше значений расчета на основе физического маятника в виде однородного стержня или на 26 % меньше значений расчета системы на основе математического маятника. Также полученные графики частоты колебаний показывают, что при амплитуде колебаний начиная от 0,4 м и выше разница частоты колебаний деревьев различной высоты становится минимальной, и появляется возможность подбора на практике элементов вибропривода для деревьев различных параметров.

**Ключевые слова:** вертикальное дерево, динамическая стабилизация, вибропривод, осциллирующий подвес, перевернутый маятник.

**Lastochkin D.M., Sidiganov Yu.N., Cretinin V.I., Medyakov A.A.** Analysis of the vibration frequency of a vertically held tree on a vibration suspension. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 249, pp. 220–229 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.220-229

The article provides an analysis of the vibration frequency of a vertically held tree of different heights on a vibrating suspension, which makes it possible to determine the conditions under which a vertical tree will retain its stability. Mechanical systems in the form of mathematical and physical inverted pendulums were considered. In the calculation, with maximum idealization, the entire mass of a vertically held tree was concentrated at its center of gravity. In the calculation based on a physical pendulum, in the first case, the idealization of the tree was carried out in the form of a uniform

distribution of the mass of the trunk and top of the tree along the height; in the second case, a system with a known moment of inertia of the tree when felling relative to its cut was considered. The analysis showed that the most optimal values of the oscillation frequency of trees of different heights are found in a system based on a physical pendulum with a known moment of inertia relative to the cut. For example, for trees with a height of 6 to 18 m with a maximum amplitude of oscillations of 0.4, the values of the minimum required oscillations vary from 12.2 Hz to 21.2 Hz, which is 21% less than the calculation values based on a physical pendulum in the form of a homogeneous rod or 26% less than the calculation values of the system based on a mathematical pendulum. Also, the obtained graphs of the vibration frequency show that with an amplitude of vibration starting from 0.4 m and above, the difference in the vibration frequency of trees of different heights becomes minimal, and it becomes possible to select in practice vibration drive elements for trees of different parameters.

**Keywords:** vertical tree, dynamic stabilization, vibration drive, oscillating suspension, inverted pendulum.

---

**ЛАСТОЧКИН Денис Михайлович** – доцент кафедры эксплуатации машин и оборудования Поволжского государственного технологического университета, кандидат технических наук, доцент. SPIN-код: 7597-7487. ORCID: 0000-0002-0442-384X.

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

**LASTOCHKIN Denis M.** – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Machinery and Equipment Operation of the Volga State University of Technology. SPIN code: 7597-7487. ORCID: 0000-0002-0442-384X.

424000. Lenina sq. 3. Yoshkar-Ola. Republic of Mari El. Russia. E-mail: lastochkindm@volgatech.net

**СИДЫГАНОВ Юрий Николаевич** – профессор кафедры эксплуатации машин и оборудования Поволжского государственного технологического университета, доктор технических наук, профессор. SPIN-код: 5527-9829. ORCID: 0000-0003-3665-5431.

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

**SIDIGANOV Yury N.** – DSc (Technical), Professor of the Department of Operation of Machines and Equipment of the Volga State Technological University. SPIN-код: 5527-9829. ORCID: 0000-0003-3665-5431.

424000. Lenina sq. 3. Yoshkar-Ola. Republic of Mari El. Russia. E-mail: SidyganovYN@volgatech.net

**КРЕТИНИН Виктор Иванович** – доцент кафедры автоматизации, метрологии и управления в технических системах Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук, доцент. 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. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: KVI\_1960@mail.ru

**МЕДЯКОВ Андрей Андреевич** – заведующий кафедрой Энергообеспечения предприятий Поволжского государственного технологического университета, кандидат технических наук, доцент. SPIN-код: 5189-6826. ORCID: 0000-0002-7484-1422.

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

**MEDYAKOV Andrey A.** – PhD (Technical), Head of the Department of Energy Supply of Enterprises of the Volga State Technological University. SPIN code: 5189-6826. ORCID: 0000-0002-7484-1422.

424000. Lenina sq. 3. Yoshkar-Ola. Republic of Mari El. Russia. E-mail: MedyakovAA@volgattech.net

С.А. Чудинов

**ОЦЕНКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
СТРОИТЕЛЬСТВА ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ  
ИЗ ФИБРОЦЕМЕНТОГРУНТА**

*Введение.* Эффективность функционирования лесозаготовительной отрасли зависит от надежности работы транспортной инфраструктуры, одним из основных элементов которой являются лесовозные автомобильные дороги. Лесовозные автомобильные дороги должны обеспечивать транспортно-эксплуатационные характеристики в течение всего срока их службы. Учитывая сложные природные условия лесной зоны и высокие транспортные нагрузки, данных характеристик возможно достичь только при условии устройства конструкций дорожных одежд и применения дорожно-строительных материалов, соответствующих требуемым параметрам на основании прочностных расчетов. При этом стоимость строительно-монтажных работ устройства дорожных одежд должна быть минимальной. Поэтому поиск эффективных, ресурсосберегающих и экономичных дорожно-строительных материалов для строительства автомобильных дорог в условиях лесной зоны является актуальным.

Традиционными дорожно-строительными материалами для устройства слоев оснований и покрытий лесовозных автомобильных дорог являются инертные материалы – щебень и песок. Однако конструкции дорожных одежд из каменных материалов требуют использования значительных их объемов, что, с учетом затрат на их транспортировку, существенно увеличивает стоимость строительно-монтажных работ в целом. Особенно актуальна данная проблема в районах с недостатком каменных материалов [Chudinov, 2020].

Одной из альтернативных технологий является строительство конструктивных слоев лесовозных автомобильных дорог из укрепленных грунтов [Лыщик и др., 2013; Степанец и др., 2020; Cho et al., 2019]. Современным направлением технологии укрепления грунтов является устройство дорожных одежд из фиброкомпозитного грунта [Чудинов, 2022]. Фиброкомпозитный грунт – это композиционный материал, получаемый при смешении местного природного грунта с добавками портландцемента, волокнами фибры и воды. Высокие физико-механические показатели, морозостойкость, трещинностойкость и долговечность позволяют применять фиброкомпозитный грунт в

слоях оснований и покрытий дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог [Ali et al., 2020; De Jesús Arrieta Baldovino et al., 2020; Elkhebu et al., 2019; Vijayan, 2020]. Применение фиброцементогрунта является экономически выгодным ввиду того, что основным компонентом данного материала является местный природный грунт земляного полотна, стоимость и затраты на транспортировку которого не будут учитываться при расчете сметной стоимости устройства конструктивных слоев дорожных одежд.

Целью исследования является оценка технико-экономической эффективности строительства лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунта в сравнении с использованием инертных материалов, с учетом их стоимости и транспортно-логистической схемы доставки.

*Методика исследования.* Оценка технико-экономической эффективности производилась путем расчета и сравнения сметной стоимости строительства 1 км равнопрочных конструкций дорожных одежд лесовозной автомобильной дороги III-л категории, выполненных из фиброцементогрунта и инертных материалов (щебень и песок) в зависимости от транспортно-логистической схемы их доставки.

Исследование проводилось в приведенной ниже последовательности:

1. Расчет конструкций дорожных одежд из фиброцементогрунта и инертных материалов (щебень и песок) с целью приведения их к единым прочностным показателям для лесовозной автомобильной дороги III-л категории;

2. Расчет объемов работ по устройству конструкций дорожных одежд из фиброцементогрунта и инертных материалов (щебень и песок) лесовозной автомобильной дороги III-л категории протяженностью 1 км;

3. Разработка вариантов транспортно-логистической схемы доставки дорожно-строительных материалов для устройства конструкций дорожных одежд из фиброцементогрунта и инертных материалов (щебень и песок);

4. Расчет сметной стоимости устройства конструкций дорожных одежд из фиброцементогрунта и инертных материалов (щебень и песок) лесовозной автомобильной дороги III-л категории протяженностью 1 км по вариантам транспортно-логистической схемы доставки дорожно-строительных материалов.

Для приведения рассматриваемых конструкций дорожных одежд к единым прочностным показателям, в программном комплексе «КРЕДО РАДОН 4.2» произведен расчет по методике ПНСТ 542-2021<sup>1</sup> для условий Свердловской области. Параметры исходных данных представлены в табл. 1.

---

<sup>1</sup> ПНСТ 542-2021. Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования.

Таблица 1

## Исходные данные для расчета дорожных одежд

## Initial data for calculating road pavements

| № п/п | Наименование показателя   | Значение показателя |
|-------|---|---------------------|
| 1     | Дорожно-климатическая зона  | 2                   |
| 2     | Схема увлажнения рабочего слоя  | 2                   |
| 3     | Количество расчетных дней в году  | 140                 |
| 4     | Глубина промерзания, см   | 200                 |
| 5     | Категория дороги  | III-л               |
| 6     | Количество полос движения   | 1                   |
| 7     | Тип конструкции дорожной одежды   | переходный          |
| 8     | Срок службы покрытия, лет   | 5                   |
| 9     | Межремонтный срок покрытия, лет   | 3                   |
| 10    | Коэффициент надежности  | 0,82                |
| 11    | Ширина проезжей части, м  | 5,5                 |
| 12    | Грунт рабочего слоя   | Суглинок легкий     |
| 13    | Расчетная влажность грунта, доли ед.  | 0,710               |
| 14    | Нормативная статистическая нагрузка на ось, кН  | 117,70              |
| 15    | Давление в шинах, МПа   | 0,60                |
| 16    | Диаметр штампа, см  | 40,29               |
| 17    | Расчетное число приложений на полосу приведенной нагрузки на последний год службы, ед./сут. | 398,92              |

Параметры равнопрочных конструкций дорожных одежд из фибробетоногрунта и инертных материалов (щебень и песок) представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

## Параметры конструкции дорожной одежды из фибробетоногрунта

## Design parameters of road pavement made of fiber cement soil

| № слоя                        | Наименование материала слоя  | Расчетная толщина слоя, см |
|-------------------------------|--|----------------------------|
| 1                             | Фибробетоногрунт, марка по прочности М60, ГОСТ 70452-2022 <sup>2</sup> | 63                         |
| 2                             | Суглинок легкий  | —                          |
| Суммарная толщина конструкции |  | 63                         |

<sup>2</sup> ГОСТ 70452-2022. Дороги автомобильные общего пользования. Грунты стабилизированные и укрепленные неорганическими вяжущими.

Таблица 3

**Параметры конструкции дорожной одежды из песка и щебня**  
**Design parameters for road pavement made of sand and crushed stone**

| № слоя                        | Наименование материала слоя  | Расчетная толщина слоя, см |
|-------------------------------|--|----------------------------|
| 1                             | Щебень трудноуплотняемый фракции 31,5-63 мм по ГОСТ 32703-2014 <sup>3</sup> мм с заклинкой фракционным мелким щебнем | 26                         |
| 2                             | Щебень трудноуплотняемый фракции 31,5-63 мм по ГОСТ 32703-2014 мм с заклинкой фракционным мелким щебнем              | 30                         |
| 3                             | Песок средней крупности с содержанием пылевато-глинистой фракции 5% ГОСТ 32824-2014 <sup>4</sup>                     | 20                         |
| 4                             | Суглинок легкий  | -                          |
| Суммарная толщина конструкции |  | 76                         |

На основании приведенных значений толщин слоев рассчитаны показатели объемов работ по устройству конструкций дорожных одежд из фиброцементогрунта и инертных материалов (щебень и песок) лесовозной автомобильной дороги III-л категории протяженностью 1 км, представленные в табл. 4 и 5.

Подбор рецепта фиброцементогрунтовой смеси с содержанием портландцемента ЦЕМ II/В-И 32,5Б по ГОСТ 31108-2020<sup>5</sup> – 7% от массы сухого грунта и фибры на основе базальтовых волокон, полученных из отходов производства теплоизоляционных плит – 1,5% от массы сухого грунта, производился в соответствии с ГОСТ 70452-2022<sup>6</sup>.

Расчет сметной стоимости устройства конструкций дорожных одежд произведен в зависимости от различных вариантов транспортно-логистической схемы доставки дорожно-строительных материалов. В расчет приняты следующие значения среднего расстояния возки дорожно-строительных материалов от места производства (поставщика) до места строительства дорожной одежды:

- щебень, портландцемент: 30 км; 50 км; 100 км; 150 км; 200 км; 250 км; 300 км; 350 км; 400 км; 450 км; 500 км.
- песок, базальтовая фибра: 30 км; 100 км; 200 км; 300 км; 400 км; 500 км.

<sup>3</sup> ГОСТ 32703-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и гравий из горных пород. Технические требования.

<sup>4</sup> ГОСТ 32824-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Песок природный. Технические требования.

<sup>5</sup> ГОСТ 31108-2020 ГОСТ 31108-2020 Цементы общестроительные. Технические условия.

<sup>6</sup> ГОСТ Р 70452-2022 Дороги автомобильные общего пользования. Грунты стабилизированные и укрепленные неорганическими вяжущими. Общие технические условия.

Таблица 4

**Значения объемов работ по устройству конструкции дорожной одежды из фибронементогрунта**

**Values of the volume of work for the construction of road pavement structures made of fiber cement soil**

| №<br>п/п | Наименование работ  | Ед. изме-<br>рения | Объем |
|----------|---|--------------------|-------|
| 1        | Разработка грунта 2 группы бульдозером мощностью 79 кВт с перемещением до 10 м  | м <sup>3</sup>     | 2310  |
| 2        | Укрепление грунта толщиной 21 см смещением с портландцементом и с базальтовой фиброй навесными фрезами (масса портландцемента = 161122,5 кг, масса базальтовой фибры = 62658,75 кг) | м <sup>2</sup>     | 5500  |
| 3        | Укрепление грунта толщиной 21 см смещением с портландцементом и с базальтовой фиброй навесными фрезами (масса портландцемента = 161122,5 кг, масса базальтовой фибры = 62658,75 кг) | м <sup>2</sup>     | 5500  |
| 4        | Укрепление грунта толщиной 21 см смещением с портландцементом и с базальтовой фиброй навесными фрезами (масса портландцемента = 161122,5 кг, масса базальтовой фибры = 62658,75 кг) | м <sup>2</sup>     | 5500  |

Таблица 5

**Значения объемов работ по устройству конструкции дорожной одежды из песка и щебня**

**Values of the volume of work for the construction of road pavement structures made of sand and crushed stone**

| №<br>п/п | Наименование работ  | Ед. изме-<br>рения | Объем |
|----------|---|--------------------|-------|
| 1        | Разработка грунта 2 группы бульдозером мощностью 79 кВт с перемещением до 10 м            | м <sup>3</sup>     | 1320  |
| 2        | Устройство дополнительного слоя основания из песка средней крупности                      | м <sup>2</sup>     | 5500  |
| 3        | Устройство основания из щебня фр. 31,5-63 мм по ГОСТ 32703-2014 с заклинкой мелким щебнем | м <sup>2</sup>     | 5500  |
| 4        | Устройство покрытия из щебня фр. 31,5-63 мм по ГОСТ 32703-2014 с заклинкой мелким щебнем  | м <sup>2</sup>     | 5500  |
| 5        | Устройство обочин из разработанного грунта  | м <sup>2</sup>     | 2520  |
|          |   | м <sup>3</sup>     | 1320  |

Расчет сметной стоимости производился базисно-индексным методом с применением федеральной сметно-нормативной базы ФСНБ-2001 в редакции 2020 года (с Изм. 1-9) в программе ГРАНД-Смета в соответствии с Методикой определения сметной стоимости строительства<sup>17</sup>, в текущем уровне цен на III квартал 2023 года. В расчет приняты следующие стоимости дорожно-строительных материалов в текущем уровне цен:

- щебень: 2079 руб. на 1 м<sup>3</sup>;
- песок: 1210 руб. за 1 м<sup>3</sup>;
- портландцемент: 10000 руб. за 1 тонну;
- базальтовая фибра (фибра на основе базальтовых волокон, полученных из отходов производства теплоизоляционных плит): 3000 руб. за 1 тонну.

Статистический анализ и визуализация результатов расчетов производились в программном комплексе Statistica.

*Результаты исследования.* Поверхность отклика стоимости работ по устройству дорожной одежды из фибробетоногрунта в зависимости от среднего расстояния возки портландцемента и базальтовой фибры представлена на рис. 1. Минимальная стоимость работ – 9458 тыс. руб. – соответствует расстояниям возки портландцемента и базальтовой фибры до 30 км. При расстоянии возки компонентов фибробетоногрунтовой смеси 500 км, стоимость работ увеличивается на 15% и составляет 10911 тыс. руб. Показатели среднего расстояния возки портландцемента в большей степени чем для базальтовой фибры оказывают влияние на увеличение общей стоимости работ.

Поверхность отклика стоимости работ по устройству дорожной одежды из инертных материалов в зависимости от среднего расстояния возки щебня и песка представлена на рис. 2. Минимальная стоимость работ – 9539 тыс. руб. – соответствует расстояниям возки щебня и песка до 30 км. При расстоянии возки щебня и песка 500 км, стоимость работ увеличивается на 233% и составляет 31811 тыс. руб. Показатели среднего расстояния возки щебня оказывают влияние на увеличение общей стоимости работ в большей степени, чем для песка.

---

<sup>7</sup> Методика определения сметной стоимости строительства, утвержденной Приказом Минстроя России от 04.08.2020 № 421/пр в редакции приказа от 07.07.2022 № 557/пр

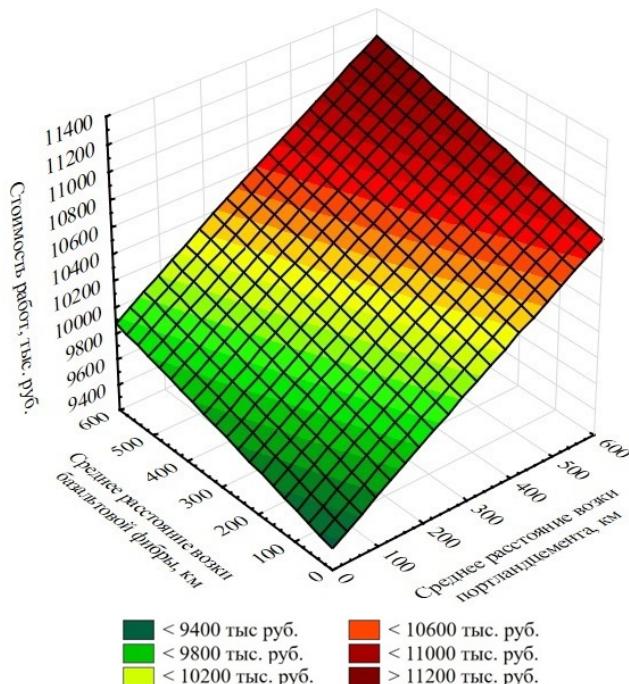


Рис. 1. Поверхность отклика стоимости работ по устройству дорожной одежды из фибробетоногрунта в зависимости от среднего расстояния возки портландцемента и базальтовой фибры

Fig. 1. Response surface of the cost of construction of road pavement from fiber-cement soil depending on the average distance of transportation of Portland cement and basalt fiber

*Обсуждение.* На основании результатов проведенных исследований, среднее расстояние возки дорожно-строительных материалов оказывает влияние на общую стоимость строительства дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог. При расстоянии до 30 км общая стоимость строительства в целом одинакова при устройстве конструкции дорожной одежды из инертных материалов (щебень, песок) или из фибробетоногрунта. Однако, при увеличении дальности возки дорожно-строительных материалов, технико-экономическая эффективность использования фибробетоногрунта становится более выраженной по отношению к инертным материалам. Так, при средней дальности возки 500 км стоимость строительства 1 км дорожной одежды из щебня и песка составляет 31811 тыс. руб., а из фибробетоногрунта – 10911 тыс. руб., т. е. в 2,92 раза дешевле.

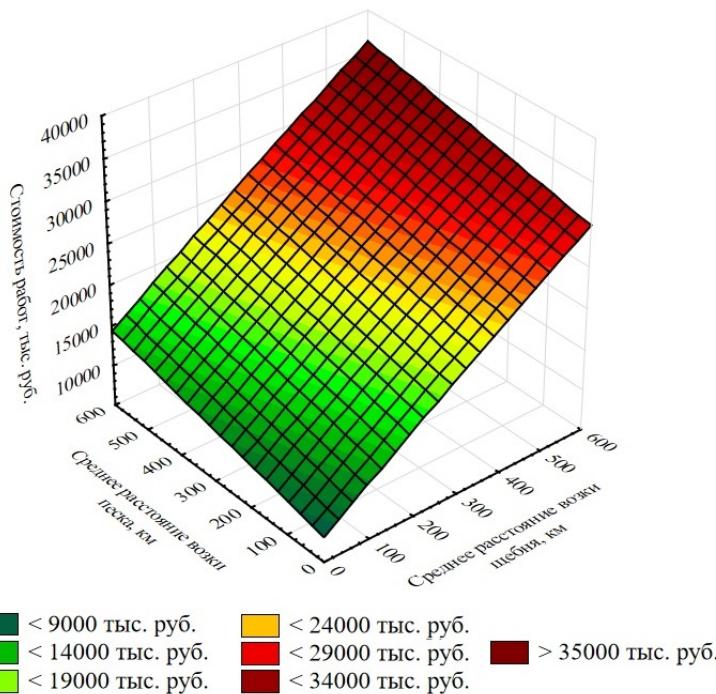


Рис. 2. Поверхность отклика стоимости работ по устройству дорожной одежды из инертных материалов в зависимости от среднего расстояния возки щебня и песка

Fig. 2. Response surface of the cost of work on constructing road pavement from inert materials depending on the average distance of transporting crushed stone and sand

Технико-экономическое преимущество использования фибробетонного грунта в отличие от инертных материалов объясняется тем, что для устройства конструкций дорожных одежд требуются значительные объемы щебня и песка, что увеличивает транспортные расходы при возрастании дальности их возки. Для устройства фибробетонного грунта требуются сравнительно небольшие объемы добавок портландцемента и фибры, а значит и незначительные транспортные затраты на их транспортировку. С учетом отдаленности лесозаготовительных районов от мест производства инертных материалов и от сети автомобильных дорог общего пользования, применение фибробетонного грунта в конструкции дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог будет иметь, как пра-

вило, преимущественную технико-экономическую эффективность по сравнению с использованием инертных дорожно-строительных материалов.

Таким образом, при конструировании дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог важно учитывать транспортно-логистическую схему доставки дорожно-строительных материалов, обеспечивая минимальную стоимость строительства дорог. На основании полученных данных, для оценки технико-экономической эффективности строительства лесовозных автомобильных дорог из фибробетоногрунта разработаны расчетные номограммы стоимости строительства 1 км дорожной одежды из фибробетоногрунта и из инертных материалов (рис. 3, 4). Оценку технико-экономической эффективности строительства следует производить путем сравнения полученных по номограммам стоимостей строительства дорожной одежды из фибробетоногрунта и из инертных материалов в зависимости от расстояний возки дорожно-строительных материалов.

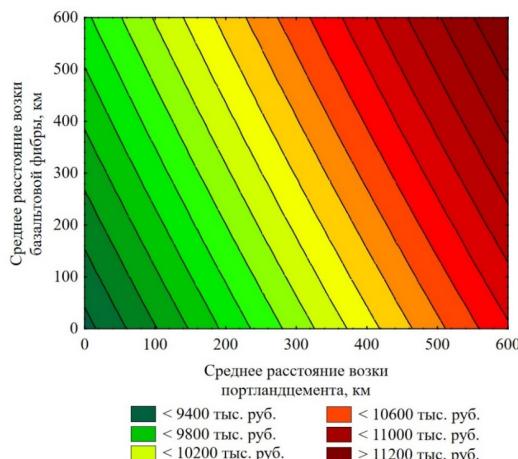


Рис. 3. Номограмма стоимости работ по устройству дорожной одежды из фибробетоногрунта в зависимости от среднего расстояния возки портландцемента и базальтовой фибры

Fig. 3. Nomogram of the cost of work on the construction of road pavement from fiber cement soil, depending on the average distance of transportation of Portland cement and basalt fiber

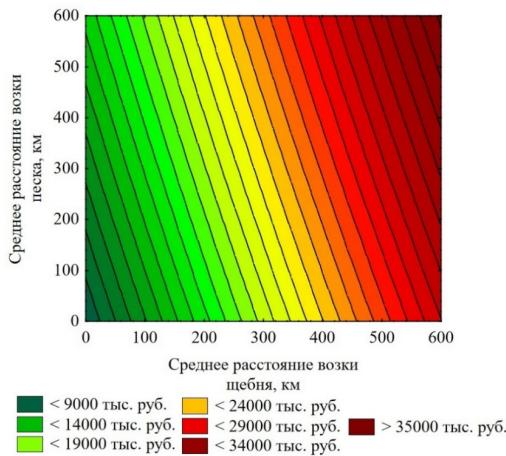


Рис. 4. Номограмма стоимости работ по устройству дорожной одежды из инертных материалов в зависимости от среднего расстояния возки щебня и песка

Fig. 4. Nomogram of the cost of work on constructing road pavement from inert materials depending on the average distance for transporting crushed stone and sand

**Заключение.** Результаты исследований показали, что на стоимость строительства дорожной одежды лесовозных автомобильных дорог в значительной степени влияет транспортно-логистическая схема доставки материалов. При средней дальности возки до 30 км стоимость устройства дорожной одежды из фибропементогрунта практически одинакова по сравнению с использованием традиционных инертных материалов – песка и щебня. С увеличением дальности возки стоимость устройства дорожной одежды из фибропементогрунта более экономически эффективна, чем равнопрочная конструкция из инертных материалов. Для оперативной оценки технико-экономической эффективности строительства лесовозных автомобильных дорог из фибропементогрунта разработаны номограммы для определения стоимости в зависимости от среднего расстояния возки дорожно-строительных материалов.

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

#### Библиографический список

Лыцик П.А., Плыщевский С.В., Науменко А.И. Использование комплексного вяжущего для укрепления грунтов земляного полотна лесных автомобильных дорог // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2013. № 2 (158). С. 39–42.

Патент 2785742 С1 РФ, МПК E02D 3/12, E01C 3/04, E01C 7/36, C04B 28/04, C04B 111/20. Фиброцементогрунтовая смесь: № 2022105876: заявл. 05.03.2022: опубл. 12.12.2022 / С.А. Чудинов.

Степанец В.Г., Герасимова С.А. Основания дорожных одежд из укрепленных грунтов повышенной прочности и морозоустойчивости // Молодой ученый. 2020. № 22 (312). С. 148–154.

Чудинов С.А. Совершенствование технологии укрепления грунтов в строительстве автомобильных дорог лесного комплекса: моногр. Екатеринбург: ГЛТУ, 2022. 164 с.

Ali M, Aziz M, Hamza M, Madni M.F. Engineering properties of expansive soil treated with polypropylene fibers // Geomech Eng. 2020. No. 22. P. 227–236.

Cho Y.K., Jung S.H., Choi Y.C. Effects of chemical composition of fly ash on compressive strength of fly ash cement mortar // Constr Build Mater. 2019. No. 204. P. 255–264.

Chudinov S. Improving the physical and mechanical properties of fortified soil for road construction in the forest zone // IOP Conference Series: materials Science and Engineering. 2020. No 217. P. 012007.

De Jesús Arrieta Baldovino J., Dos Santos Izzo R., Rose J.L., Avanci M.A. Geopolymers based on recycled glass powder for soil stabilization // Geotechn Geolog Eng. 2020. No. 38(4). P. 4013–4031.

Elkhebu A., Zainorabidin A., Asadi A. et al. Effect of incorporating multifilament polypropylene fibers into alkaline activated fly ash soil mixtures // Soils Found. 2019. No. 59. P. 2144–2154.

Vijayan D.S. Effect of Solid waste based stabilizing material for strengthening of Expansive soil // Environmental Technology & Innovation. 2020. No. 20. P. 54–61.

## References

Ali M., Aziz M., Hamza M., Madni M.F. Engineering properties of expansive soil treated with polypropylene fibers. *Geomech Eng*, 2020, no. 22, pp. 227–236.

Cho Y.K., Jung S.H., Choi Y.C. Effects of chemical composition of fly ash on compressive strength of fly ash cement mortar. *Constr Build Mater*, 2019, no. 204, pp. 255–264.

Chudinov S. Improving the physical and mechanical properties of fortified soil for road construction in the forest zone. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, no. 817, p. 012007.

Chudinov S.A. Improving the technology of soil stabilization in the construction of roads of the forestry complex: monograph. Ekaterinburg: USFEU Publ., 2022. 164 p. (In Russ.)

Chudinov S.A. Fiber cement soil mixture. Patent RF, no. RU 2 785 742 C1, 2022. (In Russ.)

*De Jesús Arrieta Baldovino J, Dos Santos Izzo R, Rose J.L, Avanci M.A.* Geopolymers based on recycled glass powder for soil stabilization. *Geotechn Geolog Eng.*, 2020, no. 38(4), pp. 4013–4031.

*Elkhebu A., Zainorabidin A., Asadi A. et al.* Effect of incorporating multifilament polypropylene fibers into alkaline activated fly ash soil mixtures. *Soils Found*, 2019, no. 59, pp. 2144–2154.

*Lyshchik P.A., Plyshevsky S.V., Naumenko A.I.* The use of a complex binder to strengthen the subgrade soils of forest roads. *Proceedings of BSTU. Forestry and woodworking industry*, 2013, no. 2 (158). pp. 39–42. (In Russ.)

*Stepanets V.G., Gerasimova S.A.* Pavement bases from reinforced soils of increased strength and frost resistance. *Young scientist*, 2020, no. 22 (312). pp. 148–154. (In Russ.)

*Vijayan D.S.* Effect of Solid waste based stabilizing material for strengthening of Expansive soil. *Environmental Technology & Innovation*, 2020, no. 20, pp. 54–61.

*Материал поступил в редакцию 21.12.2023*

---

**Чудинов С.А.** Оценка технико-экономической эффективности строительства лесовозных автомобильных дорог из фибробетоногрунта // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 249. С. 230–243. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.230-243

Строительство лесовозных автомобильных дорог должно обеспечивать нормативные качественные показатели дорожных одежд при минимальной стоимости работ. Традиционно дорожные одежды устраивают из инертных материалов: щебня и песка. Сложные природные условия лесной зоны и высокие транспортные нагрузки требуют использования значительных объемов инертных материалов, при этом затраты на их транспортировку существенно увеличивают общую стоимость работ. Эффективной технологией в условиях лесной зоны является строительство дорожных одежд из фибробетоногрунта, получаемого при смешении местного природного грунта с добавками портландцемента, волокон фибры и воды. В сравнении с объемами использования инертных материалов, содержание добавок в составе фибробетоногрунтовых смесей является незначительным, что является преимуществом для снижения транспортных расходов и стоимости работ в целом. Для оценки технико-экономической эффективности рассчитаны параметры конструкций и объемы работ по устройству двух равнопрочных дорожных одежд: из фибробетоногрунта и из инертных материалов (щебня и песка), лесовозной автомобильной дороги III-л категории, протяженностью 1 км. Произведены расчеты и составлены поверхности отклика сметной стоимости строительства данных конструкций дорожных одежд в зависимости от различной дальности возки используемых дорожно-строительных материалов.

На основании результатов исследований определено, что параметры транспортно-логистической схемы доставки материалов существенно влияют на транспортные расходы и общую сметную стоимость строительства. При средней дальности возки до 30 км, сметная стоимость устройства фибропементогрунтовых дорожных одежд практически одинакова по сравнению с использованием инертных материалов. При увеличении дальности возки дорожно-строительных материалов более 30 км, применение фибропементогрунтовых дорожных одежд экономически эффективно, относительно равнопрочных конструкций из щебня и песка. Разработаны номограммы определения стоимости работ по устройству дорожных одежд в зависимости от расстояния возки дорожно-строительных материалов для оперативной оценки технико-экономической эффективности строительства лесовозных автомобильных дорог из фибропементогрунта.

**Ключевые слова:** фибропементогрунт, укрепленный грунт, экономическая эффективность, дорожная одежда, лесовозная дорога, сметная стоимость.

**Chudinov S.A.** Assessment of the technical and economic efficiency of the construction of logging roads made of fiber cement soil. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 249, pp. 230–243 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.230-243

The construction of logging roads should ensure standard quality indicators of road pavements at a minimum cost of work. Traditionally, road pavements are made from inert materials – crushed stone and sand. The difficult natural conditions of the forest zone and high transport loads require the use of significant volumes of inert materials, while the costs of their transportation significantly increase the total cost of the work. An effective technology in the conditions of a forest zone is the construction of road pavements from fiber cement soil, obtained by mixing local natural soil with the addition of Portland cement, fiber fiber and water. In comparison with the volumes of use of inert materials, the content of additives in the composition of fiber cement-soil mixtures is insignificant, which is an advantage for reducing transport costs and the cost of work in general. To assess the technical and economic efficiency, the design parameters and volumes of work for the construction of two equal-strength road pavements: from fiber cement soil and from inert materials (crushed stone and sand), a logging highway of category III, with a length of 1 km, were calculated. Calculations have been made and response surfaces have been compiled for the estimated cost of constructing these road pavement structures depending on the different transportation distances of the road building materials used. Based on the research results, it was determined that the parameters of the transport and logistics scheme for the delivery of materials significantly affect transport costs and the total estimated cost of construction. With an average hauling distance of up to 30 km, the estimated cost of

installing fiber cement-soil road pavements is almost the same compared to using inert materials. When the distance for transporting road building materials increases to more than 30 km, the use of fiber cement-soil road pavements is cost-effective, relative to equal-strength structures made of crushed stone and sand. Nomograms have been developed for determining the cost of work on the construction of road pavements depending on the distance of transportation of road-building materials for the rapid assessment of the technical and economic efficiency of the construction of logging roads from fiber cement soil.

**Keywords:** fiber cement soil, reinforced soil, economic efficiency, road pavement, logging road, estimated cost.

---

**ЧУДИНОВ Сергей Александрович** – заведующий кафедрой автомобильных дорог, мостов и тоннелей Уральского государственного лесотехнического университета, доцент, кандидат технических наук. SPIN-код: 2735-7934. ORCID: 0000-0003-4492-8188.

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

**CHUDINOV Sergey A.** – PhD (Technical), Head of the Department of Highways, Bridges and Tunnels, Ural State Forestry University, Associate Professor. SPIN code: 2735-7934. ORCID: 0000-0003-4492-8188.

620100. Siberian Tract str. 37. Ekaterinburg. Russia. E-mail: chudinovsa@m.usfeu.ru

**В.А. Грязин, И.Н. Багаутдинов, Я.И. Шестаков, А.Р. Галяутдинов**

## **УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ВАЛОЧНОЙ ГОЛОВКИ С ФРЕЗОЙ ВАЛОЧНО-ПАКЕТИРУЮЩЕЙ МАШИНЫ**

*Введение.* В настоящий момент, для выполнения лесозаготовительных работ используются валочно-пакетирующие и валочно-сучкорезно-раскряжевочные машины с шарнирно-сочлененным гидрофицированным манипулятором. При этом особенности многообразия природно-производственных условий стимулируют разработчиков как искать новые решения в конструкции навесного оборудования, так и совершенствовать системы управления. Последнее особенно актуально при использовании лесозаготовительных машин при работе на мелколесье [Долматов, 2022].

При использовании валочной головки с фрезой и накопителем деревьев [Лестехком] ООО «Лестехком», г. Йошкар-Ола, использует специальное техническое решение – дивертор. Данное устройство обеспечивает автоматизированное совмещение поршневых и штоковых полостей гидроцилиндров манипулятора ВПМ ЛП-19 таким образом, что оператору достаточно управлять только перемещением стрелы. Рукоять движется самостоятельно, обеспечивая перемещение навесного оборудования параллельно поверхности. Такое техническое решение может оказаться востребованным и для других производителей.

Целью работы является расширение функциональных возможностей ВПМ с шарнирно-сочлененным гидрофицированным манипулятором для обеспечения плоскокарректильного движения валочной головки с фрезой.

Итогом выполнения работ является результаты математического моделирования манипулятора ВПМ John Deere серии 800M и требования к гидроприводу.

*Методика исследования.* Основой математической модели является компоновочно-кинематическая схема шарнирно-сочлененного гидрофицированного манипулятора ВПМ John Deere серии 800M (рис. 1). Для удобства восприятия система отсчета модели сопряжена с осью шарнира крепления манипулятора на платформе.

Текущие размеры (длина) приводных гидроцилиндров обозначены на схеме  $l_1$  и  $l_2$ . Плечи подвеса гидроцилиндров  $a$ ,  $e$ ,  $c$ ,  $d$  и  $f$  принимаются от осей  $OA$ ,  $AB$  и  $BC$ .

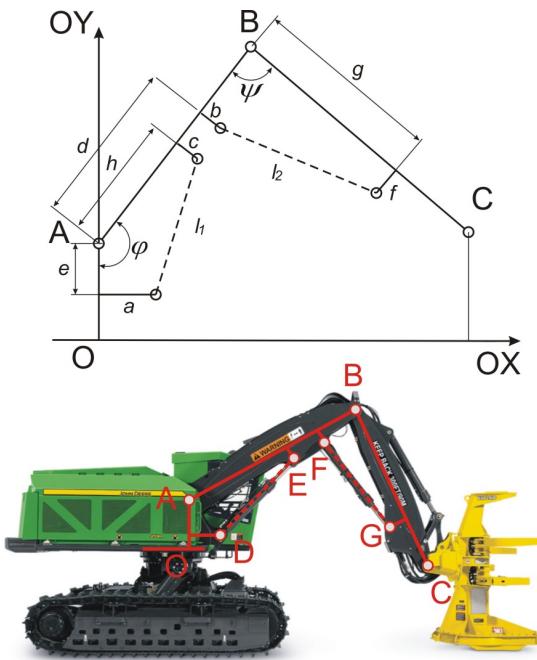


Рис. 1. Расчетная схема ВПМ John Deere серии 800M

Fig. 1. Design scheme of John Deere 800M-Series tracked feller bunchers

Отличие от аналогичной схемы ВПМ типа ЛП-19 (рис. 2) очевидно:

1) гидроцилиндры подъема/опускания стрелы ВПМ типа ЛП-19 корпусным подвесом крепятся на платформе ВПМ, а штоковый подвес – на оси стрелы манипулятора. У John Deere серии 800M штоковый подвес расположен на специальном выступе стрелы;

2) гидроцилиндры подъема/опускания рукояти ВПМ типа ЛП-19 корпусным подвесом крепятся к нижней части стрелы манипулятора, а штоковый подвес – ближе к основанию рукояти. У John Deere серии 800M, корпусной подвес расположен на специальном выступе стрелы, а штоковый – ближе к захватно-срезающему устройству.

Перемещение свободного конца шарнирно-сочлененного гидрофицированного манипулятора обеспечивается управлением потоком жидкости, следовательно, задачей исследования является определение зависимости между плоскопараллельным движением точки  $C$  и длинами гидроцилиндров подъема/опускания стрелы  $l_1$  и подъема/опускания рукояти  $l_2$ .

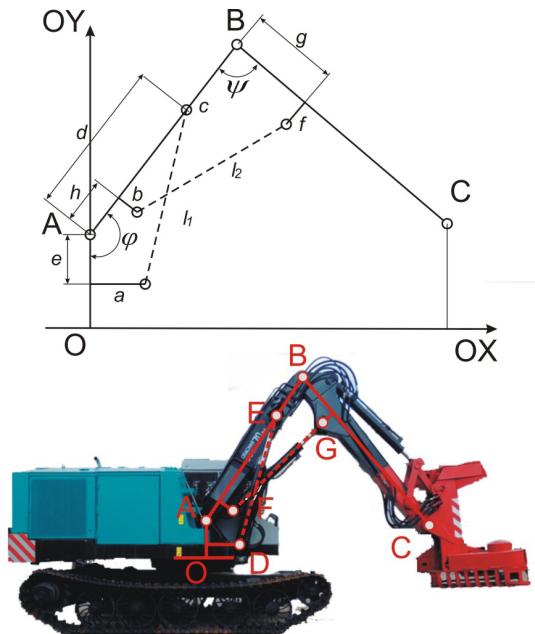


Рис. 2. Расчетная схема ВПМ ЛП-19  
 Fig. 2. Design scheme of LP-19 tracked feller bunchers

Используя методику решения данной задачи [Добрачев, 2014; Сюнёв, 2011], получаем выходные зависимости от координат точки  $C$  и углов подъема/опускания стрелы  $\phi$  и рукояти  $\psi$ :

$$\varphi = 90^\circ + \operatorname{arctg} \left( \frac{Y_c}{X_c} \right) + \arccos \left( \frac{AB^2 + AC^2 - BC^2}{2 \cdot AB \cdot AC} \right), \quad (1)$$

$$\psi = \arccos \left( \frac{AB^2 + BC^2 - AC^2}{2 \cdot AB \cdot BC} \right), \quad (2)$$

где  $AC = \sqrt{Y_c^2 + X_c^2}$  – условная диагональ в треугольнике катетов стрелы  $AB$  и рукояти  $BC$  манипулятора.

Для определения зависимости между углами подъема/опускания стрелы  $\phi$  и рукояти  $\psi$  и длинами гидроцилиндров  $l_1$  и  $l_2$  учитываем особенности подвеса последних и получаем:

- для модели манипулятора ВПМ John Deere серии 800M:

$$l_1^2 = c^2 + h^2 + e^2 + a^2 - 2 \cdot \sqrt{c^2 + h^2} \cdot \sqrt{e^2 + a^2} \times \times \cos \left( \varphi - \operatorname{arctg} \left( \frac{a}{e} \right) - \operatorname{arctg} \left( \frac{c}{h} \right) \right), \quad (3)$$

$$l_2^2 = b^2 + (AB - d)^2 + g^2 + f^2 - 2 \cdot \sqrt{b^2 + (AB - d)^2} \cdot \sqrt{g^2 + f^2} \times \times \cos \left( \psi - \operatorname{arctg} \left( \frac{b}{AB - d} \right) - \operatorname{arctg} \left( \frac{f}{g} \right) \right); \quad (4)$$

- для модели манипулятора ВПМ ЛП-19:

$$l_1^2 = d^2 + e^2 + a^2 - 2 \cdot d \cdot \sqrt{e^2 + a^2} \cdot \cos \left( \varphi - \operatorname{arctg} \left( \frac{a}{e} \right) \right), \quad (5)$$

$$l_2^2 = b^2 + (AB - h)^2 + g^2 + f^2 - 2 \cdot \sqrt{b^2 + (AB - h)^2} \cdot \sqrt{g^2 + f^2} \times \times \cos \left( \psi - \operatorname{arctg} \left( \frac{b}{AB - h} \right) - \operatorname{arctg} \left( \frac{f}{g} \right) \right). \quad (6)$$

Для моделирования плоскокараллельного движения принимаем значения параметров манипуляторов ВПМ, указанные в табл. 1.

**Значения параметров манипуляторов ВПМ**  
**Technical characteristics of feller buncher manipulators**

*Таблица 1*

| Машин                     | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>d</i> | <i>e</i> | <i>f</i> | <i>g</i> | <i>h</i> | <i>AB</i> | <i>BC</i> | <i>OA</i> |
|---------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| ЛП-19                     | 785      | 245      | 0        | 2325     | 500      | 250      | 870      | 390      | 3200      | 3500      | 650       |
| JD-800M<br>(стрела 6,1 м) | 615      | 250      | 250      | 2600     | 615      | 280      | 2235     | 2000     | 3100      | 3000      | 800       |

Приведенные в табл. 1 данные были занесены в Excel и просчитаны отдельно для ВПМ ЛП-19 и John Deere серии 800M. При этом нами было учтено, что начальное положение свободного конца манипулятора (т.С) имеет координаты относительно т.О:

- для ЛП-19: (2700; -200) мм;
- для John Deere серии 800M: (2700; -350) мм.

Отличие по высоте расположения свободного конца манипулятора связано с конструктивными особенностями машин. Знак «минус» указывает, что палец крепления захватно-резающего устройства расположен ниже т.О.

Для приведения результатов расчета к принятому в отрасли понятию «вылет манипулятора», который считается от оси вращения платформы ВПМ до оси захватываемого дерева, к координате  $X_C$  добавим:

- для ЛП-19: 1500 мм;
- для John Deere серии 800M: 270 мм.

Результаты исследования будут приведены с учетом данного положения.

*Результаты исследования.* В результате расчетов были получены графические зависимости изменения длин гидроцилиндров подъема/опускания стрелы (рис. 3) и рукояти (рис. 4).

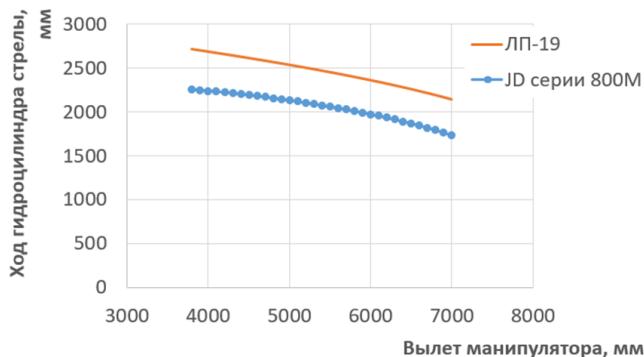


Рис. 3. Изменение вылета гидроцилиндра стрелы  
Fig. 3. Change of a departure of a hydraulic boom cylinder

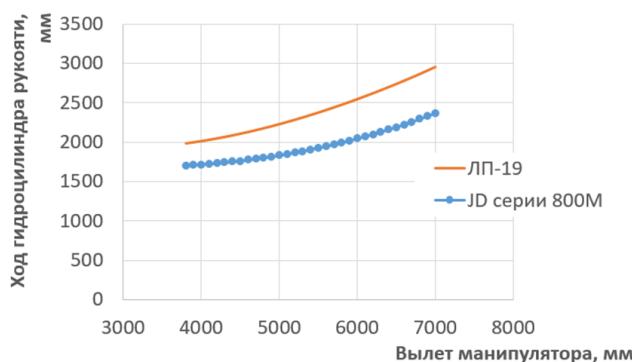


Рис. 4. Изменение вылета гидроцилиндра рукояти  
Fig. 4. Change of a departure of a hydraulic stick cylinder

Для рассматриваемых ВПМ конструктивно задано количество гидроцилиндров подъема/опускания стрелы – 2 шт; гидроцилиндр подъема/опускания рукояти – 1 шт; гидроцилиндр подъема/опускания ЗСУ – 1 шт. Все гидроцилиндры имеют одинаковый диаметр.

Таким образом, для обеспечения плоскопараллельного движения ЗСУ рабочая жидкость, вытесняемая из поршневой полости гидроцилиндров стрелы, может быть направлена в поршневые полости гидроцилиндров рукояти и (как вариант) стойки ЗСУ.

Для ВПМ ЛП-19 графики зависимостей объемов поршневой полости 2 гидроцилиндров стрелы и одного гидроцилиндра рукояти приведены на рис. 5.

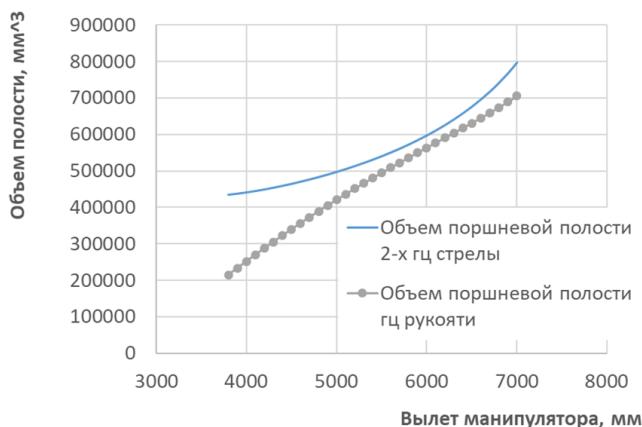


Рис. 5. Изменение объемов поршневой полости 2 гидроцилиндров стрелы

и одного гидроцилиндра рукояти ВПМ ЛП-19

Fig. 5. Change in the volume of piston employment of 2 hydraulic boom cylinder and 1 hydraulic stick cylinder of LP-19

При управлении, например, перемещением штоков гидроцилиндров стрелы, объем вытесняемой из поршневых полостей рабочей жидкости превышает необходимый для перемещения рукояти. Как следствие, движение свободного конца манипулятора примет вид, показанный на рис. 6, кривая «Мат модель».

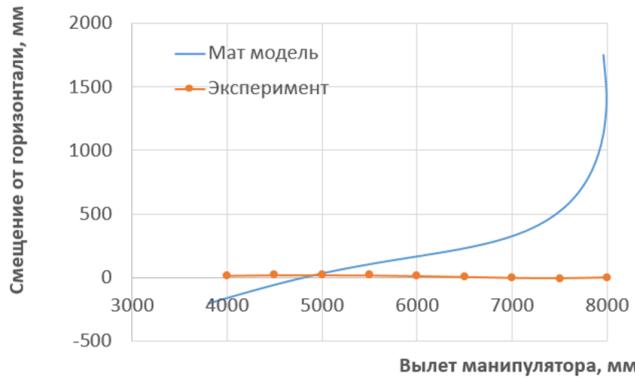


Рис. 6. Работа ВПМ ЛП-19 при управлении движением стрелы

Fig. 6. Operation LP-19 with boom motion control

Использование дивертора, являющегося дросселирующим устройством, обеспечивает частичный сброс рабочей жидкости таким образом, что перемещение ЗСУ отклоняется от плоскопараллельного не более чем на 30...40 мм [Богданов, 2020] (рис. 6, кривая «Эксперимент»).

Для John Deere серии 800M графики зависимостей объемов поршневой полости 2 гидроцилиндров стрелы и одного гидроцилиндра рукояти приведены на рис. 7.

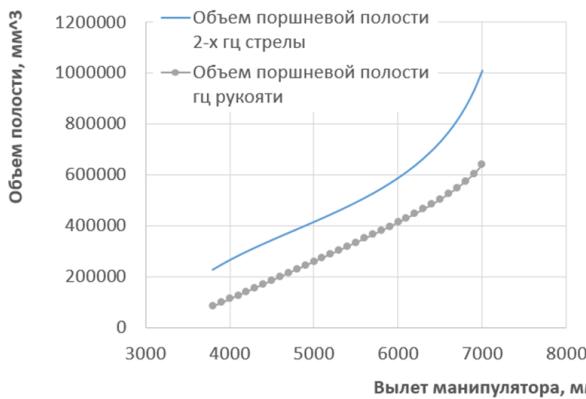


Рис. 7. Изменение объемов поршневой полости 2-х гидроцилиндров стрелы и одного гидроцилиндра рукояти John Deere серии 800M

Fig. 7. Change in the volume of piston employment of 2 hydraulic boom cylinder and 1 hydraulic stick cylinder of John Deere 800M-Series

Для реализации плоскопараллельного движения в гидросистеме John Deere серии 800M необходимо сформировать контур, запитывающий поршневую полость гидроцилиндра рукояти от одного гидроцилиндра стрелы. При этом, движение свободного конца манипулятора John Deere серии 800M примет вид, показанный на рис. 8.

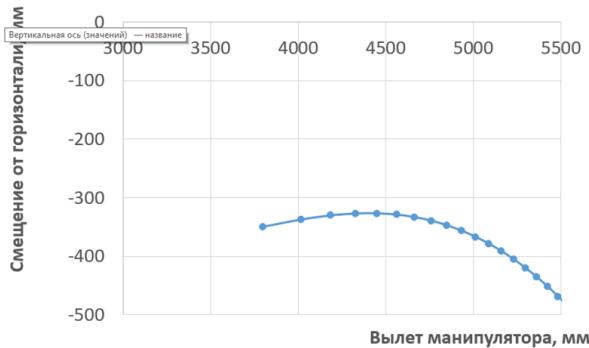


Рис. 8. Работа ВПМ John Deere серии 800M  
при управлении движением стрелы

Fig. 8. Operation John Deere 800M-Series  
with boom motion control

Использование указанной схемы позволяет добиться плоскопараллельного движения ЗСУ ВПМ John Deere серии 800M на вылете манипулятора до 5 метров с отклонением 17...20 мм. При работе на большем вылете отклонение от плоскопараллельного увеличится до 400 мм.

*Заключение.* По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Применение специальных устройств (типа дивертор) для валочно-пакетирующих машин с гидрофицированным шарнирно-сочлененным манипулятором и валочной головкой с фрезой обеспечивает удобство работы оператора. Управление перемещением манипулятора осуществляется рукоятью движения стрелы (одной рукой). Положение рукояти управляется потоком рабочей жидкости с гидроцилиндров стрелы;
2. Особенность работы дивертора обеспечивает плоско-параллельное перемещение валочной головки с фрезой ВПМ ЛП-19 за счет дросселирования потока рабочей жидкости с гидроцилиндров стрелы по изменяемому от вылета давлению в гидроприводе манипулятора;

3. Для ВПМ типа John Deere серии 800M возможно обеспечить перемещение манипулятора управлением рукоятью движения стрелы (одной рукой) при введении в систему гидропривода контура, запитывающего поршневую полость гидроцилиндра рукояти от одного гидроцилиндра стрелы;

4. Плоскопараллельное движение валочной головки с фрезой для модернизированных ВПМ типа ЛП-19 и John Deere серии 800M выполняется рукоятью движения стрелы (одной рукой) и корректировкой положением стойки ЗСУ (второй рукой).

5. Перемещение валочной головки с фрезой для ВПМ ЛП-19 отклоняется от плоскопараллельного не более чем на 30...40 мм по всему вылету манипулятора, а для John Deere серии 800M – до 20 мм на вылете до 5 м. Работа на большем вылете приведет к существенному отклонению от горизонтали до 400 мм.

*Вклад авторов.* Грязин Владимир Альбертович разработал методику расчета кинематики шарнирно-сочлененного манипулятора и обеспечил общую компоновку материалов статьи.

Багаутдинов Ильдар Нурагазович выполнил проверку адекватности математической модели расчета сравнением результатов теоретического исследования с параметрами 3d-моделей манипуляторов ВПМ ЛП-19 и John Deere серии 800M.

Шестаков Яков Иванович подготовил варианты решений изменения системы управления гидроприводом манипулятора John Deere серии 800M.

Галяутдинов Альберт Радилович выполнил расчеты по прямой и обратной задаче для подготовленных вариантов решений и определил наиболее эффективное.

*Благодарности.* Коллектив авторов выражает благодарность ООО фирма «ЛЕСТЕХКОМ» (г. Йошкар-Ола), в предоставлении технической информации и сопровождении исследований.

### **Библиографический список**

*Богданов Е.Н., Полянин И.А., Егоров А.В., Багаутдинов И.Н.* Сокращение отклонения от плоскопараллельного движения рабочего органа валочно-пакетирующей машины ЛП-19 // Вестник Поволжского Государственного Технологического Университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2020. № 1 (13). С. 69–77.

*Добрачев А.А., Раевская Л.Т., Швец А.В.* Кинематические схемы, структуры и расчет параметров лесопромышленных манипуляторных машин: монография. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2014. 128 с.

*Долматов С.Н., Никончук А.В.* Технология и оборудование лесозаготовок: учеб. пособие. Красноярск: СПбГУ им. М.Ф. Решетнева, 2022. 96 с.

Лестехком: лесозаготовительная техника на базе ЛП-19 [Электронный ресурс] // Лестехком. Производство лесозаготовительной техники. URL: <http://lestechcom.ru/> (дата обращения: 07.06.2023).

Сюнёв В.С., Селиверстов А.А., Герасимов Ю.Ю., Соколов А.П. Лесосечные машины в фокусе биоэнергетики: конструкции, проектирование, расчет: учеб. пособие. Йоэнсуу: НИИ леса Финляндии METLA, 2011. 143 с.

### References

Bogdanov E.N., Polyanin I.A., Egorov A.V., Bagautdinov I.N. Reducing the deviation from the plane-parallel movement of the working body of the LP-19 feller buncher. *Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Materials. Designs. Technologies*, 2020, no. 1 (13), pp. 69–77. (In Russ.)

Dobrachev A.A., Raevskaya L.T., Shvets A.V. Kinematic schemes, structures and calculation of parameters of timber industrial manipulator machines: monograph. Yekaterinburg: Ural. state forest engineering un-t, 2014. 128 p. (In Russ.)

Dolmatov S.N., Nikonchuk A.V. Technology and equipment of logging: textbook. Krasnoyarsk: Siberian State University M.F. Reshetnev, 2022. 96 p. (In Russ.)

Lestekhkom: forest harvesting machinery on the basis of LP-19 [Electronic resource]. Manufacture of logging equipment. URL: <http://lestechcom.ru/> (accuse July 06, 2023). (In Russ.)

Syunev V.S., Seliverstov A.A., Gerasimov Yu.Yu., Sokolov A.P. Cutting machines in the focus of bioenergy: designs, design, calculation: proc. allowance. Joensuu: Finnish Forest Research Institute METLA, 2011. 143 p. (In Russ.)

*Материал поступил в редакцию 27.06.2023*

---

**Грязин В.А., Багаутдинов И.Н., Шестаков Я.И., Галяутдинов А.Р.**  
Управление движением валочной головки с фрезой валочно-пакетирующей машины // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 249. С. 244–255. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.244-255

В статье представлены материалы по особенностям управления манипуляторов валочно-пакетирующих машин ЛП-19 и John Deere серии 800M. Данные машины оборудованы специальными устройствами – валочными головками с фрезой и накопителем. Особенностью работы машин с таким навесным оборудованием является необходимость контроля за положением фрезы в процессе срезания деревьев. Для наиболее эффективной работы оператору необходимо вести фрезу параллельно земле, с небольшим отклонением «на себя». Так как накопитель позволяет поочередно срезать несколько деревьев, оператору неудобно управлять положением стойки валочной головки, стрелой и рукоятью. Для этого, ВПМ ЛП-19 оборудовали дивертором – устройством, соединяющим

гидравлический цилиндры стрелы и рукояти в одну линию. При этом оператор машины имеет возможность одной рукой управлять плоскопараллельным движением манипулятора, а второй – корректировать наклон стойки валочной головки. Управление упрощается. Нашей задачей является сравнение ВПМ LP-19 и John Deere серии 800M с точки зрения возможности применения дивертора на второй машине. Для этого мы выполнили анализ кинематической схемы манипуляторов и расположения гидроцилиндров. Учтено количество гидроцилиндров, используемых для привода стрелы и рукояти. Определен порядок их работы. Определены объемы поршневых и штоковых полостей. Разработана методика расчета кинематики шарнирно-сочлененного манипулятора валочно-пакетирующей машины. Решена прямая и обратная задача. Определены условия плоскопараллельного движения валочной головки с фрезой для ВПМ LP-19 и John Deere серии 800M. Предложен способ обеспечения плоскопараллельного движения валочной головки с фрезой для ВПМ John Deere серии 800M.

**Ключевые слова:** кинематика, манипулятор, валочная головка с фрезой, управление.

**Gryazin V.A., Bagautdinov I.N., Shestakov Y.I., Galyautdinov A.R.** Control of the movement of the felling head with the cutter of the feller buncher. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 249, pp. 244–255 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.244-255

The article presents materials on the control features of the manipulators of the feller buncher LP-19 and John Deere 800M series. These machines are equipped with special devices – felling heads with a milling cutter and a storage device. A feature of the operation of machines with such attachments is the need to control the position of the cutter during the process of cutting trees. For the most efficient work, the operator needs to guide the cutter parallel to the ground, with a slight deviation towards itself. Since the drive allows you to cut several trees one by one, it is not convenient for the operator to control the position of the felling head stand, boom and handle. For this, the feller buncher LP-19 was equipped with a divertor – a device that connects the hydraulic cylinders of the boom and arm in one line. At the same time, the machine operator has the ability to control the plane-parallel movement of the manipulator with one hand, and with the other hand to adjust the tilt of the felling head stand. Management is simplified. Our task is to compare the feller buncher LP-19 and the John Deere 800M series from the point of view of the possibility of using a diverter on the second machine. To do this, we analyzed the kinematic diagram of the manipulators and the location of the hydraulic cylinders. The number of hydraulic cylinders used to drive the boom and arm is taken into account. The order of their work is determined. The volumes of the piston and rod cavities are determined. A method for calculating the kinematics of an articulated manipulator of a feller buncher has been developed. The direct and inverse problem is solved. The conditions for the plane-parallel movement of the felling head with a cutter

for the feller buncher LP-19 and John Deere series 800M are determined. A method is proposed for ensuring plane-parallel movement of the felling head with a milling cutter for feller buncher John Deere series 800M.

**К e y w o r d s :** kinematics, manipulator, felling head with cutter, control.

---

**ГРЯЗИН Владимир Альбертович** – доцент Поволжского государственного технологический университет», кандидат технических наук. SPIN-код: 7164-2190.

424000, пл. Ленина, д. 3. г. Йошкар-Ола, РМЭ, Россия. E-mail: GryazinVA@volgatech.net

**GRYAZIN Vladimir A.** – PhD (Technical), Volga State University of Technology. SPIN-код: 7164-2190.

424000. Lenin sq. 3. Yoshkar-Ola. The Republic of Mari El. Russia. E-mail: GryazinVA@volgatech.net

**БАГАУТДИНОВ Ильдар Нурагазович** – доцент Поволжского государственного технологического университета, кандидат технических наук. SPIN-код: 1688-5368.

424000, пл. Ленина, д. 3. г. Йошкар-Ола, РМЭ, Россия. E-mail: BagautdinovIN@volgatech.net

**BAGAUTDINOV Ildar N.** – PhD (Technical), Volga State University of Technology. SPIN-код: 1688-5368.

424000. Lenin sq. 3. Yoshkar-Ola. The Republic of Mari El. Russia. E-mail: BagautdinovIN@volgatech.net

**ШЕСТАКОВ Яков Иванович** – профессор Поволжского государственного технологического университета, кандидат технических наук.

424000, пл. Ленина, д. 3. г. Йошкар-Ола, РМЭ, Россия. E-mail: SHestakovYI@volgatech.net

**SHESTACOV Yacov I.** – PhD (Technical), Volga State University of Technology.

424000. Lenin sq. 3. Yoshkar-Ola. The Republic of Mari El. Russia. E-mail: SHestakovYI@volgatech.net

**ГАЛЯУТДИНОВ Альберт Радилович** – доцент ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет». SPIN-код: 7244-6797.

424000, пл. Ленина, д. 3. г. Йошкар-Ола, РМЭ, Россия. E-mail: GalyautdinovAR@volgatech.net

**GALYAUTDINOV Albert R.** – Associate Professor, Volga State University of Technology. SPIN-код: 7244-6797.

424000. Lenin sq. 3. Yoshkar-Ola. The Republic of Mari El. Russia. E-mail: GalyautdinovAR@volgatech.net

**В.А. Каляшов, В.Я. Шапиро, И.В. Григорьев, О.А. Куницкая,  
О.И. Григорьева**

**ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ОТТАИВАЮЩИХ ПОЧВОГРУНТОВ  
ПОД НАГРУЗКОЙ ОТ ЛЕСНОЙ МАШИНЫ  
И ТРЕЛЕВОЧНОЙ СИСТЕМЫ НА СКЛОНАХ**

*Введение.* Специалистам лесозаготовительного производства и лесного дела хорошо известна фраза, что не существует двух одинаковых участков леса. Более того, одна и та же лесосека сильно отличается по технологическим свойствам, прежде всего, несущей способности почвогрунтов, в разные времена года [Герасимова, 2021; Медведев, Мохирев, 2022; Мохирев и др., 2022].

В Российской Федерации в настоящее время, в большинстве случаев, лесосеки разрабатываются комплексами машин по скандинавской или по канадской технологии. Данные комплексы отличаются большой производительностью. При этом максимально допустимые площади лесосек, согласно действующим Правилам заготовки древесины и особенностям заготовки древесины в лесничествах, указанным в статье 23 Лесного кодекса Российской Федерации, утвержденным Приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 993, от 01.12.2020 г. составляют 50 га, а в ряде случаев и значительно меньше [Медведев, Мохирев, 2020; Мохирев, 2021; Рукомойников и др., 2021; Мохирев и др., 2020].

Малые площади лесосек и большие производительности машинных лесозаготовительных комплексов дают достаточно малый срок проведения основных лесосечных работ, что, в свою очередь, позволяет принимать более оптимальные организационно-технологические решения, направленные на повышение эффективности освоения каждой конкретной лесосеки [Рукомойников и др., 2020].

Данные организационно-технологические решения закрепляются в технологической карте на разработку лесосеки, которая является обязательным документом, составляемым во время проведения технологической подготовки.

В подавляющем большинстве случаев у технолога нет возможности выбрать оптимальную систему машин для освоения каждой конкретной

лесосеки; работают с теми машинами, что есть на конкретном предприятии, и их модельный ряд весьма ограничен. Единственная возможность оптимизировать работу имеющихся машинных комплексов на конкретной лесосеке – это составить оптимальную схему ее транспортного освоения, т. е. схему размещения трелевочных волоков и технологических коридоров, с учетом технических особенностей машин (вес, давление движителя, вылет манипулятора, грузоподъемность и т. д.) и технологических особенностей лесосеки: категории почвенно-грунтовых и рельефных условий, наличия и глубины снежного покрова, наличия и особенностей размещения неэксплуатационных площадей и т. д. [Комаров и др., 2019].

Под технологическими свойствами почвогрунтов понимают такие их свойства, которые отражают закономерности реализации определенных технологических процессов.

В частности, это может быть технологическое свойство устойчивости почвогрунта на откосах или склонах; оценкой является безразмерный параметр, равный отношению коэффициентов внутреннего трения или величин сцепления при фактическом состоянии почвогрунта к их значениям в предельном состоянии.

К технологическим свойствам пород и грунтов относится свойство их взрываемости как способности сопротивляться разрушающему действию взрыва; оценивается эта характеристика удельным расходом взрывчатых веществ ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ).

Прочностные свойства почвогрунта тоже относятся к технологическим свойствам.

*Цель настоящей статьи* – оценить технологические свойства оттаивающих почвогрунтов под нагрузкой от лесных машин и трелевочных систем на склонах.

*Методы исследования.* Использованы справочные данные о физико-механических свойствах мерзлых и оттаивающих почвогрунтов. Расчеты выполнены на основе механики разрушений. Использованы методы аппроксимации численных данных.

*Постановка задачи и основные результаты исследования.* Из различных характеристик прочности грунтов выделим такое свойство как несущая способность  $P_s$  (кПа), которая нашла основное применение при оценке прочности фундаментов сооружений на заданную глубину (см. СП 22.13330.2011), т. е. при значительных масштабных пространственных и временных параметрах взаимодействия статической нагрузки и среды.

Величина  $P_s$  использована и при изучении процессов статической нагрузки на почвогрунт различных лесных машин [Агейкин, 1972; Хитров, 2014], однако незначительные размеры опорной поверхности контакта (для колесной шины не более 0,6–0,7 м<sup>2</sup>) и кратковременный характер взаимодействия ограничивают практическое применение параметра  $P_s$ .

Наряду с этим необходимо учитывать вероятностный характер при определении показателя несущей способности оттаивающего почвогрунта в силу неполной информации о факторах, влияющих на ее уровень [Рудов и др., 2019].

Применительно к процессу взаимодействия лесной машины или трелевочной системы на ее базе, с краевой частью массива почвогрунта наиболее информативным показателем представляется прочность на одноосное сжатие  $R_c$  (МПа или кПа), поскольку величина  $R_c$  с одной стороны отражает способность почвогрунта сопротивляться вертикальным сжимающим нагрузкам, а с другой определение этого параметра происходит при неограниченном боковом расширении вплоть до момента предельного сопротивления сдвига (см. ГОСТ 12248.2-2020). Для условий взаимодействия нагрузки и почвогрунта на склонах учет механизма сдвига представляется существенным фактором.

Испытание на одноосное сжатие в образцах различного масштаба позволяет максимально приблизить параметр  $R_c$  к объективной оценке технологической прочности почвогрунта при вертикальной статической нагрузке шины лесной машины или трелевочной системы.

Уместно заметить, что параметр  $R_c$  является информативной характеристикой прочности при одноосном сжатии и развитии деформаций сдвига не только при разрушении почвогрунтов, но и при контактном разрушении других сплошных сред [Шапиро и др., 2011].

Из анализа огибающей кругов Мора [Булычев, 1989] для определения величины  $R_c$  получено соотношение:

$$R_c = \frac{2C \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}, \quad (1)$$

где  $C$  – величина сцепления грунта (кПа) – и  $\varphi$  – угол внутреннего трения (°) – информативные характеристики паспорта прочности почвогрунта.

Следует отметить, что использование величины  $R_c$  как функции двух параметров  $C$  и  $\varphi$  для оценки прочности оттаивающего почвогрунта на склонах вблизи с водонепроницаемой границей вечной мерзлоты приобретает особое значение на основе данных о влиянии состояния влажности ( $W$ , %) почвогрунта на показатели его прочности [Калабина, Царапов, 2017].

Установлено, что на верхних участках склона имеет место минимальная влажность  $W$  почвогрунта, которая после дренажа и оттока влаги стремится к нижнему пределу пластичности или величине на границе раскатывания ( $W_p$ ). В тоже время максимальная влажность почвогрунта формируется на нижних участках склона, и величина  $W$  стремится к верхнему пределу пластичности или величине на границе текучести ( $W_\gamma$ ).

Введем показатель относительной влажности грунта в виде:

$$K_W = w/w_T. \quad (2)$$

Обработка опытных данных для оттаивающего суглинка с показателем  $W_T = 40\%$  в диапазоне изменения  $K_W$  от 0,5 до 0,9 позволила получить (рис. 1) графические зависимости  $C$  (линия 1) и  $\phi$  (линия 2) от  $K_W$  (ось абсцисс).

Как видно из данных рис. 1, при достижении показателя влажности  $W$  области значений 0,75  $W_T$  характеристики прочности снижаются кратно, что, в силу соотношения (1), отразится на величине  $R_c$ .

Этот вывод иллюстрируется рис. 2, где представлена зависимость  $R_c$ , кПа от безразмерного параметра  $K_W$ .

Спрямление гиперболической кривой  $R_c(K_W)$  с помощью логарифмирования позволило выявить диапазон значений  $K_W = 0,70\text{--}0,75$  сопряжения ниспадающей и асимптотической ветвей гиперболы. Из этого следует, что существует предел насыщения почвогрунта влагой, после которого его прочность снижается несущественно.

Пусть склон протяженностью  $L_c = 50$  м с углом наклона  $\alpha$  к линии горизонта содержит участок оттаявшего почвогрунта высотой  $H_T$  и участок оттаивающего почвогрунта высотой  $H_{OT}$ . В основании склона присутствует слой воды высотой  $H_B$ , граничащий со слоем мерзлого почвогрунта. Взаимодействие лесной машины или трелевочной системы на ее базе с почвогрунтом происходит на удалении  $L$  от основания склона (величина  $K_L = L/L_c$ , % характеризует относительное удаление лесной машины или трелевочной системы на ее базе). Тогда безразмерный параметр  $K_W$  связан с параметрами склона соотношением [Каляшов и др., 2021]:

$$K_W = 0,9 - 0,4 \frac{L \sin \alpha}{H_{OT}}. \quad (3)$$

Установим зависимость критерия прочности грунта  $R_c$  от параметров склона. На рис. 3 при значениях  $\alpha = 15^\circ$  и  $H_{OT} = 10$  м отражено влияние относительного удаления лесной машины или трелевочной системой на ее базе  $K_L$ , %, на величину  $R_c$ , кПа.

Экспоненциальный (кратный) рост прочности почвогрунта по мере удаления лесной машины или трелевочной системы на ее базе к срединной части склона свидетельствует о том, что технологические схемы размеще-

ния трелевочных волоков и технологических коридоров на склоне должны быть дифференцированы с учетом этого фактора.

Обработка данных рис. 3 в логарифмических координатах позволила установить, что при преодолении показателем  $K_L$  значения 20% наблюдаются резкое возрастание  $R_c$ , т. е. наиболее трудные условия работы имеют место в 20-процентной ближней зоне, где величина  $R_c < 30$  кПа.

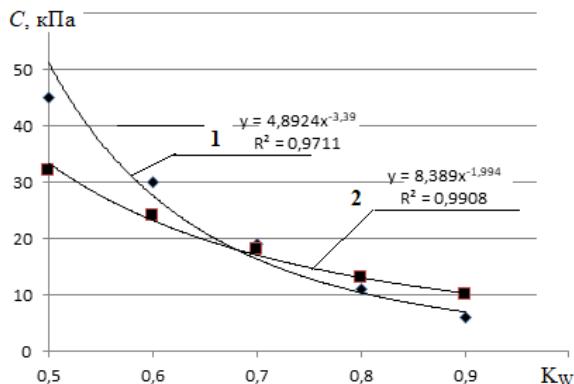


Рис. 1. Зависимость величины сцепления и угла внутреннего трения от относительной влажности почвогрунта

Fig. 1. Dependence of the amount of adhesion and the angle of internal friction on the relative humidity of the soil

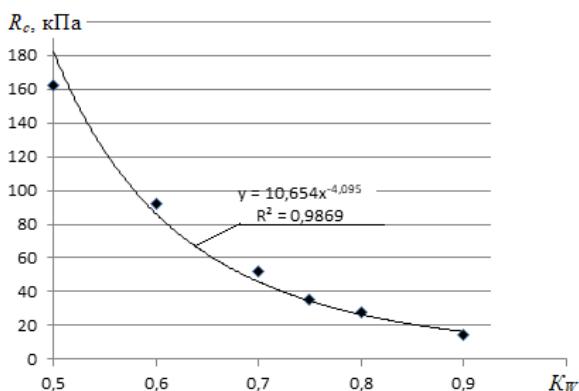


Рис. 2. Зависимость прочности на одноосное сжатие от относительной влажности почвогрунта

Fig. 2. Dependence of uniaxial compression strength on the relative humidity of the soil

В табл. 1 представлены некоторые колесные лесные машины (трелевочные системы на их базе) с указанием давления их шин на почвогрунт. Сравнение данных табл. 1 с данными рис. 3 показывает их соответствие друг другу в основном диапазоне изменений значений давлений и прочности на одноосное сжатие от 20 до 90 кПа. Этот вывод свидетельствует о высокой вероятности существования предельного состояния процесса взаимодействия лесной машины, или трелевочной системы на ее базе с массивом почвогрунта на склоне, что требует детального подхода к определению параметров машинной валки деревьев и трелевки.

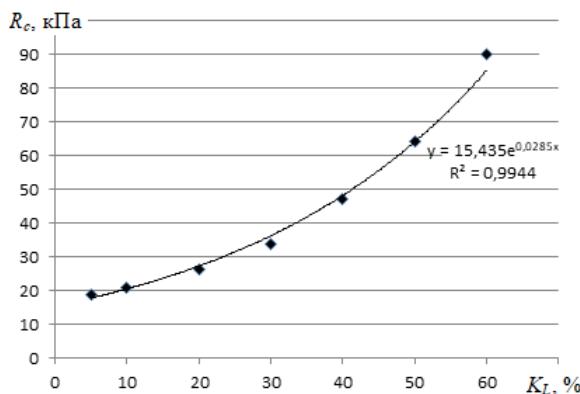


Рис. 3. Влияние удаления лесной машины или трелевочной системы на ее базе от основания склона на величину предела на одноосное сжатие почвогрунта

Fig. 3. The effect of the removal of a forest machine or a skidding system based on it from the base of the slope on the value of the limit on uniaxial compression of the soil

На рис. 4 представлен график зависимости  $R_c$ , кПа, от угла  $\alpha$ ,  $^{\circ}$  при фиксированных значениях  $H_{OT} = 10$  м и  $K_L = 20\%$ .

Спрямление полученной экспоненциальной зависимости показало отсутствие зон по признаку различного характера связи данных параметров, т. е. увеличение угла наклона поверхности склона оказывает равнозначное влияние на рост его прочности.

Зафиксируем  $K_L$  на уровне 20% (граница зоны резкого роста прочности почвогрунта). При  $\alpha = \text{const} = 15^{\circ}$  исследуем (рис. 5) влияние мощности слоя оттаивающего почвогрунта  $H_{OT}$ , м, на величину  $R_c$ , кПа.

Таблица 1

**Колесные лесные машины (трелевочные системы на их базе)  
и величина давления их шин  $\sigma_o$  на почвогрунт**

**Wheeled forestry machines (skidding systems based on them)  
and the pressure value of their tires  $\sigma_o$  on the soil**

| Колесная лесная машина (трелевочная система на ее базе) | Вес $Q$ , т | $\sigma_o$ , кПа            |                             |
|---|-------------|-----------------------------|-----------------------------|
|   |             | штамп 1/ число колесных пар | штамп 2/ число колесных пар |
| I.4-колесная  | 15          | 68 / 1                      | 84 / 1                      |
| II. 6-колесная  | 16          | 72 / 1                      | 40+40; 27 / 3               |
| III.8-колесная  | 19          | 35 / 2                      | 56 / 2                      |
| IV.10-колесная  | 20          | 35 / 2                      | 37 / 3                      |

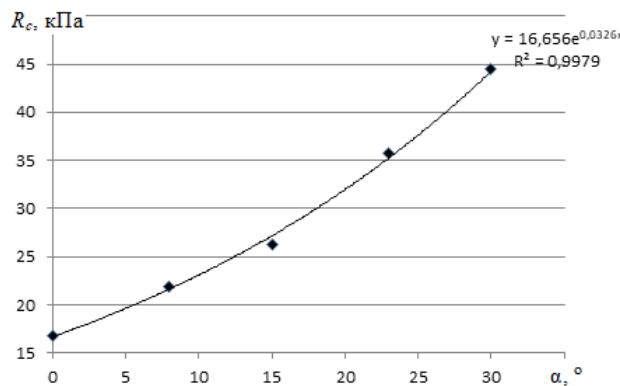


Рис. 4. Влияние угла  $\alpha$  на прочность массива оттаивающего почвогрунта  
Fig. 4. Influence of angle  $\alpha$  on the strength of the thawing soil mass

Установлена граница зоны  $H_{OT} = 10$  м, преодоление которой в сторону увеличения мощности слоя оттаивающего почвогрунта приводит к существенному снижению показателя  $R_c$ .

Таким образом, выполненный анализ показал, что лесосеки на склонах необходимо классифицировать по двум существенным факторам – по мощности слоя оттаивающего грунта  $H_{OT}$  и местоположению лесных машин или трелевочных систем на их базе на склоне  $L$ .

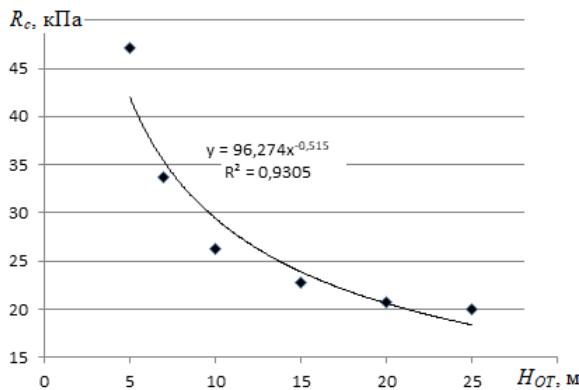


Рис. 5. Снижение прочности на одноосное сжатие по мере роста мощности слоя оттаивающего почвогрунта

Fig. 5. Decrease in uniaxial compression strength as the thickness of the thawing soil layer increases

Совместное влияние выявленных факторов при постоянном угле  $\alpha=15^\circ$  на прочность почвогрунта иллюстрируется данными рис. 6.

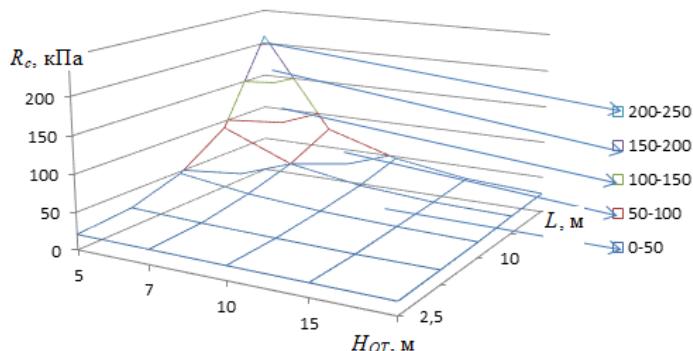


Рис. 6. Совместное влияние параметров  $H_{OT}$  и  $L$  на величину  $R_c$   
Fig. 6. The joint effect of the parameters  $H_{OT}$  and  $L$  on the value of  $R_c$

Из рис. 6 можно сделать вывод, что в 84% случаях величина  $R_c$  не выходит за пределы 50 кПа, что накладывает определенные ограничения на планирование грузоподъемности веса лесных машин и трелевочных систем на их базе.

При иных углах наклона поверхности склона данные рис. 6 корректируются в соответствии с полученной экспоненциальной зависимостью (рис. 4) в сторону снижения области низких значений величины  $R_c$  при углах  $\alpha < 15^\circ$  вследствие усиления эффекта отрицательного влияния мощности слоя оттаивающего почвогрунта на его прочность и наоборот – в сторону расширения области высоких значений  $R_c$  при углах  $\alpha > 15^\circ$  вследствие реализации противоположной тенденции.

**Заключение.** Эффективный учет выявленных закономерностей возможен на базе сбора и обработки данных геологических, в первую очередь, гидрогеологических исследований физико-механических свойств и состояний почвогрунтов, слагающих краевую часть поверхности склона.

При выполнении таких условий результаты данного исследования позволяют произвести обоснованную оценку одного из совокупности технологических свойств различных участков массивов оттаивающих почвогрунтов – их прочности на одноосное сжатие – под нагрузкой от действия лесной машины или трелевочной системы на ее базе на склонах вблизи с границей зоны вечной мерзлоты.

**Сведения о финансировании исследования.** Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-26-00009, <https://rscf.ru/project/22-26-00009/>.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### **Библиографический список**

*Агейкин Я.С.* Воздеходные колесные и комбинированные движители. М.: Машиностроение, 1972. 184 с.

*Булычев Н.С.* Механика подземных сооружений в примерах и задачах. М.: Недра. 1989. 270 с.

*Герасимова М.М., Мохирев А.П., Медведев С.О., Красильников М.М.* Разработка программного обеспечения для оптимизации технологического процесса лесозаготовительного предприятия // Лесной и химический комплексы – проблемы и решения; сб. матер по итогам Всерос. науч.-практич. конференции / под общ. ред. Ю.Ю. Логинова. Красноярск, 2021. С. 133–135.

*Калабина М.В., Царапов М.Н.* Прочностные свойства оттаивающих грунтов // Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки: матер. Всерос. конференции с междунар. участием. 2017. С. 542–546.

*Каляшов В.А., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И., Стародубцева Т.Н. Исследование процесса образования колеи и ее устойчивость при работе лесных машин и трелевочных систем на склонах массива оттаивающего грунта // Лесотехнический журнал. 2021. Т.11. № 2 (42). С. 121–132.*

*Комаров К.А., Фомина В.Ю., Герасимова М.М., Мохирев А.П. Оптимизация маршрутов доставки древесины на основе нечеткой динамической транспортной сети // Инновации в химико-лесном комплексе: тенденции и перспективы развития: матер. Всерос. науч.-практич. конференции с междунар. участием / отв. ред. Ю.А. Безруких, Е.В. Мельникова. 2019. С. 205–210.*

*Медведев С.О., Мохирев А.П. Отдельные аспекты развития транспортной инфраструктуры в лесной отрасли // Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее: сб. науч. статей по матер. Всерос. науч.-практич. конференции, посвящ. 40-летию создания Инженерно-строительного института. Красноярск, 2022. С. 46–49.*

*Медведев С.О., Мохирев А.П., Сергеева Е.А. Зависимости объема вывозки древесины с лесной территории от природно-климатических условий // Успехи современного естествознания. 2020. № 6. С. 27–32.*

*Мохирев А.П. Обоснование мероприятий, повышающих доступность древесных ресурсов // Лесоэксплуатация и комплексное использование древесины: сб. статей Всерос. науч.-практич. конференции. Красноярск, 2021. С. 173–179.*

*Мохирев А.П., Герасимова М.М., Савков М.В., Симахин Д.О. Использование инструментов географической информационной системы в планировании лесозаготовительного производства // Цифровые технологии в лесном секторе: матер. Всерос. науч.-технич. конференции, 2020. С. 105–107.*

*Мохирев А.П., Горяева Е.В., Исламова М.Т. Прогнозирование периода эксплуатации сезонных автомобильных дорог зимнего действия // Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее: сб. науч. статей по матер. Всерос. науч.-практич. конференции, посвящ. 40-летию создания Инженерно-строительного института. Красноярск, 2022. С. 50–54.*

*Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Оценка несущей способности мерзлого и оттаявшего грунта при неполной информации о состоянии его взаимодействия с трелевочной системой // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 2 (42). С. 80–86.*

*Рукомойников К.П., Анисимов С.Е., Мохирев А.П., Медведев С.О. Сетевое планирование как инструмент освоения лесных участков // Наука без границ. 2021. № 1 (53). С. 25–29.*

*Рукомойников К.П., Мохирев А.П., Медведев С.О., Дербенева Е.Ю. Отдельные особенности имитационного моделирования технологического процесса вывозки древесины // Наука и бизнес: пути развития. 2020. № 10 (112).*

*Хитров Е.Г., Божбов В.Е., Ильюшенко Д.А. Расчет несущей способности лесных почвогрунтов под воздействием колесных движителей // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 4 (24). С. 122–126.*

Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Гулько А.Е. Анализ методов расчета параметров и обоснование математической модели разрушения коры при групповой окорке древесины // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2011. № 8 (121). С. 92–96.

### References

- Ageikin Ya.S. All-terrain wheeled and combined propellers. M.: Mashinostroyeniye, 1972. 184 p. (In Russ.)
- Bulychev N.S. Mechanics of underground structures in examples and tasks. M.: Nedra. 1989. 270 p. (In Russ.)
- Gerasimova M.M., Mokhirev A.P., Medvedev S.O., Krasilnikov M.M. Development of software for optimizing the technological process of a logging enterprise. *Forest and chemical complexes – problems and solutions*: collection of materials on the results of the All-Russian scientific and practical conference. under the general editorship of Yu.Yu. Loginov. Krasnoyarsk, 2021, pp. 133–135. (In Russ.)
- Kalabina M.V., Tsarapov M.N. Strength properties of thawing soils. *Current state, problems and prospects for the development of branch science*: materials of the All-Russian conference with international participation, 2017, pp. 542–546. (In Russ.)
- Kalyashov V.A., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I., Starodubtseva T.N. Investigation of the process of rut formation and its stability during the operation of forest machines and skidding systems on the slopes of a massif of thawing soil. *Forestry*, 2021, vol. 11, no. 2 (42), pp. 121–132. (In Russ.)
- Khitrov E.G., Bozhbov V.E., Ilyushenko D.A. Calculation of the bearing capacity of forest soils under the influence of wheel propellers. *Systems. Methods. Technologies*, 2014, no. 4 (24), pp. 122–126. (In Russ.)
- Komarov K.A., Fomina V.Yu., Gerasimova M.M., Mokhirev A.P. Optimization of timber delivery routes based on a fuzzy dynamic transport network. *Innovations in the chemical-forest complex: trends and development prospects*: materials of the All-Russian scientific-practical conference with international participation. Managing editors Yu.A. Bezrukikh, E.V. Melnikov, 2019, pp. 205–210. (In Russ.)
- Medvedev S.O., Mokhirev A.P. Some aspects of the development of transport infrastructure in the forest industry. *Actual issues of construction: a look into the future*: collection of scientific articles based on the materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference dedicated to the 40th anniversary of the Civil Engineering Institute. Krasnoyarsk, 2022, pp. 46–49. (In Russ.)
- Medvedev S.O., Mokhirev A.P., Sergeeva E.A. Dependences of the volume of timber removal from the forest area on natural and climatic conditions. *Successes of modern natural science*, 2020, no. 6, pp. 27–32. (In Russ.)

Mokhirev A.P. Justification of measures that increase the availability of wood resources. *Forest exploitation and integrated use of wood*: collection of articles of the All-Russian Scientific and Practical Conference. Krasnoyarsk, 2021, pp. 173–179. (In Russ.)

Mokhirev A.P., Gerasimova M.M., Savkov M.V., Simakhin D.O. Using geographic information system tools in logging production planning. *Digital technologies in the forest sector*: materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference, 2020, pp. 105–107. (In Russ.)

Mokhirev A.P., Goryaeva E.V., Islamova M.T. Forecasting the period of operation of seasonal winter roads. *Actual issues of construction: a look into the future*: collection of scientific articles based on the materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference dedicated to the 40th anniversary of the Civil Engineering Institute. Krasnoyarsk, 2022, pp. 50–54. (In Russ.)

Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. Evaluation of the bearing capacity of frozen and thawed soil with incomplete information about the state of its interaction with the skidding system. *Systems. Methods. Technologies*, 2019, no. 2 (42), pp. 80–86. (In Russ.)

Rukomoinikov K.P., Anisimov S.E., Mokhirev A.P., Medvedev S.O. Network planning as a tool for the development of forest areas. *Science without borders*, 2021, no. 1 (53), pp. 25–29. (In Russ.)

Rukomoinikov K.P., Mokhirev A.P., Medvedev S.O., Derbeneva E.Yu. Separate features of simulation modeling of the technological process of timber removal. *Science and business: ways of development*, 2020, no. 10 (112). (In Russ.)

Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Gulko A.E. Analysis of methods for calculating parameters and substantiation of a mathematical model of bark destruction during group debarking of wood. *Scientific notes of Petrozavodsk State University*, 2011, no. 8 (121), pp. 92–96. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 28.09.2023

---

**Каляшов В.А., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И.** Оценка технологических свойств оттаивающих почвогрунтов под нагрузкой от лесной машины и трелевочной системы на склонах // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 249. С. 256–270. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.256-270

В Российской Федерации значительная часть территории лесного фонда расположена на вечной мерзлоте. К таким территориям относятся: Республика Саха (Якутия), Республика Коми, Магаданская область, Ямало-Ненецкий автономный округ, Чукотский автономный округ, Мурманская область, значительные территории Сибири и Дальнего Востока. Многие перечисленные регионы обладают большими запасами спелых и перестойных эксплуатационных лесов, причем значительная часть этих запасов расположена

в труднодоступных местах, не только по отношению к развитости дорожной сети, но и по рельефу местности. В настоящее время подавляющий объем заготовок древесины в России производится при помощи современных машинных комплексов, в основном, на базе колесных лесных машин. В статье представлена оценка технологических свойств оттаивающих почвогрунтов под нагрузкой от движителя лесной машины, позволяющая произвести обоснованную оценку одного из совокупности технологических свойств различных участков массивов оттаивающих почвогрунтов – их прочности на одноосное сжатие – под нагрузкой от действия лесной машины или трелевочной системы на ее базе на склонах вблизи с границей зоны вечной мерзлоты. Эффективный учет выявленных закономерностей возможен на базе сбора и обработки данных геологических, в первую очередь, гидрогеологических исследований физико-механических свойств и состояний почвогрунтов, слагающих краевую часть поверхности склона. Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-26-00009, <https://rscf.ru/project/22-26-00009/>.

**Ключевые слова:** леса на склонах, лесозаготовка, лесные машины, трелевочные системы, уплотнение почвогрунта, деформация почвогрунта.

**Kalyashov V.A., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I.**  
Assessment of technological properties of thawing soils under load from a forest machine and a skidding system on slopes. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 249, pp. 256–270 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.256-270

In the Russian Federation, a significant part of the territory of the forest fund is located on permafrost. Such territories include: the Republic of Sakha (Yakutia), the Komi Republic, the Magadan Region, the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, the Chukotka Autonomous Okrug, the Murmansk Region, significant territories of Siberia and the Far East. Many of the listed regions have large reserves of ripe and over-mature operational forests, and a significant part of these reserves are located in hard-to-reach places, not only in relation to the development of the road network, but also in terms of the terrain of the local area. Currently, the overwhelming volume of wood harvesting in Russia is produced with the help of modern machine complexes, mainly on the basis of wheeled forest machines. The article presents an assessment of the technological properties of thawing soils under load from the propulsion of a forest machine, which allows a reasonable assessment of one of the aggregate technological properties of various sections of thawing soil arrays – their uniaxial compression strength – under load from the action of a forest machine or a skidding system based on it on slopes near the boundary of the permafrost zone- lots. Effective accounting of

the revealed patterns is possible on the basis of the collection and processing of geological data, primarily hydrogeological studies of the physical and mechanical properties and conditions of soils composing the marginal part of the slope surface. The work was performed within the framework of the scientific school «Innovative developments in the field of logging industry and forestry» of the Arctic State Agrotechnological and Logistic University. The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 22-26-00009, <https://rscf.ru/project/22-26-00009/>.

**Keywords:** forests on slopes, logging, forestry machines, skidding systems, soil compaction, soil deformation.

---

**КАЛЯШОВ Виталий Анатольевич** – доцент кафедры начертательной геометрии и инженерной графики Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета, кандидат технических наук.

190005, 2я Красноармейская ул., д. 4, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: vit832@yandex.ru

**KALYASHOV Vitaly A.** – PhD (Technical), Associate Professor of Descriptive Geometry and Engineering Graphics of the St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering.

190005. 2nd Krasnoarmeyskaya str. 4. St. Petersburg. Russia. E-mail: vit832@yandex.ru

**ШАПИРО Владимир Яковлевич** – профессор кафедры высшей математики Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университете имени С.М. Кирова, доктор технических наук.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: shapiro54vlad@mail.ru

**SHAPIRO Vladimir Ya.** – DSc (Technical), Professor of the Department of Higher Mathematics of the St.Petersburg State Forestry University.

194021. Institutskiy per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: shapiro54vlad@mail.ru

**ГРИГОРЬЕВ Игорь Владиславович** – профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» Арктического государственного агротехнологического университета, доктор технических наук.

677007, Сергеляхское ш., 3 км, д. 3, г. Якутск, Россия. E-mail: silver73@inbox.ru

**GRIGORIEV Igor V.** – DSc (Technical), Professor of the Department of Technology and Equipment of the Forest Complex of the Arctic State Agrotechnological University.

677007. Sergelyakhskoe sh. 3 km. 3. Yakutsk. Russia. E-mail: silver73@inbox.ru

**КУНИЦКАЯ Ольга Анатольевна** – профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» Арктического государственного агротехнологического университета, доктор технических наук.

677007, Сергеяихское ш., 3 км, д. 3, г. Якутск, Россия. E-mail: ola.ola07@mail.ru

**KUNITSKAYA Olga A.** – DSc (Technical), Professor of the Department of Technology and Equipment of the Forest Complex of the Arctic State Agrotechnological University.

677007. Sergelyakhskoe sh. 3 km. 3. Yakutsk. Russia. E-mail: ola.ola07@mail.ru

**ГРИГОРЬЕВА Ольга Ивановна** – доцент кафедры лесоводства Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат сельскохозяйственных наук.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: grigoreva\_o@list.ru

**GRIGORIEVA Olga I.** – PhD (Agriculture), Associate Professor of the Department of Forestry of the St.Petersburg State Forestry University.

194021. Institutsky per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: grigoreva\_o@list.ru

### **3. ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ, ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЕРЕВОПЕРЕРАБОТКИ**

---

УДК 676.052.2

**В.П. Сиваков, А.В. Вураско, С.Н. Вихарев, С.Н. Исаков, К.С. Исаева**

#### **ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ БЛОКОВ РОТАМЕТРОВ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ СМАЗКИ ПОДШИПНИКОВ СУШИЛЬНОЙ ЧАСТИ НА МОЩНОСТЬ ПРИВОДА**

*Введение.* В сушильных частях (СЧ) бумаго- и картоноделательных машин для смазки подшипников сушильных цилиндров (СЦ) и сетковедущих валов применяют системы циркуляционной смазки. Система циркуляционной смазки состоит из автоматизированной станции, трубопроводов и блоков дозирующих устройств (ротаметров) [Кугушев и др., 2017]. Автоматизированная станция укомплектована баком для масла. Прикладные исследования циркуляционных систем смазки подшипников СЧ приведены в [Перель и др., 1992; Сиваков и др., 2022]. В этих работах рассмотрено обоснование расхода масла, подаваемого в подшипники СЦ, и исследованы тепловые потери при нагревании масла в трубопроводах в зоне СЧ.

В сушильных частях бумаго- и картоноделательных машин применяют две схемы расположения блоков ротаметров систем циркуляционной смазки подшипников. По первой схеме применяют компактное расположение ротаметров (КРР), состоящее из двух блоков. Один блок КРР расположен по центру СЧ с лицевой стороны, а второй – с приводной стороны. По второй схеме блоки ротаметров располагают рассредоточенно в группах по приводу (РГП) с лицевой и приводной сторон СЧ. Схемы КРР и РГП и расчеты длины труб малого диаметра исследованы в [Сиваков и др., 2023].

Схема КРР отличается от схем РГП значительно большей длиной труб малого диаметра от ротаметров до подшипниковых опор СЦ и сетковедущих валов. Известно, что распределение потока жидкости из трубы большого диаметра в трубы малого диаметра приводит к увеличению потерь мощности на трение в трубопроводной системе.

Цель работы состоит в определении влияния длины труб малого диаметра на мощность привода насоса системы циркуляции масла при КРР и

РГП схемах компоновки развода труб малого диаметра от блоков ротаметров до подшипников.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи.

- Разработан метод и выполнены расчеты следующих технологических характеристик систем циркуляции: расхода, скорости, кинематической вязкости, динамической вязкости масла;
- Произведены гидравлические расчеты, расчет и сравнение потерь мощности на отличающихся участках труб малого диаметра по схемам КРП и РГП;
- Определены потери мощности на сопротивление движения масла в трубах подачи к подшипникам СЦ по схемам КРП и РГП.

*Методика исследования.* Схемы, поясняющие расчет длин труб малого (4...7 мм) диаметра от ротаметров до корпусов подшипников приведены на рис. 1 и 2.

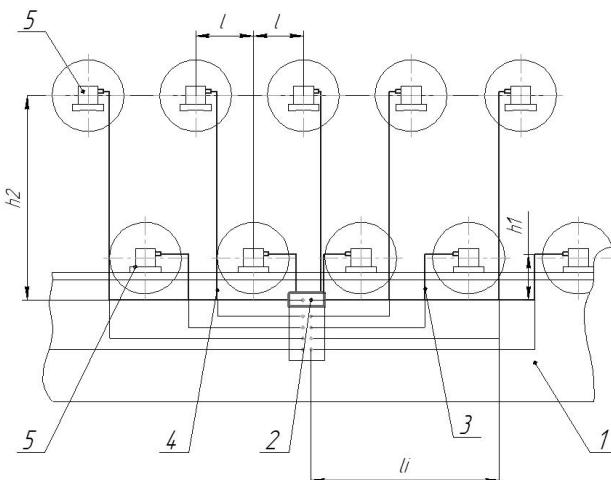


Рис. 1. Схема труб подачи масла к подшипниковым опорам СЦ группы по приводу: 1 – продольная балка фундамента; 2 – пучок труб от блока ротаметров; 3, 4 – трубы нижнего и верхнего рядов СЦ; 5 – корпуса подшипниковых опор;  $h_1$ ,  $h_2$  – вертикальный участок труб нижнего и верхнего рядов СЦ соответственно;  $l$  – расстояние между осями смежных подшипниковых опор СЦ

Fig. 1. Diagram of oil supply pipes to the bearing supports of the SC group according to the drive: 1 – the longitudinal beam of the foundation; 2 – a bundle of pipes from the rotameter block; 3, 4 – pipes of the lower and upper rows of the DC; 5 – bearing support housings;  $h_1$ ,  $h_2$  – vertical section of pipes of the lower and upper rows of the SC, respectively;  $l$  – is the distance between the axes of adjacent bearing supports of the DC

При компоновке блоков ротаметров по схеме КПР и РГП высота вертикальных участков труб (рис. 1), а также длина горизонтальных участков труб в направлении  $X$  (рис. 2) постоянна. Изменяется только длина горизонтальных участков труб  $l_i$  (рис. 1).

Длины горизонтальных участков труб малого диаметра  $l_i$  при КПР и РГП определены по чертежам, измерениям на действующем оборудовании и приведены в [Сиваков и др., 2023]. Установлено, что трубы имеют средние арифметические значения длины подвода масла от ротаметров до подшипников: сушильных цилиндров и сетковедущих валов в схеме КПР  $L_{\text{пп}} = 13,51$  м;  $L_{\text{вк}} = 11,33$  м соответственно; сушильных цилиндров и сетковедущих валов в схеме РГП  $L_{\text{пп}} = 4,0$  м;  $L_{\text{вп}} = 4,12$  м соответственно.

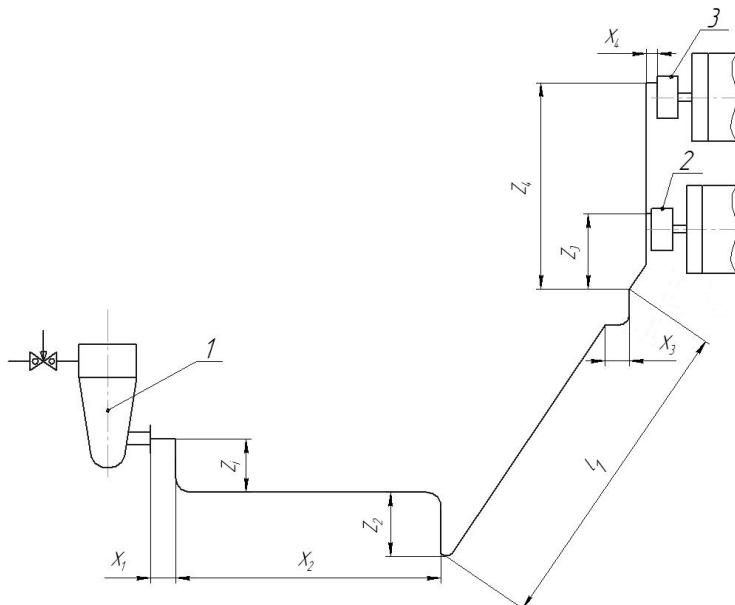


Рис. 2. Схема участков трубы подачи масла от ротаметров до корпусов подшипников: 1 – ротаметр; 2, 3 – корпуса подшипников нижнего и верхнего рядов СЦ и сетковедущих валов соответственно;  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$  – вертикальные участки;  $X_1, X_2, X_3, X_4$  – горизонтальные участки в направлении  $X$ ;  $l_1$  – горизонтальные участки в направлении  $L$

Fig. 2. Diagram of sections of the oil supply pipe from rotameters to bearing housings: 1 – rotameter; 2, 3 – bearing housings of the lower and upper rows of DC and grid shafts, respectively;  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$  – vertical sections;  $X_1, X_2, X_3, X_4$  – horizontal sections in the  $X$  direction;  $l_1$  – horizontal sections in the  $L$  direction

Метод определения расхода масла, подаваемого в подшипниковые опоры СЦ и сетковедущих валов. Расход (интенсивность) подачи масла рассчитывали по [Федулов и др., 2002]:

$$Q = (0,15 \dots 0,2)d_1, \text{ л/мин}, \quad (1)$$

где 0,15 – без отвода тепла от подшипника; 0,2 – с отводом тепла;  $d_1$  – внутренний диаметр подшипников, см.

Расчетный расход подачи масла уточняли по диаграммам из [Машини..., 1982] с учетом средних диаметров подшипников  $D_c$ , мм и частоты вращения  $n$ , об/мин СЦ и сетковедущих валов.

Средний диаметр подшипников определяем по формуле

$$D_c = \frac{D + d_1}{2}, \quad (2)$$

где  $D$ ,  $d_1$  – наружный и внутренний диаметры подшипника соответственно, мм.

Частоты вращения СЦ ( $n_{\text{сц}}$ ), приводных сетковедущих валов ( $n_{\text{пв}}$ ) и сетковедущих (неприводных) валов ( $n_{\text{нв}}$ ) определяем по формуле

$$n = \frac{V_M(1 \pm k)}{\pi d}, \text{ об/мин}, \quad (3)$$

где знак «+» – для приводных сетковедущих валов; знак «-» – для неприводных СЦ и сетковедущих валов;  $V_M$  – скорость машины, м/мин;  $d$  – наружные диаметры СЦ и сетковедущих валов, м;  $k = 0,004$  – коэффициент проскальзывания валов относительно приводной сушильной сетки,

Расчетные значения  $D_c$  подшипников и расхода масла  $Q$  на смазку подшипников СЦ и сетковедущих валов СЧ приведены в табл. 1.

Метод расчета потерь мощности в трубах малого диаметра подачи масла от ротаметров к подшипниковым опорам СЦ и сетковедущих валов [Машини..., 1982; Сиваков, Исаева, 2023]. Определяем потери мощности в трубах подачи масла к подшипниковым опорам СЦ. Расход масла на один подшипник Н13536 принимаем по данным табл. 1,  $Q_{\text{ц}} = 0,21 \text{ дм}^3/\text{мин} = 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ . Трубопровод имеет наружный диаметр 10 мм и толщину стенки 1,5 мм, внутренний диаметр  $d$  трубопровода равен 7 мм. Расчет производим для горизонтальных длин труб  $l_i$ .

Скорость масла в трубе определяем по формуле

$$\omega_{\text{в}} = 4Q / \pi d^2, \text{ м/с}. \quad (4)$$

В системе циркуляции применяется масло МС-20сп «Энройл» (ТУ 0253-005 522 72771-2006 (с изм.)).

Плотность масла при температуре 65 °С равна 871 кг/м<sup>3</sup>.

Кинематическая вязкость масла для подшипников Н13536 со средним диаметром  $D_C = 270$  мм при частоте вращения  $n = 93,045$  об/мин и рабочей температуре  $t_p = 67$  °С, определенная по [Машины..., 1982]  $\mu_k = 160$  см<sup>2</sup>/с =  $= 160 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с.

Динамическую вязкость определяли из [Перель, 1992] по формуле

$$\mu = \mu_k \cdot \rho, \text{ кг/м}\cdot\text{с} \quad (5)$$

Критерий Рейнольдса определяли по формуле

$$Re = \omega d \rho / \mu. \quad (6)$$

Принимаем абсолютную шероховатость труб  $\Delta = 0,06 \cdot 10^{-4}$  м, тогда относительная шероховатость труб

$$e = \Delta / d. \quad (7)$$

Определяем границы зон потоков [Машины..., 1982]:

$$\frac{1}{e} = \frac{1}{8,57} = 0,117; \quad \frac{560}{e} = \frac{560}{8,57} = 65,3; \quad \frac{10}{e} = \frac{10}{8,57} = 1,167.$$

По турбулентности поток масла в трубах относится к зоне гладкого трения, тогда по условию [Машины..., 1982; Сиваков, Исаева и др., 2023]

$$Re < \frac{10}{e} \text{ или } 1,167 < 16,7 \cdot 10^3$$

При гладком трении масла в трубах коэффициент  $\lambda$  рассчитываем по формуле:

$$\lambda = 0,316 / \sqrt{Re}. \quad (8)$$

Определим сумму коэффициентов местных сопротивлений

Принимаем вход в трубу с острыми краями:  $\xi_1 = 0,5$ .

Отводы,  $\xi_2 = A \cdot B$ . Труба имеет три плавных отвода под углом 90°. Коэффициент A = 1. Коэффициент B = 0,11 при отношении радиуса поворота трубы  $R_o$  к внутреннему диаметру трубы  $d$   $R_o / d = 4,0$ .

$$\xi_2 = 1 \cdot 0,11 = 0,11.$$

Выход из трубы с закругленными краями:  $\xi_3 = 0,2$ .

Сумма коэффициентов местных сопротивлений в трубе подачи масла к подшипникам СЦ:

$$\sum \xi_{\text{м}} = \xi_1 + n \cdot \xi_2 + \xi_3 \quad (9)$$

где  $n = 3$  – количество отводов.

Определяем потерянный напор на горизонтальном участке труб для схемы КРП по формуле

$$h_k = (\lambda \cdot n_u \cdot L_{up} / d_m + n_u \sum \xi_u) \frac{\omega^2}{2g}, \text{ м,} \quad (10)$$

где  $\lambda = 1,58$  – коэффициент гидравлического трения;  $n_u = 76$  – количество подшипников СЦ;  $L_{up} = 13,51$  м – средняя длины трубы подачи масла к одному подшипнику СЦ [Сиваков и др., 2023];  $d_m = 0,007$  м – внутренний диаметр трубы;  $\sum \xi_u = 1,03$  – коэффициент местного сопротивления;  $\omega = 0,091$  м/с – средняя скорость потока;  $g = 9,8$  м·с<sup>-2</sup> – ускорение свободного падения.

Определяем потерянный напор на горизонтальном участке труб для схемы РГП по формуле

$$h_p = (\lambda \cdot n_u \cdot L_{up} / d_m + n_u \sum \xi_u) \frac{\omega^2}{2g}, \text{ м,} \quad (11)$$

где  $L_{up} = 13,51$  м – средняя длины трубы подачи масла к одному подшипнику СЦ [Сиваков и др., 2023].

Потери мощности привода на сопротивление в трубах подачи масла к подшипникам СЦ по схеме КРП:

$$N_{up} = \rho \cdot g \cdot n_u \cdot Q_u \cdot h_k, \text{ Вт.} \quad (12)$$

Потери мощности привода на сопротивление в трубах подачи масла к подшипникам СЦ по схеме РГП:

$$N_{up} = \rho \cdot g \cdot n_u \cdot Q_u \cdot h_p, \text{ Вт.} \quad (13)$$

Расчет потерь мощности на трение в трубах подачи масла к подшипникам сетковедущих валов выполним аналогично подобному расчету для подшипников СЦ. При расчетах использованы данные табл. 1.

Общее снижение потерь мощности шестеренного насоса на сопротивление в трубах малого диаметра подачи масла к подшипникам СЦ и сетковедущих валов по схеме РГП в сравнении со схемой КРП:

$$N_o = N_u + N_{up} + N_b, \text{ кВт.} \quad (14)$$

Суточный расход энергии шестеренного насоса при компоновке ротаметров в группах по приводу СЧ (РГП) по сравнению со схемой КРП сокращается на

$$A_c = \kappa_c \kappa_u N_o, \text{ кДж,} \quad (15)$$

где  $\kappa_c = 24$  – суточный коэффициент;  $\kappa_u = 3600$  – часовой коэффициент.

*Результаты исследования.*

1. *Определение расхода масла, подаваемого в подшипниковые опоры СЦ и сетковедущих валов.* Расход (интенсивность) подачи масла в подшипниковые опоры, определенный по (1), средние диаметры  $D_C$  подшипников СЦ, приводных сетковедущих валов и сетковедущих (неприводных) валов, определенные по (2), приведены в табл. 1.

Частота вращения СЦ, определенная по (4) при  $d = 1500$  мм,  $k = 0,004$  и  $V_m = 440$  м/мин.

$$n_{\text{СЦ}} = \frac{440(1-0,004)}{\pi 1,5} = 93,045 \text{ об/мин.}$$

Частота вращения приводных сетковедущих валов диаметром 260 мм по (4) равна

$$n_{\text{ПВ}} = \frac{440(1+0,004)}{\pi 0,260} = 541,1 \text{ об/мин} = 9,01 \text{ об/с.}$$

Частота вращения сетковедущих (неприводных) валов диаметром 140 мм по (4) и данным табл. 1 равна

$$n_{\text{НВ}} = \frac{440(1-0,004)}{\pi 0,14} = 996,9 \text{ об/мин} = 16,6 \text{ об/с.}$$

При определении потерь мощности привода на трение в трубах малого диаметра приняты максимальные значения расхода масла, подаваемого в подшипниковые опоры, из табл. 1.

Таблица 1

**Расход масла, поступающего в подшипники СЦ и сетковедущих валов по системе циркуляционной смазки**

**The consumption of oil entering the bearings of the DC and the grid shafts through the circulating lubrication system**

| Номер подшипника | Диаметры подшипника, мм |                       |                    | Количество подшипников, $n$ | Расход масла* $Q$ , л/мин на |                      |
|------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------|
|                  | Наруж-<br>ный $D$       | Внутрен-<br>ний $d_1$ | Сред-<br>ний $D_C$ |                             | Один под-<br>шипник          | $n$ подшипни-<br>ков |
| H13536           | 360                     | 180                   | 270                | 72                          | 0,16/0,21                    | 11,52/15,12          |
| 22218К.С3        | 160                     | 85                    | 122,5              | 32                          | 0,05/0,02                    | 0,96/1,28            |
| 22313К.С3        | 140                     | 60                    | 100                | 92                          | 0,03/0,05                    | 1,29/1,82            |

\* Расход масла рассчитан в числителе без отвода тепла, в знаменателе – с отводом тепла от подшипников

2. Метод расчета потерь мощности в трубах малого диаметра  $d_m$  подачи масла от ротаметров к подшипниковым опорам СЦ и сетковедущих валов [Сиваков, Исаева, 2023].

Скорость масла в трубе по (4)

$$\omega_B = 4 \cdot 3,5 \cdot 10^{-6} / \pi \cdot 0,007^2 = 0,091 \text{ м/с.}$$

Динамическую вязкость определяли по формуле (5)

$$\mu = 160 \cdot 10^{-4} \cdot 893 = 14,29 \text{ кг/м} \cdot \text{с.}$$

Критерий Рейнольдса определяли по формуле (6)

$$Re = 0,091 \cdot 0,007 \cdot 893 / 14,29 = 0,04.$$

Относительная шероховатость внутренних стенок труб, определенная по (7), равна

$$e = 0,06 \cdot 10^{-4} / 0,007 = 8,57 \cdot 10^{-4}.$$

По турбулентности поток масла в трубах относится к зоне гладкого трения [Сиваков, Исаева, 2023].

При гладком трении масла в трубах коэффициент  $\lambda$ , определенный по формуле (8), равен

$$\lambda = 0,316 / \sqrt{0,04} = 1,58.$$

Сумма коэффициентов местных сопротивлений в трубе подачи масла к подшипникам СЦ по (9)

$$\Sigma \xi_u = 0,5 + 3 \cdot 0,11 + 0,2 = 1,03$$

Потерянный напор на горизонтальном участке труб для схемы КРП по (10)

$$h_k = (1,58 \cdot 76 \cdot 13,51 / 0,007 + 76 \cdot 1,03) \frac{0,091^2}{2 \cdot 9,81} = 97,85 \text{ м.}$$

Потерянный напор на горизонтальном участке труб для схемы РГП по (11)

$$h_p = (1,58 \cdot 76 \cdot 4 / 0,007 + 76 \cdot 1,03) \frac{0,091^2}{2 \cdot 9,81} = 29,0 \text{ м.}$$

Потери мощности привода на сопротивление в трубах подачи масла к подшипникам СЦ по схеме КРП по (12)

$$N_{uk} = 893 \cdot 9,81 \cdot 76 \cdot 3,5 \cdot 10^{-6} \cdot 97,85 = 228 \text{ Вт.}$$

Потери мощности привода на сопротивление в трубах подачи масла к подшипникам СЦ по схеме РГП по формуле (13)

$$N_{up} = 893 \cdot 9,81 \cdot 76 \cdot 3,5 \cdot 10^{-6} \cdot 29 = 67,6 \text{ Вт.}$$

Снижение потерь мощности  $N_{\text{пп}}$  на сопротивление в трубах подачи масла к СЧ по схеме РГП по сравнению со схемой КРР по формуле (14)

$$N_{\text{пп}} = 228 - 67,6 = 160,4 \text{ Вт.}$$

Расчетные данные потерь мощности в трубах подачи масла к подшипникам сетковедущих валов представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Расчетные данные к определению потерь мощности в трубах  
(внутренний диаметр труб  $d_m = 0,004 \text{ м}$ ) от ротаметров до подшипников  
в схемах КРР и РГП компоновок систем циркуляции смазки**

**Calculated data for the determination of power losses in pipes  
(inner diameter of pipes  $d_m = 0.004 \text{ m}$ ) from rotameters to bearings  
in the schemes of KRR and RGP layouts of lubrication circulation systems**

| Показатели  | Схемы систем циркуляции масла в СЧ       |  |
|---|--|--|
|   | компактное расположение ротаметров (КРР) | расположение блоков ротаметров в группах СЧ по приводу (РГП) |
| приводных сетковедущих валов  |  |  |
| Скорость масла в трубе $\omega_6$ , м/с   | 0,104                                    |  |
| Динамическая вязкость $\mu$ , кг/м·с  | 8,93                                     |  |
| Потерянный напор в трубах $h_{\text{пп}}$ , м   | 80                                       | 28,7   |
| Потери мощности, Вт   |  |  |
| $N_{\text{к.пп}}$   | 29,1                                     | –  |
| $N_{\text{р.пп}}$   | –  | 10,4   |
| $N_{\text{пп}}$ (снижение потерь мощности<br>$N_{\text{р.пп}}$ относительно $N_{\text{к.пп}}$ ), Вт | 18,7                                     |  |
| сетковедущих (неприводных) валов  |  |  |
| Скорость масла в трубе $\omega_6$ , м/с   | 0,0663                                   |  |
| Динамическая вязкость $\mu$ , кг/м·с  | 8,037                                    |  |
| Потерянный напор в трубах $h_{\text{пп}}$ , м   | 11,73                                    | 4,27   |
| Потери мощности, Вт   |  |  |
| $N_{\text{к.пп}}$   | 73,8                                     | –  |
| $N_{\text{р.пп}}$   | –  | 27,0   |
| $N_{\text{пп}}$ (снижение потерь мощности<br>$N_{\text{р.пп}}$ относительно $N_{\text{к.пп}}$ ), Вт | 46,8                                     |  |

Общее снижение потерь мощности привода на сопротивление в трубах малого диаметра ( $d$ ) подачи масла от ротаметров к подшипникам СЦ и сетковедущих валов в схеме РГП относительно схемы КПР по (14)

$$N_o = 160,4 + 18,7 + 46,8 = 225,9 \text{ Вт} = 0,2259, \text{ кВт.}$$

Суточный расход энергии привода при компоновке ротаметров в группах по приводу РГП сокращается по сравнению со схемой КПР в соответствии с формулой (15)

$$A_c = 24 \cdot 3600 \cdot 0,2255 = 19483,2, \text{ кДж.}$$

Следовательно, компоновка РГП в лучшей степени удовлетворяет условиям энергосбережения, чем КПР.

#### *Выходы.*

1. Разработан метод и выполнены технологические расчеты системы циркуляционной смазки в системах КПР и РГП. Обоснованы характеристики систем циркуляции по расходу масла, диаметрам трубопроводов, скорости, динамической вязкости и температуре масла.

2. Установлено, что снижение потерь мощности привода насоса при компоновке блоков ротаметров в группах по приводу сушильной части составляет 0,225 кВт, а суточный расход энергии сокращается по сравнению с компактной схемой расположения ротаметров на 5,4 кВт·ч.

*Конфликт интересов.* Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Библиографический список**

*Кугушев И.Д., Терентьев О.А., Куро В.С. и др.* Машины для производства бумаги и картона. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. 646 с.

Машины и аппараты химических производств / под ред. В.Н. Соколова. Л.: Машиностроение, 1982. 384 с.

*Перель Л.Я., Филатов А.А.* Подшипники качения: Расчет, проектирование и обслуживание опор: справочник. М.: Машиностроение, 1992. 608 с.

*Сиваков В.П., Вурако А.В., Исаева К.С.* Температурное диагностирование подшипников сушильных цилиндров картоноделательной машины // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки: сб. матер. Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (с междунар. участием) / под общ. ред. Ю.Ю. Логинова; СибГУ им. М.Ф. Решетнева. Красноярск, 2022. С. 185–202.

*Сиваков В.П., Вурако А.В., Исааков С.Н., Исаева К.С.* Обоснование энергосбережения в сушильной части при модернизации циркуляционной смазки подшипников // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. Вып. 243. С. 269–283. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.243.269-283.

Сиваков В.П., Исаева К.С. Температурное диагностирование циркуляционной смазки подшипников сушильных цилиндров // Научное творчество молодежи лесному комплексу России : матер. XIX Всерос. (национальной) науч.-техн. конф. студентов и аспирантов / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации. Екатеринбург, 2023. С. 576–580.

Федулов А.А., Спиридонова В.А., Некрасов Н.Н., Булганина М.Ю. Условия эксплуатации и смазка подшипниковых опор. URL: <https://study.urfu.ru/Aid/viewMeta/13907>

### References

Chemical production machines and apparatuses / edited by V.N. Sokolov. L.: Mechanical Engineering, 1982. 384 p. (In Russ.)

Kugushev I.D., Terentyev O.A., Kurov V.S., etc. Machines for the production of paper and cardboard. St. Petersburg: Polytechnic Publishing House. un-ta, 2017. 646 p. (In Russ.)

Perel L.Ya., Filatov A.A. Rolling bearings: Calculation, design and maintenance of supports: Handbook. M.: Mechanical Engineering, 1992. 608 p. (In Russ.)

Sivakov V.P., Vurasko A.V., Isaeva K.S. Temperature diagnostics of bearings of drying cylinders of a cardboard-making machine. *Young scientists in solving urgent problems of science: collection of materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference of students, postgraduates and young scientists (with international participation) / under the general editorship of Yu.Yu. Loginov; SibGU named after M.F. Reshetnev*. Krasnoyarsk, 2022, pp. 185–202. (In Russ.)

Sivakov V.P., Vurasko A.V., Isaakov S.N., Isaeva K.S. Justification of energy saving in the drying section during the modernization of circulating greasing of bearings. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2023, iss. 243, pp. 269–283 (In Russ.)

Sivakov V.P., Isaeva K.S. Temperature diagnostics of circulating lubrication of bearings of drying cylinders. *Scientific creativity of youth to the forest complex of Russia: materials of the XIX All-Russian. (national) scientific-technical conf. of students and postgraduates / Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation*. Yekaterinburg, 2023, pp. 576-580. (In Russ.)

Fedulov A.A., Spiridonova V.A., Nekrasov N.N., Bulganina M.Yu. Operating conditions for lubrication of bearing supports. URL: <https://study.urfu.ru/Aid/viewMeta/13907> (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 25.10.2023

---

**Сиваков В.П., Вурако А.В., Вихарев С.Н., Исаков С.Н., Исаева К.С.**  
Влияние расположения блоков ротаметров циркуляционной смазки подшипников сушильной части на мощность привода // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 249. С. 271–284.  
DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.271-284

В сушильных частях бумажо- и картоноделательных машин применяют две схемы расположения блоков ротаметров систем циркуляционной смазки подшипников. Компактная схема имеет два блока ротаметров (по одному с лицевой и приводной сторон машиной). Распределенная по приводным группам сушильной части схема имеет восемь блоков ротаметров (по два блока на каждую группу по приводу). Схемы расположения блоков ротаметров отличаются разной длиной труб малого диаметра (4-7 мм) подачи масла от ротаметров до подшипников. Влияние длины и диаметра труб подачи масла от ротаметров к подшипникам на мощность привода насоса не изучено. Цель работы состоит в определении влияния длины трубы малого диаметра от ротаметров к подшипникам на мощность привода насоса при компактной и распределенной по приводным группам сушильной части схемам компоновок блоков ротаметров. Разработан метод и выполнены следующие технологические расчеты систем циркуляции масла: расхода, скорости, кинематической вязкости, динамической вязкости. Выполнен гидравлический расчет потерь мощности на отличающихся участках труб малого диаметра по вариантам схем компоновки блоков ротаметров. Разработан метод и выполнены технологические расчеты систем циркуляционной смазки. Обоснованы характеристики систем циркуляции по расходу масла, скорости, кинематической и динамической вязкости масла. Установлено, что снижение потерь мощности привода насоса при компоновке блоков ротаметров в группах по приводу сушильной части составляет 0,225 кВт, а суточный расход энергии сокращается по сравнению с компактной схемой расположения ротаметров на 5,4 кВт·ч.

**Ключевые слова:** циркуляционная смазка, компоновка, ротаметр, масло, сушильный цилиндр, сушильная часть, мощность.

**Sivakov V.P., Vurasko A.V., Vikharev S.N., Isakov S.N., Isaeva K.S.** The influence of the location of the rotameter blocks of the circulating lubrication of the bearings of the drying part on the drive power. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 249, pp. 271–284 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.271-284

In the drying parts of boom- and cardboard-making machines, three schemes of arrangement of rotameter blocks of bearing circulation lubrication systems are used. The compact circuit has two rotameter blocks (one on the front and drive sides of the machine). The multi-block scheme distributed among the drive groups of the drying part has 3...4 rotameter blocks in each group of the drying part. The arrangement schemes of rotameter blocks differ in different lengths of small diameter pipes (4-7 mm) of oil supply from rotameters to bearings. The effect of the length and diameter of the oil supply pipes from the rotameters to the bearings on the pump drive power has not been studied. The purpose of the work is to determine the effect of the length of a small diameter pipe from rotameters to bearings on the pump drive power with a compact and distributed among the drive groups of the drying part of the rotameter block layout schemes. A method has been

developed and the following technological calculations of oil circulation systems have been performed: flow rate, velocity, kinematic viscosity, dynamic viscosity. Hydraulic calculation of power losses on different sections of small diameter pipes according to the variants of the layout schemes of rotameter blocks is performed. A method has been developed and technological calculations of circulating lubrication systems have been performed. The characteristics of the circulation systems in terms of oil consumption, speed, kinematic and dynamic viscosity of the oil are substantiated. It was found that the reduction in the power loss of the pump drive when the rotameter blocks are arranged in groups along the drive of the drying part is 0.225 kW, and the daily energy consumption is reduced by 5.4 kWh compared to the compact rotameter layout.

**К e y w o r d s :** circulating lubricant, layout, rotameter, oil, drying cylinder, drying part, power.

---

**СИВАКОВ Валерий Павлович** – профессор кафедры технологических машин и технологии машиностроения Уральского государственного лесотехнического университета, доктор технических наук.

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

**SIVAKOV Valeriy P.** – DSc (Technical), Professor Department of Technological Machines and Mechanical Engineering Technology Ural State Forest Engineering University.

620100. Siberian tract str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: sivakovvp@m.usfeu.ru

**ВУРАСКО Алеся Валерьевна** – профессор кафедры технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров Уральского государственного лесотехнического университета, доктор технических наук, профессор.

620100, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: vurasko2010@yandex.ru

**VURASKO Alesya V.** – DSc (Technical), Professor of the department technology of pulp and paper industries and polymer processing of the Ural State Forest Engineering University.

620100. Siberian tract str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: vurasko2010@yandex.ru

**ВИХАРЕВ Сергей Николаевич** – профессор кафедры технологических машин и технологии машиностроения Уральского государственного лесотехнического университета, доктор технических наук.

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

**VIKHAREV Sergey N.** – DSc (Technical), Professor Department of Technological Machines and Mechanical Engineering Technology Ural State Forest Engineering University.

620100. Siberian tract str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: viharevsn@m.usfeu.ru

**ИСАКОВ Сергей Николаевич** – доцент кафедры технологических машин и технологии машиностроения Уральского государственного лесотехнического университета, кандидат технических наук.

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

**ISAkov Sergey N.** – PhD (Technical), Associate Professor of the department Technological Machines and Mechanical Engineering of the Ural State Forest Engineering University.

620100. Siberian tract str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: isakovsn@m.usfeu.ru

**ИСАЕВА Ксения Сергеевна** – соискатель ученой степени кандидата технических наук Уральского государственного лесотехнического университета.

620100, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: isaeva.kseniya.98@mail.ru

**ISAeva Kseniya S.** – PhD student, Ural State Forest Engineering University.

620100. Siberian tract str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: isaeva.kseniya.98@mail.ru

## 4. ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ. БИОТЕХНОЛОГИЯ

---

УДК 676.252.2

И.В. Лаврентьев, В.К. Дубовый, Е.И. Симонова

### ГИДРОФИЛИЗАЦИЯ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ ВОДОПОГЛОЩЕНИЯ ЦЕЛЛЮЛОЗНОГО КОМПОЗИТА

*Введение.* Единственным природным неисчерпаемым источником целлюлозосодержащих материалов (ЦСМ) на Земле являются растения [Структура..., 2014]. Среди них промышленное значение принадлежит деревьям, многолетним и однолетним недревесным растениям, в частности, соломе злаковых и технических культур, растениям плантационного целевого выращивания, например, мискантусу [Воюцкий, 1975]. Растениям присуще природное свойство – ярко выраженное сродство к воде, называемое «гидрофильность», определяющее водопитывающие и водопроводящие процессы [Лаврентьев, 2023]. Все многообразие современных технических волокон, получаемых по различным технологиям из растений, является ЦСМ [Аким, 2003; Пузырев, 2004], сохраняющими природное свойство источников их получения – гидрофильность. Это свойство поливариантно проявляется в зависимости от вида ЦСМ, способа получения и целевого воздействия технологическими факторами [Лаврентьев, 2023].

*Цель работы.* Исследование явлений и факторов гидрофильности целлюлозы и целлюлозного композита для прогнозирования скорости и объема водопоглощения.

*Объекты исследования:* целлюлоза сульфатная беленая из хвойной древесины по ГОСТ 9571-89 и целлюлоза сульфатная беленая из лиственничной древесины ГОСТ 14940-96 АО Архангельский ЦБК.

*Методы и методики исследования.* Применялись методики исследования, предусмотренные ГОСТ 9571-89 и ГОСТ 14940-96 и изложенные в труде [Дубовый, 2006]: определение степени помола; водопоглощение при полном погружении

*Результаты и обсуждение.* Объектом исследования выбрана целлюлоза по ГОСТ 9571-89 и ГОСТ 14940-96, так как в настоящее время она используется для получения и формования сердцевинных слоев всего ассортимента одноразовых санитарно-гигиенических изделий (СГИ). Целлюлоза преимущественно удовлетворяет водопитывающим, санитарно-гигиеническим, физико-механическим и эстетическим требованиям к готовым СГИ. Однако увеличение водопоглощения и экономичности производства СГИ остается актуальной задачей. Перспективным решением задачи является повышение гидрофильности целлюлозных компонентов и микропористости целлюлозного композита в процессах технологии их производства.

*Теоретические представления о возникновении, развитии и управлении гидрофильностью целлюлозы.* Исходя из требований максимального водопоглощения и удержания воды, рассмотрим основные влияющие факторы. Приведение в контакт целлюлозы (твердая фаза) и воды (жидкая фаза) всегда сопровождается межфазным молекулярным взаимодействием, проявляемым «смачиванием-несмачиванием» твердой фазы. Различают смачивание гидрофильное (контактное) и смачивание гидрофобное (иммерсионное), определяемое соотношением сил связи молекул воды в макрообъеме воды (силы когезии) и сил связи молекул поверхности воды с поверхностью целлюлозы (силы адгезии) [Пчелин, 1976]. Смачивание гидрофильное определяется силами адгезии – физическими, физико-химическими, химическими и электростатическими, превалирующими над силами когезии. Этот вид смачивания характерен для гидрофильных поверхностей. Гидрофобное смачивание проявляется обволакиванием водой гидрофобных групп, участков и поверхности в целом. Оно обусловливается действием сил когезии, превышающих силы адгезии, и наблюдается на гидрофобных поверхностях [Сумм, Горюнов, 1976]. Количественной характеристикой «смачивания-несмачивания» или мерой гидрофильно-гидрофобного состояния поверхности является «краевой угол смачивания», обозначаемый  $\theta$ . В реальных объектах явление «смачивания-несмачивания» наблюдается в виде определенного поведения воды по поверхности. Наглядно возможные варианты поведения воды – различные по виду и величине эффекты смачивания поверхности и характеризуемые их углы  $\theta$  представлены на рис. 1.

Как видно на рис. 1, максимально впитывать воду целлюлозный композит может при условии  $\theta = 0^\circ$ , т. е., при полном смачивании. Целлюлоза техническая товарная, в силу природного происхождения, является гидро-

фильтральным материалом, и для нее характерно состояние поверхности с пределами смачивания, соответствующими условию  $0^\circ < \theta < 90^\circ$ . Оно определяется химическим составом, морфологическим строением и поверхностными свойствами целлюлозного волокна [Структура..., 2014]. Учитывая, что целлюлозное волокно является твердым, многокомпонентным, молекулярно неоднородным, капиллярно-пористым физическим телом с высокоразвитой системой межмолекулярных водородных связей, внутримолекулярных и поверхностных реакционно-активных гидрофильных функциональных групп, прежде всего, гидроксильных, оно поддается изменению плотности гидроксильных групп технологическими факторами [Гораздова и др., 2018]. Следовательно, технологические факторы позволяют управлять (повышать или понижать) количеством гидроксильных групп и, в целом, управлять поглощением и удержанием воды целлюлозным композитом.

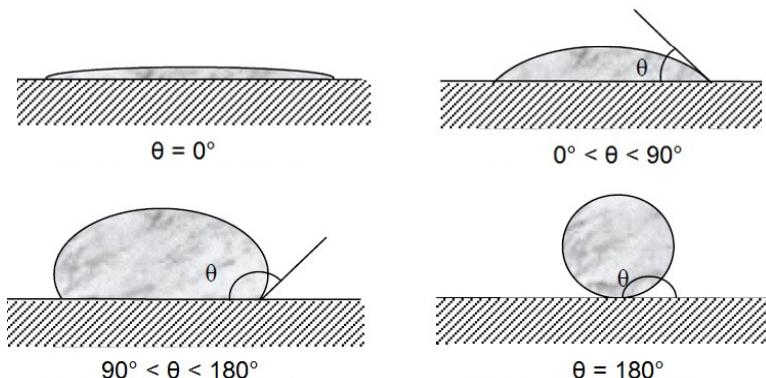


Рис. 1. Варианты смачивания поверхности с различной мерой гидрофильно-гидрофобного состояния:  $\theta = 0^\circ$  – полное смачивание (растекание) воды (высокая гидрофильность);  $0^\circ < \theta < 90^\circ$  – ограниченное смачивание;  $90^\circ < \theta < 180^\circ$  и  $\theta = 180^\circ$  – полное несмачивание

Fig. 1. Options for surface wetting with different degrees of hydrophilic-hydrophobic state:  $\theta = 0^\circ$  – complete wetting (spreading) of water (high hydrophilicity);  $0^\circ < \theta < 90^\circ$  – limited wetting;  $90^\circ < \theta < 180^\circ$  and  $\theta = 180^\circ$  – complete non-wetting

Повышение количества гидроксилов сопровождается повышением гидрофильности (гидрофилизации) внутренней и внешней поверхности волокна и приращением массы присоединяемых молекул воды в процессе гидратации волокна. По мере увеличения эффекта «гидрофилизации» поверхности смачивание стремится к пределу, удовлетворяющему условию

$\theta = 0^\circ$ . Смачивание, а, следовательно, водопоглощение приближается к максимуму. Процесс смачивания протекает в тонкой прослойке (микропленке) воды у поверхности целлюлозы (целлюлозных фибрill) и проявляется изменением физических свойств воды на расстояниях до 1 мкм (1000 нм).

Таким образом, мы кратко рассмотрели один из основных механизмов водопоглощения, связанный с явлением смачивания поверхности целлюлозного волокна водой, как функцию ее гидрофильности. Не менее важным является механизм водопоглощения, связанный с явлением «капиллярность». Капиллярность, как явление подъема или опускания воды в капиллярах, вследствие искривления поверхности воды на границе раздела фаз поверхностным натяжением, имеет первостепенное значение для движения воды в капиллярно-пористом теле [Пчелин, 1976; Сумм, Горюнов, 1976]. Целлюлозное волокно и целлюлозные материалы из него имеют высокоразвитую гетерогенную капиллярно-пористую структуру. Различают материалы микропористые (диаметр пор менее 2 нм), мезопористые (диаметр пор 2–50 нм) и макропористые (диаметр пор более 50 нм). Целлюлозе и целлюлозным материалам характерны все виды пористости, которые легко трансформируются друг в друга под действием многих факторов. Особенностью капиллярно-пористой структуры, имеющей принципиальное значение для водопоглощения, является наличие полостей в волокнах, связанных с внешней образующей стенок волокна [Химия..., 1982]. При диаметре целлюлозного волокна, например, 20–40 мкм, диаметр полостей 6–10 мкм [Фенгел и др, 1988], оно может быть отнесено к мезопористым материалам.

Рассмотренное выше явление смачивания тесно связано с явлениями «поверхностное натяжение» и «капиллярность». В случае целлюлозы и целлюлозных материалов явление смачивания осуществляется на границе контакта трех фаз – целлюлоза (твердая фаза), вода (жидкая фаза), воздух (газовая фаза) – и описывается в стационарном режиме в точке контакта на «периметре смачивания» балансом действующих сил поверхностного натяжения –  $\sigma_{\text{TB}}$ ,  $\sigma_{\text{TЖ}}$ ,  $\sigma_{\text{ЖВ}}$ . Количественная мера смачивания –  $\theta$ , определяется из закона Юнга [Воюцкий, 1975]

$$\sigma_{\text{TB}} = \sigma_{\text{TЖ}} + \sigma_{\text{ЖВ}} \cos \theta, \quad (1)$$

откуда получаем значение  $\cos \theta$ :

$$\cos \theta = (\sigma_{\text{TB}} - \sigma_{\text{TЖ}}) / \sigma_{\text{ЖВ}}. \quad (2)$$

Уравнение (2) позволяет оценить влияние  $\theta$  на гидрофильно-гидрофобное состояние поверхности смачивания, или, иначе, по величине  $\theta$  можно определить фактически достижимую массу поглощаемой воды.

Имеют место следующие варианты:

- а)  $\theta = 0^\circ$ ,  $\cos \theta = 1$ ,  $\sigma_{\text{TB}} = \sigma_{\text{ТЖ}}$ ; экспериментально  $\theta$  не определяется, равновесие сил не достигается; имеет место абсолютное гидрофильное смачивание поверхности, вода по ней растекается и быстро впитывается;
- б)  $90^\circ > \theta > 0^\circ$ ,  $0 < \cos \theta < 1$ ,  $\sigma_{\text{TB}} > \sigma_{\text{ТЖ}}$ ; по мере увеличения  $\theta$  снижается  $\sigma_{\text{ТЖ}}$ , усиливается ограничение смачиванию поверхности, вплоть до  $\theta = 90^\circ$ ;
- в)  $\theta = 90^\circ$ ,  $\cos \theta = 0$ ; наступает предел гидрофильного смачивания поверхности, вода не «ползет» по поверхности и практически не впитывается материалом;
- г)  $\theta > 90^\circ$ ,  $\cos \theta < 0$ ;  $\sigma_{\text{TB}} < \sigma_{\text{ТЖ}}$ ; поверхность гидрофобная, не смачивается водой, впитывание воды полностью отсутствует.

Смачивание посредством сил поверхностного натяжения осуществляется подъем воды по капиллярам в капиллярно-пористых телах. На гидрофильной поверхности адгезия воды к целлюлозе больше сил когезии воды в макрообъеме капилляра, и вода под действием силы  $\sigma_{\text{TB}}$  поднимается («затягивается») по капилляру вверх. В этом процессе поверхность воды искривляется с образованием вогнутого мениска с определенным средним радиусом кривизны  $r$ . Мениск представляет собой пленку воды, разделяющую воду и воздух, а силы, образующие мениск, создают разницу давлений под и над мениском. Эта дополнительная сила называется капиллярным давлением –  $P_K$ . Она возникает только при средних радиусах капилляров, когда вся поверхность воды искривляется с образованием вогнутого сферического мениска. Условие соблюдается при  $r$ , сопоставимых с диаметрами капилляров, имеющих пределы 0,5–15 мкм.

Учитывая большой интервал целлюлозных материалов по среднему диаметру капилляров: микропористые  $< 2$  нм; мезопористые 2–50 нм и макропористые  $> 50$  нм, – в исследовании стремились создавать гетерогенную капиллярно-пористую структуру со средним диаметром пор 0,5–15 нм. В гидрофильных капиллярах  $P_K$  поднимает, а в гидрофобных капиллярах опускает воду на определенную высоту  $h$ . Величина  $P_K$  определяется законом Лапласа [Сумм, Горюнов, 1976]:

$$P_K = 2\sigma_{\text{ЖВ}}/r. \quad (3)$$

Выразим радиус кривизны мениска  $r$  через средний радиус капилляра  $R$ ;  $r = R/\cos \theta$ , тогда уравнение (3) примет вид

$$P_K = 2\sigma_{\text{ЖВ}}\cos\theta/R. \quad (4)$$

Из закона следует, что для увеличения  $P_K$  необходимо повышать  $\sigma_{\text{ЖВ}}$ , увеличивать гидрофильность (уменьшение  $\theta$ ) и уменьшать средний ради-

ус капилляра  $R$ . Учитывая, что испытание целлюлозного композита на водопоглощение осуществляется полным погружением в воду, подобно реальному использованию СГИ, движение воды по капиллярно-пористой структуре направлено одновременно во всех направлениях, и сложно выделить превалирующее направление движения воды. Однако вне зависимости от направления движения воды, скорость движения по капиллярам, масса впитываемой воды и ее удержание будут определяться следующими факторами:

- а) повышением поверхностного натяжения на границе «жидкость-воздух» –  $\sigma_{жв}$ , как функции гидрофильности целлюлозных компонентов структуры композита; чем выше гидрофильность (стремление угла  $\theta$  к «0»), тем быстрее и полнее вода впитывается в композит;
- б) понижением среднего радиуса капилляров –  $R$  (стремление  $R$  от 15 к 0,5 нм), как функции микропористости целлюлозного композита за счет компонентного состава по волокну, его обработки и формования композита в процессах технологии; чем меньше  $R$  и выше гидрофильность, тем быстрее и полнее вода впитывается в композит.

Количественной оценкой движения воды по капилляру может быть длина пути  $L$ , пройденная водой по капилляру со средним радиусом  $R$ . Если принять направление движения воды вверх, то для этого варианта длина  $L$  будет характеризовать высоту подъема воды. Сила, обуславливающая подъем воды на высоту  $P_L$ , уравновешивается весом воды  $P_B$ . Тогда в точке максимального подъема воды

$$P_L = P_B . \quad (5)$$

Подставив соответствующие значения в уравнение, получим

$$L = N \cdot \cos \theta / R = 1,5 \cdot 10^{-5} \cdot \cos \theta / R \quad (6)$$

Согласно уравнению (6) длина пути воды в капилляре прямо пропорциональна гидрофильному смачиванию поверхности капилляров водой и обратно пропорциональна среднему радиусу капилляра. Иными словами, чем выше гидрофильность поверхности капилляров и меньше их радиус, тем быстрее и большую длину  $L$  проходит вода в капиллярах. Поскольку величины в уравнении (6) измеримы, то по нему можно оценивать скорость движения воды и ее массу.

Отметим, что уравнение (6) описывает движение воды по капиллярам вверх. Скорость движения воды, например, вниз будет иной, так как силы  $P_L$  и  $P_B$  будут действовать в одном направлении, а, следовательно, сумми-

роваться. Движение воды во множестве иных направлений будет определяться соотношением сил  $P_L$  и  $P_B$ . Множество векторов движения воды в капиллярно-пористой структуре целлюлозного композита толщиной 0,9-1,1 мм не позволяет дифференцировать и количественно описать все варианты. Поэтому оценка водопоглощения в г  $H_2O$  на г целлюлозного композита в исследовании велась по приросту поглощенной воды за 1, 5 и 10 минут при полном погружении образца в воду.

В труде [Лаврентьев, 2023] дана теоретическая оценка пористости целлюлозного композита как главного фактора водопоглощения. Показано, что пористость, например, для образцов массой 1  $m^2$  = 650 г и толщиной, мм: 0,9; 1,0; 1,1, при плотности, кг/ $m^3$ : 722; 650; 591, соответственно, равна, %: 52; 57; 61. При погружении образцов в воду воздух вытесняется и пустоты заполняются водой. С высокой вероятностью можно принять количество впитываемой воды равным объему пустот. Тогда удельное водопоглощение,  $B$ , определяется уравнением

$$B = 1500 \cdot \Pi_K / 100, \text{ кг}/m^3, \quad (7)$$

где 1500 – плотность абсолютно сухого вещества целлюлозы, кг/ $m^3$ ;  $\Pi_K$  – пористость композита, %;

Применяя уравнение (7), получим значения  $B$ , кг/ $m^3$ : 780; 855; 915, что соответствует 1,08; 1,32 и 1,55 г/г а.с. композита. Таким образом, теоретически водопоглощение целлюлозного композита из целлюлозы сульфатной беленой из хвойной древесины по ГОСТ 9571-89 без повышения гидрофильности не достигает величины 4-5 г/г, свойственной лучшим импортным продуктам.

Таким образом, решение актуальной задачи – достижение удельного водопоглощения СГИ на уровне импортных образцов или выше для успешного их импортозамещения отечественными изделиями, – находится в области усовершенствования технологии – это повышение гидрофильности целлюлозных компонентов и микропористости целлюлозного композита. Объектами решения задачи являются степень помола целлюлозы, °ШР, и компонентный состав по волокну – целлюлоза сульфатная беленая из хвойной древесины по ГОСТ 9571-89 и целлюлоза сульфатная беленая из лиственной древесины ГОСТ 14940-96.

#### *Выводы.*

1. Гидрофильность целлюлозы определяет явление смачивания водой и развитие сил поверхностного натяжения на границе целлюлоза-вода-

воздух. Повышение гидрофильности целлюлозы ведет к увеличению водопоглощения.

2. Капиллярное давление, вызываемое гидрофильностью и силами поверхностного натяжения, проявляется в движении воды по капиллярно-пористой структуре целлюлозного композита. С увеличением гидрофильности целлюлозы и снижением среднего диаметра капилляров возрастает водопоглощение.

3. Расчет удельного водопоглощения целлюлозного композита из целлюлозы сульфатной беленой из хвойной древесины по ГОСТ 9571-89 АО «Архангельский ЦБК» без повышения гидрофильности показал значения много ниже чем у импортных образцов.

4. Решение задачи повышения удельного водопоглощения до требуемого уровня достигается технологическими факторами – степенью помола целлюлозы и компонентным составом по волокну целлюлозного композита.

*Конфликт интересов.* Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### **Библиографический список**

*Аким Г.Л. и др.* Технология целлюлозно-бумажного производства. Справочные материалы. В 3-х т. Т. 1. Сырье и производство полуфабрикатов. Ч. 2. Производство полуфабрикатов. СПб.: Политехника, 2003. 633 с.

*Воюцкий С.С.* Курс коллоидной химии. Изд. 2-е, пер. доп. М.: Химия, 1975. 155 с.

*Гораздова В.В., Дернова Е.В., Дулькин Д.А., Окулова Е.О.* Влияние фибрillирования и укорочения волокон при размоле на характеристики прочности, деформативности и трещиностойкости целлюлозных материалов // ИВУЗ. Лесной журнал. 2018. № 2. С. 262–265.

*Дубовый В.К. и др.* Лабораторный практикум по технологии бумаги и картона: учебное пособие для студентов вузов. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. 229 с.

*Лаврентьев И.В.* Влияние пористости целлюлозного материала на абсорбцию воды сердцевинным слоем одноразовых санитарно-гигиенических изделий // Актуальные вопросы лесного хозяйства : матер. 7 Междунар. молодежной научн.-практ. конф. СПб., 9-10 ноября 2023 г. С. 31–34.

*Осипов П.С. и др.* Технология целлюлозно-бумажного производства. Справочные материалы. В 3 т. Т. 1. Ч. 1. Сырье и производство полуфабрикатов. СПб.: ЛТА, 2002. 420 с.

*Пузырев С.С. и др.* Технология целлюлозно-бумажного производства. Справочные материалы. В 3 т. Т. 1. Сырье и производство полуфабрикатов. Ч. 3. Производство полуфабрикатов. СПб.: Политехника, 2004. 316 с.

*Пчелин В.А.* Гидрофобное взаимодействие в дисперсных системах. М.: Знание, 1976. 64 с.

*Структура и физико-химические свойства целлюлоз и нанокомпозитов на их основе /* под ред. Л.А. Алешин, В.А. Гуртова, Н.В. Мелех. Петрзаводск: Изд-во ПетрГУ, 2014. 240 с.

*Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В.* Физико-химические основы смачивания и растекания. М.: Химия, 1976. 232 с.

*Фенгель Д., Вегенер Г.* Древесина (химия, ультраструктура, реакции): пер. с англ. Предисл. А.А. Леонович / под ред. д-ра техн. наук проф. А.А. Леоновича. М.: Лесн. пром-сть, 1988. 512 с.

*Химия древесины /* пер. с финск. Р.В. Заводова, под ред. М.А. Иванова. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 400 с.

### References

*Akim G.L. et al.* Texnologiya cellyulozno-bumazhnogo proizvodstva. Spravochny'e materialy'. V 3 t. Vol. 1. Sy'r'e i proizvodstvo polufabrikatov. Ch.2. Proizvodstvo polufabrikatov. SPb.: Politexnika, 2003. 633 p. (In Russ.)

*Dubovyy V.K. et al.* Laboratorny'j praktikum po texnologii bumagi i kartona: uchebnoe posobie dlya studentov vuzov. SPb.: Izd-vo Politexn. un-ta, 2006. 229 p. (In Russ.)

*Fengel D., Vegener G.* Drevesina (ximiya, ul'trastruktura, reakcii): per. s angl. Predisl. A.A. Leonovich / pod red. d-ra texn. nauk prof. A.A. Leonovicha. M.: Lesn. prom-st', 1988. 512 p. (In Russ.)

*Gorazdova V.V., Dernova E.V., Dul'kin D.A., Okulova E.O.* Vliyanie fibrillirovaniya i ukorocheniya volokon pri razmole na xarakteristiki prochnosti, deformativnosti i treshhinostojkosti cellyulozny'x materialov. IVUZ. Lesnoj zhurnal, 2018, no. 2, pp. 262–265. (In Russ.)

*Khimiya drevesiny':* per. s finskogo R.V. Zavodova; pod red. M.A. Ivanova. M.: Lesn. prom-st', 1982. 400 p. (In Russ.)

*Lavrent'ev, I.V.* Vliyanie poristosti cellyuloznogo materiala na absorbciyu vody' serdcevinny'm sloem odnorazovyyx sanitarno-gigienicheskix izdelij. Aktual'ny'e voprosy' lesnogo xozyajstva: mater. 7 Mezhdunar. molodezhnoj nauchn.-prakt. konf. SPb., 9–10 noyabrya 2023, pp. 31–34. (In Russ.)

*Osipov P.S. et al.* Texnologiya cellyulozno-bumazhnogo proizvodstva. Spravochny'e materialy'. V 3 t. Vol. 1. Ch.1. Sy'r'e i proizvodstvo polufabrikatov. SPb.: LTA, 2002. 420 p. (In Russ.)

*Pchelin V.A.* Gidrofobnoe vzaimodejstvie v dispersny'x sistemax. M.: Znanie, 1976. 64 p. (In Russ.)

*Puzy'rev S.S. et al.* Texnologiya cellyulozno-bumazhnogo proizvodstva. Spravochny'e materialy'. V 3-x t. Vol. 1. Sy'r'e i proizvodstvo polufabrikatov. Ch.3. Proizvodstvo polufabrikatov. SPb.: Politexnika, 2004. 316 p. (In Russ.)

Struktura i fiziko-ximicheskie svojstva cellyuloz i nanokompozitov na ix osnove / pod red. L.A. Aleshin, V.A. Gurtova, N.V. Melex. Petrozavodsk: Izd-vo PetrGU, 2014. 240 p. (In Russ.)

*Summ B.D., Goryunov Yu.V. Fiziko-ximicheskie osnovy' smachivaniya i rastekaniya. M.: Ximiya, 1976. 232 p. (In Russ.)*

*Voyuczkij S.S. Kurs kolloidnoj ximiij/ S.S. Voyuczkij. Izd. 2-e, per. dop. M.: Ximiya, 1975. 155 p. (In Russ.)*

*Материал поступил в редакцию 01.02.2024*

---

**Лаврентьев И.В., Дубовый В.К., Симонова Е.И.** Гидрофилизация как фактор повышения водопоглощения целлюлозного композита // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 249. С. 285–296. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.285-296

Рост потребления одноразовых санитарно-гигиенических изделий (памперсы, пеленки, простыни, прокладки) требует развития науки и производства целлюлозных материалов для их изготовления. Водопоглощение – это один из важнейших показателей для санитарно-гигиенической продукции. Рассмотрены теоретические представления о возникновении, развитии и управлении гидрофильностью целлюлозы. Кратко рассмотрены механизмы водопоглощения, выделены основные из них – смачивание и капиллярность. Сделан расчет удельного водопоглощения целлюлозного композита из целлюлозы сульфатной беленой из хвойной древесины по ГОСТ 9571-89 АО «Архангельский ЦБК». Показано, что у исследуемой целлюлозы водопоглощение много ниже чем у импортных образцов, поэтому исследования в области повышения гидрофильности целлюлозы, обладают высоким потенциалом и практической значимостью. Рассмотрены главные факторы повышения водопоглощения – это повышение гидрофильности целлюлозы за счет размола и использование разного волокна для формирования целлюлозного композита. Показано, что довести показатель водопоглощения до требуемого уровня импортных производителей 4-5 г/г возможно регулированием технологических факторов.

**Ключевые слова:** целлюлоза, смачивание, гидрофильность, поверхностное натяжение, целлюлозный композит, водопоглощение, капиллярное давление, капилляр, санитарно-гигиенические изделия, размол.

**Lavrentyev I.V., Duboviy V.K., Simonova E.I.** Enhancing Water Absorption in Cellulosic Composites through Hydrophilization. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 249, pp. 285–296 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.285-296

The growing consumption of disposable sanitary products (diapers, diapers, sheets, pads) requires the development of science and the production of cellulose materials for their manufacture. Water absorption is one of the most important indicators for sanitary products. The theoretical concepts of the origin, development and management of cellulose hydrophilicity are considered. The mechanisms of water absorption are briefly considered, the main ones are identified – wetting and capillarity. The calculation of the specific water absorption of a cellulose composite made of bleached sulfate cellulose from coniferous wood according to GOST 9571-89 of Arkhangelsk Pulp and Paper Mill JSC was made. It is shown that the water absorption of the cellulose under study is relatively much lower than imported samples, therefore, research in the field of increasing the hydrophilicity of cellulose has high potential and practical significance. The main factors of increasing water absorption are considered – an increase in the hydrophilicity of cellulose due to grinding and the use of different fibers for formation of a cellulose composite. It is shown that the water absorption index to the required level of imported manufacturers 4-5 g/g can be achieved by regulating technological factors.

**Keywords:** cellulose, wetting, hydrophilicity, surface tension, cellulose composite, water absorption, capillary pressure, capillary, sanitary-hygienic products, fiberization.

---

**ЛАВРЕНТЬЕВ Игорь Владимирович** – аспирант кафедры технологии бумаги и картона Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна.

198095, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: supersmesi@mail.ru

**LAVRENTYEV Igor V.** – PhD student of the Department of Paper and Cardboard Technology at the Higher School of Technology and Energy of the St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design.

198095. Ivan Chernykh str. 4. St. Petersburg. Russia. E-mail: supersmesi@mail.ru

**ДУБОВЫЙ Владимир Климентьевич** – профессор кафедры технологии бумаги и картона Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, кандидат технических наук.

198095, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: dubovy2004@mail.ru

**DUBOVYI Vladimir K.** – DSc (Technical), Professor of the Department of Paper and Cardboard Technology at the Higher School of Technology and Energy of the St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design.

198095. Ivan Chernykh str. 4. St. Petersburg. Russia. E-mail: dubovy2004@mail.ru

**СИМОНОВА Елена Игоревна** – доцент кафедры технологии бумаги и картона Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, кандидат технических наук.

198095, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: bliznyakova1989@mail.ru

**SIMONOVA Elena I.** – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Paper and Cardboard Technology at the Higher School of Technology and Energy of the St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design.

198095. Ivan Chernykh str. 4. St. Petersburg. Russia. E-mail: bliznyakova1989@mail.ru

**А.А. Александров, К.С. Момзякова, Т.Р. Дебердеев, А.В. Канарский,  
Р.Я. Дебердеев, Т.А. Ямашев, З.А. Канарская**

## **ПОЛУЧЕНИЕ МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ ТРЕСТЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНОПЛИ**

*Введение.* Целлюлоза – полимерная природная основа материалов, которые используются практически во всех сферах промышленности (легкая, нефтяная, медицинская промышленность и т. д.). Дефицит качественной хлопковой целлюлозы, которая является импортным продуктом, на сегодняшний день является одной из важнейших проблем. В связи с этим в отечественных научных лабораториях проводятся исследования по выделению целлюлозы из альтернативных источников сырья, таких как конопля, лен и др. [Александров и др., 2021; Александров и др., 2020; Момзякова и др., 2021; Валишина и др., 2015; Марченко и др., 2017; Вурако и др., 2010; Денисова и др., 2017; Пен и др., 2015].

Получение целлюлозы из технической конопли имеет множество преимуществ, среди которых стоит выделить: большой объём ежегодного воспроизведения биомассы; невысокие затраты на её возделывание; высокая урожайность по стеблю; содержание лигнина значительно ниже по сравнению с древесиной; упрощённая делигнификация.

Одним из широко востребованных продуктов переработки целлюлозы является микрокристаллическая целлюлоза. Микрокристаллическую целлюлозу получают различными способами, такими как химический гидролиз целлюлозы, механический размол целлюлозы, термомеханическая деструкция целлюлозы и др., а также их комбинированием. Химический гидролиз целлюлозы до МКЦ является самым распространенным способом получения МКЦ. При этом в качестве гидролизирующего агента используют в основном неорганические сильные кислоты, такие как соляная, серная, азотная и др. МКЦ отличается от других видов целлюлоз низкой степенью полимеризации и высокой степенью кристалличности. При этом в зависимости от способа получения, а также от вида сырья, из которого получают МКЦ, микрокристаллическая целлюлоза может отличаться по своим характеристикам.

Микрокристаллическую целлюлозу в промышленных масштабах получают из хлопковой целлюлозы, древесной сульфатной и сульфитной целлюлоз [Болтовский, 2021; Ахметшин, 2018; Аутлов и др., 2013; Dufresne, 2012]. В лабораториях МКЦ также получают из целлюлоз альтернативных источников, таких как льняная целлюлоза, конопляная целлюлоза и др. В последнее время наблюдаются работы по получению МКЦ из растительных материалов отходов сельского хозяйства (соломы пшеницы, ржи и др.) [Момзякова и др., 2019; Кушнир и др., 2014; Атаканов, 2016].

Актуальнейшей задачей на сегодняшний день является разработка эффективных технологических решений получения МКЦ из возобновляемого растительного сырья отечественного происхождения.

В связи с вышесказанным целью данной работы является получение и исследование микрокристаллической целлюлозы из тресты технической конопли без предварительного разделения на лубяное волокно, костру и механические примеси.

*Экспериментальная часть.* Тресту исследуемых образцов размалывали на дробилке Molot-200, предназначеннной для тонкого измельчения сухих продуктов. Сырьё мелкими партиями подавали в приёмный бункер. После измельчения сырьё через калибровочное сито, обеспечивающее необходимый размер конечного продукта (10-20 мм), попадает в фильтр-мешок. После окончания размола полученную измельчённую тресту технической конопли отправляли на стадию варки (бучения).

Выбор способа варки разрабатывался исходя из полученной массы тресты, представляющей собой смесь измельчённого волокна и костры. Содержание костры в измельчённой растительной смеси  $50\pm5\%$ . Учитывая большое количество костры в исходном сырье и необходимость получения качественной микрокристаллической целлюлозы, а также для избавления от непровара, наиболее целесообразным представляется использовать многостадийную низкотемпературную варку исходного сырья. Многостадийный низкотемпературный способ получения МКЦ из измельчённого стебля конопли состоит из следующих стадий:

- 1 – натронная варка (предгидролиз) исходного измельчённого сырья;
- 2 – варка растительного сырья с раствором пероксида водорода в присутствии молибдата аммония и серной кислоты;

3 – кислотный гидролиз целлюлозы;

4 – отбелка полученной МКЦ.

Нatronная варка измельчённого сырья была проведена с варочным раствором, так называемым белым щёлоком (БЩ). Активной частью белого щелока, используемого в данной работе, является гидроксид натрия (NaOH). Выбор именно такого белого щёлока, по сравнению с сульфатным или сульфитным щёлоком, обусловлен его экологичностью из-за отсутствия соединений серы. Нatronная варка проводилась при температуре 100–160 °С в течение 120 мин. В процессе варки целлюлозы основная масса лигнина и других сопутствующих примесей растворяется в БЩ. Оставшаяся часть растительного материала представляет собой техническую целлюлозу, содержащую некоторое количество примесей.

После нatronной варки целлюлозосодержащего материала получается полупродукт, состоящий из целлюлозы и примесей, основу которого составляет лигнин. Количество лигнина в образцах после стадии нatronной варки представлено в табл. 1.

После окончания варки полученную целлюлозу отфильтровывали, промывали водой и отжимали до остаточной влаги 40–60%. После отжима полупродукт сушили в вытяжном шкафу при комнатной температуре.

Полученный полупродукт исследовали на массовое содержание α-целлюлозы (ГОСТ 595–79), массовое содержание остаточного лигнина (ГОСТ 11960–79).

По литературным данным [Александров и др., 2020; Момзякова и др., 2021] при использовании пероксидно-молибдатной варки лигнин интенсивнее окисляется. Присутствие в варочном растворе пероксида водорода, молибдата аммония и серной кислоты приводит к более полной делигнификации растительного сырья. Растительное сырьё подвергают делигнификации в течение 120 мин при температуре 85–90 °С в растворе пероксида водорода (2,0% масс.) в присутствии серной кислоты (0,5%) и молибдата аммония (1,0%). После окончания варки полученную целлюлозу отфильтровали, промыли водой и отжали до остаточной влаги 40–60%.

Полученный продукт исследовали на массовое содержание α-целлюлозы, массовое содержание остаточного лигнина.

Гидролиз целлюлозы проводили при кипячении в среде 2,5 н. раствора минеральной кислоты, а именно серной и соляной кислот в те-

чение 120 мин. После окончания варки полученную МКЦ отфильтровывали, промывали водой и отжимали до остаточной влаги 40–60%. Полученная МКЦ представляет собой мелкодисперсные частицы кремового цвета.

Для придания окончательных свойств продукт отбеливали. МКЦ отбеливалась при гидромодуле 1:10 и температуре 60–75 °C в течение 60 мин. Состав реакционной смеси:  $\text{H}_2\text{O}_2$  – 1%;  $\text{NaOH}$  – 0,2%.

Полученную МКЦ исследовали на следующие параметры:

- размер частиц (методом ситового анализа);
- степень полимеризации (ГОСТ 25438-82);

• для определения насыпной плотности брали образец микрокристаллической целлюлозы массой 5,0 г и отправляли в мерный цилиндр, который устанавливали на волюметре. В течение 10 минут навеска МКЦ уплотнялась при заданных амплитудах и частоте колебаний. Насыпную плотность рассчитывали по формуле:

$$\rho_n = \frac{m}{V} = \frac{5 \times 10^3}{V}, \quad (1)$$

где  $\rho_n$  – насыпная плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $m$  – масса сыпучего материала, кг;  $V$  – объём порошка в цилиндре после уплотнения,  $\text{м}^3$ .

• для определения водородного показателя водного экстракта из МКЦ образец микрокристаллической целлюлозы массой 1 г диспергирували в 100 мл дистиллированной воды, доводили нагреванием до 100 °C, выдерживали в течение 60 мин, затем охлаждали, центрифугировали при 7000 об./мин. В фугате определяли pH на приборе 150 МИ при температуре 25 °C.

Значение белизны определяли по ГОСТ Р ИСО 11475-2022.

*Результаты исследования.* Способы получения и характеристики исследуемых образцов МКЦ приведены ниже.

При разных технологических режимах натронной варки измельчённой тресты конопли были получены 4 образца. Отличия в технологических режимах представлены ниже:

- №1:  $\text{NaOH}$  – 2% масс., Т варки – 100 °C;
- №2:  $\text{NaOH}$  – 2% масс., Т варки – 160 °C;
- №3:  $\text{NaOH}$  – 4% масс., Т варки – 100 °C;
- №4:  $\text{NaOH}$  – 4% масс., Т варки – 160 °C;

Характеристики полученных образцов из тресты технической конопли после натронной варки приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Характеристики полуцеллюлоз из измельчённой тресты конопли**

**Characteristics of semi-celluloses from crushed hemp trust**

| Характеристика полуцеллюлозы           | Образец №: |      |      |      |
|--|------------|------|------|------|
|  | 1          | 2    | 3    | 4    |
| Содержание $\alpha$ -целлюлозы, % масс | 93,5       | 93,3 | 93,0 | 93,5 |
| Содержание лигнина, % масс             | 5,6        | 4,8  | 5,0  | 4,5  |
| Выход, %                               | 52,0       | 46,3 | 50,3 | 45,2 |

Как следует из табл. 1, по основным характеристикам выделенные образцы полуцеллюлозы отличаются незначительно. По содержанию  $\alpha$ -целлюлозы лучшими образцами являются образцы под номером 1 и 4, а по содержанию остаточного лигнина – образец № 4. Но по выходу самым лучшим образцом является образец № 1. Полученные образцы полуцеллюлозы №1 и №2 (выбраны целлюлозы, при получении которых расходовалось меньше щелока на стадии натронной варки) подверглись каталитической делигнификации, описанной выше. Характеристики полученных образцов из тресты технической конопли после каталитической делигнификации приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Характеристики целлюлоз из тресты технической конопли**

**Characteristics of cellulose from industrial hemp trusts**

| Характеристика целлюлозы               | Образец №: |      |
|--|------------|------|
|  | 1          | 2    |
| Содержание $\alpha$ -целлюлозы, % масс | 91,5       | 90,8 |
| Содержание лигнина, % масс             | 0,5        | 0,2  |

Как следует из табл. 2, по основным характеристикам выделенные образцы целлюлозы различаются. Повышение температуры на стадии натронной варки способствует лучшему удалению лигнина, но при этом ухудшает показатель  $\alpha$ -целлюлозы.

Полученные целлюлозы после второй стадии подверглись кисловке для получения МКЦ. Режимы кисловки представлены ниже:

- образец А:  $\text{HCl}$  – 2,5 н., Т натронной варки первой стадии – 100 °C;
- образец Б:  $\text{H}_2\text{SO}_4$  – 2,5 н., Т натронной варки первой стадии – 100 °C;
- образец В:  $\text{H}_2\text{SO}_4$  – 2,5 н., Т натронной варки первой стадии – 160 °C;

Характеристики полученных образцов МКЦ из трессы технической конопли приведены в табл. 3.

Как следует из данных, представленных в табл. 3, кисловка раствором серной кислоты уменьшает степень полимеризации МКЦ из технической конопли на 55–60 единиц ниже, чем кисловка раствором соляной кислоты. Из этого можно сделать вывод, что раствор серной кислоты разрушает аморфные области у целлюлозы из трессы технической конопли лучше. Увеличение температуры при натронной варке, при одинаковых режимах на других стадиях (образцы Б и В) ухудшает белизну. Кисловка трессы технической конопли раствором серной кислотой оказывается на увеличении насыпной плотности конечного продукта больше, чем кисловка в растворе соляной кислоты.

Таблица 3

#### Характеристики полученных образцов микрокристаллической целлюлозы

#### Characteristics of the obtained microcrystalline cellulose samples

| Характеристика МКЦ                    | Образец № |       |       |
|---------------------------------------|-----------|-------|-------|
|                                       | А         | Б     | В     |
| Размер частиц 100–200 мкм, %          | 81,1      | 79,2  | 78,9  |
| Размер частиц 50–100 мкм, %           | 13,9      | 16,1  | 16,5  |
| Размер частиц менее 50 мкм, %         | 5,0       | 4,7   | 4,6   |
| Степень полимеризации                 | 380       | 320   | 325   |
| pH                                    | 6,3       | 6,5   | 6,5   |
| Потери при высушивании (влажность), % | 3,6       | 3,8   | 3,8   |
| Насыпная плотность, г/мл              | 0,28      | 0,37  | 0,32  |
| W10 Белизна                           | 82,50     | 83,59 | 67,97 |

*Выходы.* По основным характеристикам выделенные после натронной варки образцы полуцеллюлозы отличаются незначительно. При этом по-

вышение температуры на стадии натронной варки способствует лучшему удалению лигнина, но ухудшает показатель  $\alpha$ -целлюлозы на стадии катализитической делигнификации.

Полученная кисловкой раствором серной кислоты МКЦ на основе тросты технической конопли по степени полимеризации на 55–60 единиц ниже, чем МКЦ, полученная кисловкой раствором соляной кислоты. Из этого можно сделать вывод, что раствор серной кислоты разрушает аморфные области у целлюлозы из тросты технической конопли лучше. МКЦ из полупродукта тросты технической конопли, полученная с использованием более высоких температур при натронной варке, при одинаковых режимах на других стадиях (образцы Б и В) характеризуется более низкой белизной, из чего можно сделать вывод, что более оптимальным технологическим режимом получения МКЦ из тросты технической конопли является низкотемпературная натронная варка на начальной стадии. МКЦ из тросты технической конопли, полученная гидролизом в серной кислоте, характеризуется более высокой насыпной плотностью, чем МКЦ из тросты технической конопли, полученная кисловкой в растворе соляной кислоты.

*Конфликт интересов.* Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### **Библиографический список**

*Александров А.А., Валишина З.Т., Момзякова К.С., Дебердеев Т.Р., Ямашев Т.А., Канарский А.В., Дебердеев Р.Я.* Сравнительный анализ способов получения целлюлозы из конопляного волокна и оценка ее качества // Вестник Технологического университета. 2021. Т. 24. № 8. С. 42–45.

*Александров А.А., Печеный Е.А., Нуриев Н.К., Момзякова К.С., Дебердеев Р.Я., Валишина З.Т.* Оптимизация фазы делигнификации при выделении целлюлозы из тросты конопли натронным способом // Вестник Технологического университета. 2020. Т. 23. № 11. С. 34–37.

*Атаманов А.А.* Получение, структура, свойства и технология производства хлопковой микрокристаллической и наноцеллюлозы: автореф. дисс. ... канд. хим. наук. Ташкент. 2016. 32 с.

*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.

*Ахметшин И.Р.* Получение микрокристаллической целлюлозы из лигноцеллюлозного материала, активированного паровзрывной обработкой: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / КНИТУ. Казань, 2018. 16 с.

Болтовский В.С. Применение метода автогидролиза-взрыва при переработке растительной биомассы // Труды БГТУ серия 2. 2021. 1. С. 40–50.

Валишина З.Т., Александров А.А., Матухин Е.Л., Храмова Е.В., Косточки А.В. Целлюлоза на основе альтернативных источников отечественного сырья: целлюлоза из пенькового волокна // Вестник Технологического университета. 2015. Т. 18. № 2. С. 259–262.

Вуракко А.В., Минакова А.Р., Дрикер Б.Н., Сиваков В.П., Косачева А.М. Технология получения целлюлозы из недревесного растительного сырья // Химия растительного сырья. 2010. № 2. С. 165–168.

Денисова М.Н., Кухленко А.А., Паевов И.Н. Исследование влияния параметров гидротропной делигнификации на физико-химические характеристики целлюлозы из шелухи овса // Ползуновский вестник. 2017. № 2. С. 95–98.

Кушнир Е.Ю., Аутлов С.А., Базарнова Н.Г. Получение МКЦ непосредственно из древесины под воздействием микроволнового излучения // Химия растительного сырья. 2014. № 2. С. 41–45.

Марченко Г.Н., Нугманов О.К., Шакиров Р.И., Дебердеев Р.Я. Структурно-химические свойства целлюлозы и её аналогов. Новые источники сырья, методы их переработки. Казань: Печать-Сервис-XXI век, 2017. 293 с.

Момзякова К.С., Дебердеев Т.Р., Александров А.А., Печений Е.А., Нуриев Н.К., Ямашев Т.А., Канарский А.В., Дебердеев Р.Я. Управление яркостью травянистой целлюлозы на стадии её отбелки // Вестник Технологического университета. 2021. Т. 24. № 2. С. 49–55.

Момзякова К.С., Дебердеев Т.Р., Валишина З.Т., Шинкарёв А.А., Дебердеев Р.Я., Ибрагимов А.В. Получение, структура, свойства микрокристаллической и наноцеллюлозы из хлопка // Химическая промышленность. 2019. № 6. С. 22–26.

Пен Р.З., Картникова Н.В., Вишкова И.А., Шапиро И.Л. Свойства пероксидной целлюлозы из однолетних растений. 7. Отбелка целлюлозы из однолетних растений // Химия растительного сырья. 2015. № 2. С. 37–42.

Dufresne A. Nanocellulose from nature to High Performance Tailored Materials. Berlin. Germany. 2012. 477 p.

## References

Akhmetshin I.R. Preparation of microcrystalline cellulose from lignocellulose material activated by steam explosion treatment: abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical sciences / KNRTU. Kazan. 2018. 16 p. (In Russ.)

Aleksandrov A.A., Pechenyi E.A., Nuriev N.K., Momzyakova K.S., Deberdeev R.Ya., Valishina Z.T. Optimization of the delignification phase when isolating cellulose from hemp trust using the soda method. *Bulletin of the Technological University*, 2020, vol. 23, no. 11, pp. 34–37. (In Russ.)

Aleksandrov A.A., Valishina Z.T., Momzyakova K.S., Deberdeev T.R., Yamashev T.A., Kanarsky A.V., Deberdeev R.Ya. Comparative analysis of methods for producing

cellulose from hemp fiber and assessment of its quality. *Bulletin of the Technological University*, 2021, vol. 24, no. 8, pp. 42–45. (In Russ.)

*Atakhanov A.A.* Preparation, structure, properties and production technology of cotton microcrystalline and nanocellulose: abstract of the dissertation for the degree of candidate of chemical sciences. Tashkent. 2016. 32 p. (In Russ.)

*Boltovskiy V.S.* Application of the autohydrolysis-explosion method in the processing of plant biomass. *Proceedings of BSTU*, series 2, 2021, 1, pp. 40–50. (In Russ.)

*Denisova M.N., Kukhlenko A.A., Pavlov I.N.* Study of the influence of hydrodynamic delignification parameters on the physicochemical characteristics of cellulose from oat husks. *Polzunovsky Bulletin*, 2017, no. 2, pp. 95–98. (In Russ.)

*Dufresne A.* Nanocellulose from nature to High Performance Tailored Materials. Berlin, 2012. 477 p.

*Kushnir E.Yu., Outlov S.A., Bazarnova N.G.* Preparation of MCC directly from wood under the influence of microwave radiation. *Chemistry of plant raw materials*, 2014, no. 2, pp. 41–45. (In Russ.)

*Marchenko G.N., Nugmanov O.K., Shakirov R.I., Deberdeev R.Ya.* Structural and chemical properties of cellulose and its analogues. New sources of raw materials, methods of their processing. Kazan: Print-Service-XXI century, 2017. 293 p. (In Russ.)

*Momzyakova K.S., Deberdeev T.R., Aleksandrov A.A., Pecheny E.A., Nuriev N.K., Yamashev T.A., Kanarsky A.V., Deberdeev R.Ya.* Controlling the brightness of grass pulp at the stage of its bleaching. *Bulletin of the Technological University*, 2021, vol. 24, no. 2, pp. 49–55. (In Russ.)

*Momzyakova K.S., Deberdeev T.R., Valishina Z.T., Shinkarev A.A., Deberdeev R.Ya., Ibragimov A.V.* Preparation, structure, properties of microcrystalline and nanocellulose from cotton. *Chemical industry*, 2019, no. 6, pp. 22–26. (In Russ.)

*Outlov S.A., Bazarnova N.G., Kushnir E.Yu.* Microcrystalline cellulose: structure, properties and applications. (review) *Chemistry of plant raw materials*, 2013, no. 3, pp. 33–41. (In Russ.)

*Pen R.Z., Karetikova N.V., Vshivkova I.A., Shapiro I.L.* Properties of cellulose peroxide from annual plants. 7. Bleaching of cellulose from annual plants. *Chemistry of plant raw materials*, 2015, no. 2, pp. 37–42. (In Russ.)

*Valishina Z.T., Aleksandrov A.A., Matukhin E.L., Khramova E.V., Kostochko A.V.* Cellulose based on alternative sources of domestic raw materials: cellulose from hemp fiber. *Bulletin of the Technological University*, 2015, vol. 18, no. 2, pp. 259–262. (In Russ.)

*Vurasko A.V., Minakova A.R., Driker B.N., Sivakov V.P., Kosacheva A.M.* Technology for producing cellulose from non-wood plant raw materials. *Chemistry of plant raw materials*, 2010, no. 2, pp. 165–168. (In Russ.)

**Александров А.А., Момзякова К.С., Дебердеев Т.Р., Канарский А.В.,  
Дебердеев Р.Я., Ямашев Т.А., Канарская З.А.** Получение микрокристаллической  
целлюлозы из тресты технической конопли // Известия Санкт-Петербургской  
лесотехнической академии. 2024. Вып. 249. С. 297–309. DOI: 10.21266/2079-  
4304.2024.249.297-309

Получение микрокристаллической целлюлозы (МКЦ), как одного из широко востребованных продуктов переработки целлюлозы, из альтернативных источников целлюлозосодержащего сырья является актуальной задачей на сегодняшний день. В качестве альтернативного источника микрокристаллической целлюлозы рассматривается техническая конопля, которая имеет ряд преимуществ по сравнению с другим растительным сырьем, таких как большой объём ежегодного воспроизведения биомассы; невысокие затраты на её возделывание; высокая урожайность по стеблю; содержание лигнина значительно ниже по сравнению с древесиной; упрощённая делигнификация. Техническая конопля перед началом варки размалывалась до размеров 10-20 мм. Из-за высокого содержания костры в размолотой технической конопле разработан многостадийный технологический режим получения микрокристаллической целлюлозы. Многостадийный технологический режим получения микрокристаллической целлюлозы состоит из предгидролиза (натронной варки), пероксидно-молибдатной делигнификации, кислотного гидролиза и отбелки. Натронная варка, по сравнению с сульфатной или сульфитной варкой, обусловлена экологичностью из-за отсутствия соединений серы. Пероксидно-молибдатная делигнификация выбрана из-за более полного удаления остаточного лигнина из растительного сырья. Гидролиз полученного полупродукта минеральными кислотами обусловлен тем, что это самый распространенный и доступный способ получения микрокристаллической целлюлозы. Отбелка необходима для придания окончательных свойств, так как полученная МКЦ представляет собой мелкодисперсные частицы кремового цвета. Применение раствора серной кислоты для кислотного гидролиза тресты технической конопли по предлагаемой технологической схеме получения МКЦ приводит к уменьшению степени полимеризации на 55–60 единиц по сравнению с применением раствора соляной кислоты при этой же технологической схеме получения МКЦ. Микрокристаллическая целлюлоза из тресты технической конопли, полученная с использованием более высоких температур при натронной варке, при одинаковых режимах на других стадиях характеризуется более низкой белизной, из чего следует, что более оптимальным технологическим режимом получения МКЦ из тресты технической конопли является применение низкотемпературной натронной варки при начальной стадии.

**Ключевые слова:** целлюлоза, микрокристаллическая целлюлоза, техническая конопля, варка, делигнификация.

**Aleksandrov A.A., Momzyakova K.S., Deberdeev T.R., Kanarsky A.V., Deberdeev R.Ya., Yamashev T.A., Kanarskaya Z.A.** Preparation of microcrystalline cellulose from industrial hemp trusts. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 249, pp. 297–309 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.297-309

The production of microcrystalline cellulose (MCC), as one of the widely popular products of cellulose processing, from alternative sources of cellulose-containing raw materials is a pressing task today. Industrial hemp is considered as an alternative source of microcrystalline cellulose, which has a number of advantages compared to other plant raw materials, such as a large volume of annual biomass reproduction; low costs for its cultivation; high yield per stem; lignin content is significantly lower compared to wood; simplified delignification. Before cooking, industrial hemp was ground to a size of 10-20 mm. Due to the high content of buds in ground industrial hemp, a multi-stage technological regime for the production of microcrystalline cellulose has been developed. The multi-stage technological regime for the production of microcrystalline cellulose consists of pre-hydrolysis (sodium cooking), peroxide-molybdate delignification, acid hydrolysis and bleaching. Soda cooking, compared to sulfate or sulfite cooking, is environmentally friendly due to the absence of sulfur compounds. Peroxide-molybdate delignification was chosen due to the more complete removal of residual lignin from plant materials. Hydrolysis of the resulting intermediate product with mineral acids is due to the fact that this is the most common and accessible method for producing microcrystalline cellulose. Bleaching is necessary to impart final properties, since the resulting MCC is fine, cream-colored particles. The use of a sulfuric acid solution for the acid hydrolysis of industrial hemp trusts according to the proposed technological scheme for the production of MCC leads to a decrease in the degree of polymerization by 55-60 units than the use of a hydrochloric acid solution with the same technological scheme for the production of MCC. Microcrystalline cellulose from industrial hemp trust, obtained using higher temperatures during soda cooking, under the same conditions at other stages is characterized by lower whiteness, which means that the more optimal technological mode for obtaining MCC from industrial hemp trust is the use of low-temperature soda cooking at the initial stages.

**К e y w o r d s :** cellulose, microcrystalline cellulose, industrial hemp, cooking, delignification.

---

**АЛЕКСАНДРОВ Александр Анатольевич** – заведующий лабораторией Казанского национального исследовательского технологического университета.

420015, ул. К. Маркса, д. 68, г. Казань, Республика Татарстан, Россия.  
E-mail: alexananat@gmail.com

**ALEXANDROV Alexander A.** – Head of the Laboratory of the Kazan National Research Technological University.

420015. K. Marks str. 68. Kazan. Republic of Tatarstan. Russia. E-mail: alexananat@gmail.com

**МОМЗЯКОВА Ксения Сергеевна** – лаборант Казанского национального исследовательского технологического университета, кандидат технических наук.

420015, ул. К. Маркса, д. 68, г. Казань, Республика Татарстан, Россия.  
E-mail: ksunya-fadeeva@yandex.ru

**MOMZYAKOVA Ksenia S.** – PhD (Technical), Laboratory Assistant at Kazan National Research Technological University.

420015. K. Marks str. 68. Kazan. Republic of Tatarstan. Russia. E-mail: ksunya-fadeeva@yandex.ru

**ДЕБЕРДЕЕВ Тимур Рустамович** – профессор Казанского национального исследовательского технологического университета, доктор технических наук.

420015, ул. К. Маркса, д. 68, г. Казань, Республика Татарстан, Россия.  
E-mail: deberdeev@mail.ru

**DEBERDEEV Timur R.** – DSc (Technical), Professor of the Kazan National Research Technological University.

420015. K. Marks str. 68. Kazan. Republic of Tatarstan. Russia. E-mail: deberdeev@mail.ru

**КАНАРСКИЙ Альберт Владимирович** – профессор Казанского национального исследовательского технологического университета, доктор технических наук.

420015, ул. К. Маркса, д. 68, г. Казань, Республика Татарстан, Россия.  
E-mail: alb46@mail.ru

**KANARSKY Albert V.** – DSc (Technical), Professor at Kazan National Research Technological University.

420015. K. Marks str. 68. Kazan. Republic of Tatarstan. Russia. E-mail: alb46@mail.ru

**ДЕБЕРДЕЕВ Рустам Якубович** – профессор Казанского национального исследовательского технологического университета, доктор технических наук.

420015, ул. К. Маркса, д. 68, г. Казань, Республика Татарстан, Россия.  
E-mail: rudeberdeev@rambler.ru

**DEBERDEEV Rustam Y.** – DSc (Technical), Professor of the Kazan National Research Technological University.

420015. K. Marks str. 68. Kazan. Republic of Tatarstan. Russia. E-mail: rudeberdeev@rambler.ru

**ЯМАШЕВ Тимур Анварович** – доцент Казанского национального исследовательского технологического университета, кандидат технических наук.

420015, ул. К. Маркса, д. 68, г. Казань, Республика Татарстан, Россия.  
E-mail: yamashev555@mail.ru

**YAMASHEV Timur A.** – PhD (Technical), Associate Professor of Kazan National Research Technological University, Candidate of Technical Sciences.

420015. K. Marks str. 68. Kazan. Republic of Tatarstan. Russia. E-mail: yamashev555@mail.ru

**КАНАРСКАЯ Зоя Альбертовна** – доцент Казанского национального исследовательского технологического университета, кандидат технических наук.

420015, ул. К. Маркса, д. 68, г. Казань, Республика Татарстан, Россия.  
E-mail: zosya\_kanarskaya@mail.ru

**KANARSKAYA Zosya A.** – PhD (Technical), Associate Professor of Kazan National Research Technological University.

420015. K. Marks str. 68. Kazan. Republic of Tatarstan. Russia. E-mail: zosya\_kanarskaya@mail.ru

В.Г. Ермолинский, О.П. Ковалева

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА КАК ИНСТРУМЕНТ  
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ  
ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

*Введение.* Особенности диалектики развития прикладной науки (отрицание отрицания) нашли своё отражение в противостоянии двух научных школ – физико-химии полимеров (ФХП) и физико-химической механики дисперсных структур и материалов (ФХМ). Ведущие специалисты в области производства искусственных волокон и целлюлозно-бумажного производства проводят оценку физико-химических свойств целлюлозы только с позиций ФХП. Однако игнорирование научных положений ФХМ в недалеком прошлом привело к возникновению производственных проблем и даже к закрытию заводов по производству растворимой целлюлозы из-за низкого качества получаемой продукции, а именно, низкой реакционной способности последней. В теоретические основы ФХП легли представления В.А. Каргина [Гликман, 1959] о том, что при обычной температуре равновесным состоянием для целлюлозы является не кристаллическое, а аморфное. Подтверждением этого служили результаты опытов, в которых путем последовательных обработок вискозного волокна щелочью и нагреванием в глицерине при температуре 280 °C с последующей промывкой горячей водой удавалось многократно превращать целлюлозу (Ц-І) в гидратцеллюлозу (Ц-ІІ) и обратно [Гликман, 1959; Забелин и др., 1976].

Установленная В.А. Каргиным обратимость перехода гидратцеллюлозы в целлюлозу Ц-ІV, близкую по структуре Ц-І, а также отрицание поверхности раздела между частичками высокополимера и квазигомогенность мерсеризованных хлопковых волокон позволила С.П. Папкову продекларировать: «широко распространенный в старых работах, подход к системе «целлюлоза-вода», аналогичный подходу к коллоидным системам, в которых основные сорбционные процессы разыгрываются на поверхности и не затрагивают всей массы сорбента, сменяются взглядом на эти системы, как на такие, в которых протекают абсорбционные процессы» [Папков, Файнберг, 1976].

Подобный взгляд на доступность всей массы сорбента для воды и химических реагентов, в том числе и волокон природной целлюлозы, послужил основанием для оценки физико-химических свойств целлюлозы с по-

зии ФХП. При этом созданные в рамках ФХП теоретические основы технологии искусственных волокон должны были гарантировать высокую реакционную способность целлюлозы, предназначеннной для химической переработки. Однако реакционная способность растворимой целлюлозы была утрачена в промышленных условиях при её сушке на пресспите, поскольку, как и в опытах В.А. Каргина, формирование структуры волокон целлюлозы происходит в присутствии воды.

*Экспериментальная часть.* В теоретических основах ФХП воде отводится роль пластификатора, в присутствии которого сухая целлюлоза из застеклованного состояния переводится в высокоэластическое [Ермолинский, Ковалева, 2018]. Наиболее заметное влияние воды прослеживается на аморфизированных образцах целлюлозы, полученных в процессе размоля природных волокон или при высокотемпературной обработке глицерином вискозных волокон. В последнем случае глицерин применяется как эффективный реагент, разрушающий межмолекулярные связи [Фляте, 1986].

Исследование изменения термодинамических свойств целлюлозы в процессе размоля проводили на промышленных образцах сульфатной беленой целлюлозы из хвойных и лиственных пород древесины. Размол целлюлозы производился в мельнице при концентрации массы 6% до степени помола 14, 20, 30, 37, 40 и 50°ШР (градусов Шоппера-Риглера). Определение степени помола целлюлозы, подготовка лабораторных образцов целлюлозы к испытаниям проводились по стандартным методикам. В процессе размоля были проведены калориметрические измерения теплоты взаимодействия целлюлозы с водой – теплоты смачивания ( $\Delta H$ ). Калориметрические измерения производили на калориметре типа Кальве С80 фирмы «Setaram».

На рис. 1 представлены интегральные теплоты ( $\Delta H$ ) взаимодействия с водой высушенных образцов целлюлозы в зависимости от степени её помола [Осипов и др., 2016]. Поскольку теплота взаимодействия целлюлозы с водой находится в строгой зависимости от её структурного состояния, то возрастание теплового эффекта смачивания инклюдированных образцов целлюлозы 3 и 4 (замещение воды органическим растворителем) связано с увеличением количества аморфной части и снижением кристаллической части.

Снижение теплового эффекта смачивания обезвоженных при 105°C образцов целлюлозы объясняется вторичной кристаллизацией аморфной части, происходящей в процессе размоля волокнистого полуфабриката за счет образования фазовых связок. В результате рекристаллизации целлюлоза становится труднодоступной как для химических реагентов, так и для воды, что подтверждается данными, представленными на рис. 2.

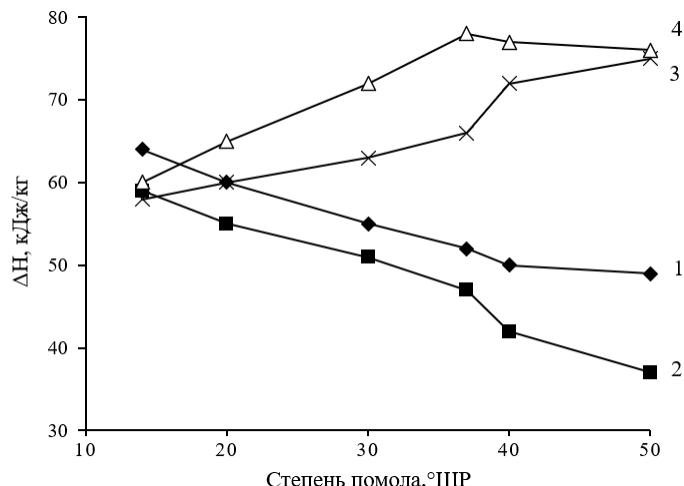


Рис. 1. Зависимость значения интегральной теплоты взаимодействия целлюлозы с водой ( $\Delta H$ ) от степени помола ( $^{\circ}\text{ШР}$ ): 1 и 2 – обезвоживание целлюлозы при  $105^{\circ}\text{C}$ ; 3 и 4 – сушка инклюдированной целлюлозы при  $105^{\circ}\text{C}$ ; (1 – сульфатная лиственновая беленая целлюлоза, 2 – сульфатная хвойная беленая целлюлоза)

Fig. 1. The dependence of the value of the integral heat of interaction of cellulose with water ( $\Delta H$ ) on the degree of grinding ( $^{\circ}\text{C}$ ): 1 and 2 – dehydration of cellulose at  $105^{\circ}\text{C}$ ; 3 and 4 – drying of the incubated cellulose at  $105^{\circ}\text{C}$ ; (1 – sulfate deciduous bleached cellulose, 2 – sulfate coniferous bleached cellulose)

Содержание аморфной части в образцах целлюлозы вычислено в процентах по формуле:

$$\Pi_{\text{AM}} = Q \times 100 / 28,1, \quad (1)$$

где  $Q$  – тепловой эффект взаимодействия целлюлозы с водой, отнесенный к 1 грамму препарата целлюлозы; 28,1 – теплота смачивания 1 грамма препарата, предполагая, что все ОН-группы доступны для воды, кал./г.

На основании данных рис. 2 можно заключить, что повышенное количество аморфной части в инклюдированных препаратах целлюлозы связано с ослаблением гидрофобных взаимодействий, происходящих при замене воды органическим растворителем. Такая замена, как и другие способы регулирования гидрофобных взаимодействий, позволяет получать из целлюлозы материалы с требуемыми показателями качества. Рекристаллизация, как явление, всегда сопровождающее термо-влажностную обработку целлюлозы [Ермолинский, Ковалева, 2018; Осипов и др., 2016], предопределила закрытие построенных заводов по производству растворимой целлюлозы.

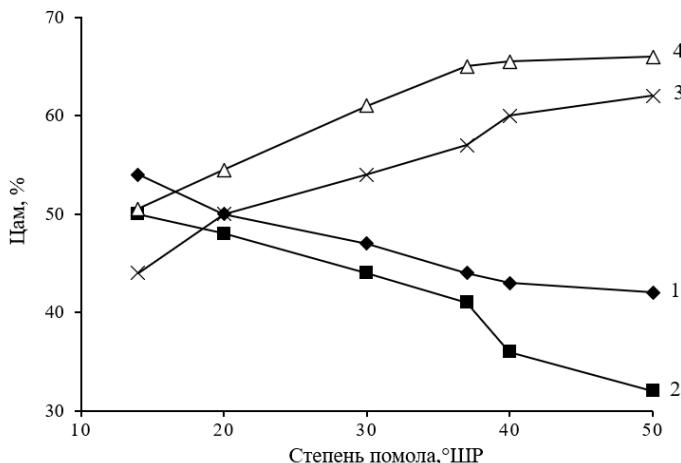


Рис. 2. Зависимость содержания аморфной части ( $\text{Ц}_{\text{AM}}$ ) целлюлозы от степени помола ( $^{\circ}\text{ШР}$ ): 1 и 2 – обезвоживание целлюлозы при  $105^{\circ}\text{C}$ ; 3 и 4 – сушка инклюидированной целлюлозы при  $105^{\circ}\text{C}$ ; (1 – сульфатная лиственничная беленая целлюлоза, 2 – сульфатная хвойная беленая целлюлоза)

Fig. 2. The dependence of the content of the amorphous part (CAM) of cellulose on the degree of grinding ( $^{\circ}\text{C}$ ): 1 and 2 – dehydration of cellulose at  $105^{\circ}\text{C}$ ; 3 and 4 – drying of the incubated cellulose at  $105^{\circ}\text{C}$ ; (1 – sulfate deciduous bleached cellulose, 2 – sulfate coniferous bleached cellulose)

В ближайшей перспективе возникнет потребность в создании отечественного оборудования, связанная с окончанием срока безопасной эксплуатации действующих варочных установок непрерывного действия и другого технологического оборудования. Как известно, схема разработки технологии начинается с выбора модели физико-химического процесса и завершается созданием опытно-промышленной установки. На пути выбора такой модели стоят определенные трудности, связанные с отголосками затянувшейся дискуссии о природе исследуемых объектов, контактов между элементами структуры волокон и полотна бумаги, а также фазовым состоянием целлюлозы. Если экспериментально доказанное существование аморфных и кристаллических областей в структуре целлюлозных волокон представить как части одной диссипативной структуры, то открытый остается вопрос, осуществляется ли сшивка элементов структуры стеклообразными доменами или мицеллярными кристаллитами.

ФХП не рассматривает природу взаимодействия частиц во влажном бумажном полотне и её трансформацию при сушке, ограничиваясь представлениями о стянутой структуре, фиксируемой стеклообразными доменами.

нами. П.А. Ребиндер высказал предположение, что система «вода – волокна целлюлозы» образует коагуляционные структуры вплоть до низких содержаний воды (1-2%), несмотря на малую релаксацию и необратимое разрушение сухой бумаги. Такое предположение допускает существование контактов между элементами тонкой структуры (волокнами, фибрillами), осуществляющихся через водные мономолекулярные адсорбционные оболочки остаточными межмолекулярными силами. Существование такой физической картины относительно волокнистых суспензий (концентрация 0,5-20%) не совпадает с представлениями о водородной связи, как обуславливающей прочность сухой бумаги.

В результате исследования деформационных свойств влажной и сухой бумаги была показана возможность существования одного и того же молекулярного механизма в упрочнении межволоконной связи на всем участке концентрации, начиная с волокнистой суспензии и кончая готовой бумагой. Отмечалась подчиненная роль водородной связи между волокнами в бумаге; было определено, что 1,0-1,4% от общего числа гидроксильных групп оказываются связанными в бумаге, обеспечивая тем самым только 15-25% от общей прочности бумаги. Остальные 70-80% прочности бумажной структуры предположительно образуются за счет вандерваальсовых сил [Рейзинь, 1960]; в то же время исследования по определению энергии связей между волокнами, полученными с помощью атомно-силовой микроскопии, показали, что доля сил Ван-дер-Ваальса составляет не более 3,2 % [Hirn, 2015].

При изучении физико-химических свойств волокнистых суспензий, а также при контроле в промышленных условиях за технологическими параметрами был отмечен ряд явлений, которые можно объяснить, рассматривая их только с позиций ФХМ. Среди них можно отметить следующие явления:

- выделение тепла при переходе опасной границы варки и при каландрировании бумажного полотна;
- количество адсорбированного лигнина и гемицеллюлоз прямо пропорционально их концентрации в щелоке и увеличивается с повышением температуры;
- ускорение химических реакций при добавлении воды к реакционной смеси при органосольвентной делигнификации растительного сырья;
- в условиях щелочной варки модельных соединений лигнина выход полимерных продуктов в этаноле ниже, чем в воде;
- замедление скорости размоля целлюлозы с повышением температуры;
- выделение тепла и повышение коэффициента прочности при размоле сульфитной беленой целлюлозы;

- увеличение влагопрочности образцов бумаги при многократных операциях увлажнения и сушки волокон целлюлозы;
- увеличение степени кристалличности целлюлозы с повышением температуры и продолжительности тепловой обработки;
- выпадение хлопьевидных осадков  $\beta$ -целлюлозы при разбавлении водой щелочных фильтратов;
- увеличение сорбции щелочи из растворов спиртов по мере увеличения их концентрации;
- предотвращение процесса рекристаллизации целлюлозы при гидролизе разбавленными кислотами в присутствии спиртов;
- слипание одноименно заряженных частиц.

*Результаты и обсуждение.* Вышеприведенные примеры отражают особую роль воды, на свойства которой технологам рекомендовано не обращать внимания [Чалых, 1987]. В гетерогенной системе, такой как волокнистая суспензия, не менее важное значение приобретают свойства поверхности волокон. При изучении кинетики слипания кварцевых нитей, покрытых эфирами целлюлозы, было показано, что наибольшую энергию прилипания в водных средах проявляют препараты целлюлозы с наименьшей гидрофильностью (нитроцеллюлоза, бензилцеллюлоза), наименьшую – с наиболее ярко выраженной гидрофильностью (гидратцеллюлоза). В воде энергия прилипания нитей увеличивается с повышением температуры, а в растворе едкого натра кинетика прилипания нитей выявляется слабо [Москвитин, 1964].

Аналогичные выводы были сделаны при изучении контактных взаимодействий индивидуальных волокон целлюлозы, вискозы и ацетилцеллюлозы в воде при адсорбционном модифицировании их поверхности катионными поверхностно-активными веществами, в частности, полиэтиленимином. Было отмечено, что вклад в увеличение сцепления волокон вносит частичная гидрофобизация поверхности волокон [Амелина и др., 2001].

Слипанием волокон по их гидрофобным участкам можно объяснить причину повышения прочности нитей из увлажненных хлопковых волокон. Однако если та же нить вымочена в абсолютном спирте или, при определенных условиях, в бензоле, то её сопротивление разрыву уменьшается. Причина повышения прочности хлопковых волокон в воде связана с тем, что они имеют гидрофобную поверхность и со стороны люмена покрыты особым гидрофобным слоем. Следует отметить, что необработанные хлопковые волокна в воде обладают отрицательным зарядом с высоким значением дзета-потенциала.

Представление о диссипативной структуре кристаллизующихся полимеров объясняет причину формирования дифильных частиц, которые, как и дифильные молекулы, повышают структурированность воды. В результате между частицами возникает гидрофобное взаимодействие, приводящее к их сближению и коагуляции (флокуляции). Носителем гидрофобных свойств волокон природной целлюлозы является кристаллическая часть [Основные представления ..., 1962]. Неотъемлемое свойство суспендированных в воде целлюлозных волокон – предрасположенность их к флокуляции, которую можно рассматривать как элементарный акт формирования структуры и прочности бумажного полотна.

**Заключение.** Выводы о влиянии гидрофобного взаимодействия на агрегацию волокон природной целлюлозы нашли своё отражение при анализе структурно-механических свойств волокнистой суспензии. Было констатировано, что прочность структурной сетки в волокнистых суспензиях обусловлена межмолекулярными связями. Среди них наибольшего внимания для процесса образования пространственной структуры заслуживают гидрофобные взаимодействия. Гидрофобный эффект заключается в том, что неполярные группы (участки) высокомолекулярных веществ в водной среде притягиваются друг к другу с образованием агрегатов из неполярных участков макромолекулы и с максимальным сокращением числа контактов воды с неполярными группами. Для проявления гидрофобных взаимодействий в целлюлозных суспензиях основные предпосылки связаны с наличием у целлобиозной единицы целлюлозы двух гидрофильных и двух гидрофобных поверхностей, определяющих гидрофобный характер кристаллической части целлюлозы [Бабурин, Киприанов, 1983; Lindman, Medronho, 2015; Alves et al., 2015].

Слипание по гидрофобным участкам поверхностей благодаря «сжимающему эффекту» растворителя обеспечивает идеальные условия для образования структур с наименьшей доступной поверхностью, дополнительного стабилизированной за счет электростатических взаимодействий «солевых мостиков» или водородных связей. При испарении воды в пересыщенных растворах образуются частицы новой фазы; их накопление вызывает в дальнейшем формирование прочной кристаллической структуры.

В таких условиях формирование контактов между волокнами обусловливается образованием в контактных зонах фазовых связок. В образовании связок участвуют фазовые частицы веществ, находящихся в жидкой среде, а также водорастворимые вещества, содержащиеся в объёме волокон. Образование водородных связей при соединении природных волокон

не отражает действительного положения вещей, большую роль играют фазовые связи [Головина С.В. и др., 1983].

Исключение из повседневной практики целлюлозно-бумажного производства представлений об аномальных свойствах воды и её роли в гидрофобных взаимодействиях препятствует целенаправленному применению вспомогательных химических веществ при модификации поверхности волокон целлюлозы.

*Конфликт интересов.* Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Библиографический список

Амелина Е.А., Виденский И.В., Иванова Н.И., Парфенова А.М., Пелех В.В., Алтухова Н.В., Щукин Е.В. Взаимодействие индивидуальных волокон при адсорбционном модифицировании их поверхности // Вестник Москов. ун-та. Сер. 2. Химия. 2001. Т. 42. № 1. С. 49–54.

Бабурин С.В., Киприанов А.И. Реологические основы процессов целлюлозно-бумажного производства. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 192 с.

Гликман С.А. Введение в физическую химию высокополимеров. Саратов: Изд. Саратовского универ. 1959. 379 с.

Головина С.В., Васильев Е.М., Яхнин Е.Д. Исследования контактного взаимодействия между волокнами // Тезисы VIII Всесоюзной конф. по колл. химии и физ-хим. механике. Ташкент, 1983. Ч. II. С. 29–31.

Ермолинский В.Г., Ковалева О.П. Мнения и факты в теоретических основах технологий искусственных волокон и целлюлозно-бумажного производства // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2018. Вып. 225. С. 213–225. DOI: 10.21266/2079-4304.2018.225.213-225

Забелин Л.В., Закоциков А.П., Постников В.К. Хлопковая целлюлоза : учеб. пособие. М.: ЦНИИ НТИ, 1976. 279 с.

Москвитин Н.И. Физико-химические основы процессов склеивания. М.: Лесн. пром-сть, 1964. 300 с.

Осипов П.С., Ермолинский В.Г., Шпаков Ф.В. Мицеллярный катализ в целлюлозно-бумажном производстве // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2016. № 9. С. 56–59.

Основные представления о волокнах, применяемых в бумажной промышленности. М.: Гослесбумиздат, 1962. 500 с.

Папков С.П., Файнберг Э.З. Взаимодействие целлюлозы и целлюлозных материалов с водой. М., 1976. 213 с.

Рейзинь Р. О некоторых деформационных свойствах бумаги и бумажной массы // Известия акад. Латв. ССР. 1960. № 6 (155). С. 89–94.

Фляте Д.М. Свойства бумаги. М., 1986. 680 с.

Чалых А.Е. Диффузия в полимерных системах. М.: Химия, 1987. 312 с.

Alves L., Medronho B.F., Antunes F.E., Romano A., Miguel M.G., Lindman B. On the role of hydrophobic interactions in cellulose dissolution and regeneration: Colloidal aggregates and molecular solutions // *Journal Colloids and Surfaces A: Physico-chemical and Engineering Aspects*. 2015. Vol. 483. P. 257–263.

Hirn U., Schennach R. Comprehensive analysis of individual pulp fiber bonds quantifies the mechanisms of fiber bonding in paper // *Scientific Reports* 5. 2015. 9 p.

Lindman B., Medronho B.F. The Subtleties of Dissolution and Regeneration of Cellulose: Breaking and Making Hydrogen Bonds // *Journal BioResources*. 2015. Vol. 10. P. 3811–3814.

### References

Alves L., Medronho B.F., Antunes F.E., Romano A., Miguel M.G., Lindman B. On the role of hydrophobic interactions in cellulose dissolution and regeneration: Colloidal aggregates and molecular solutions. *Journal Colloids and Surfaces A: Physico-chemical and Engineering Aspects*, 2015, vol. 483, pp. 257–263.

Amelina E.A., Videnskiy I.V., Ivanova N.I., Parfenova A.M., Pelekh V.V., Altukhova N.V., Shchukin E.V. Interaction of individual fibers during adsorption modification of their surface. *Bulletin of the Muscovites. un-ta. Ser.2. Chemistry*. 2001, vol. 42, no. 1, pp. 49–54. (In Russ.)

Baburin S.V., Kiprianov A.I. Rheological foundations of pulp and paper production processes. М.: Lesn. prom-st', 1983. 192 p. (In Russ.)

Basic concepts of fibers used in the paper industry. М.: Goslesbumizdat, 1962. 500 p. (In Russ.)

Chalykh A.E. Diffusion in polymer systems. М.: Khimia, 1987. 312 p (In Russ.)

Ermolinsky V.G., Kovaleva O.P. Opinions and facts in the theoretical foundations of artificial fiber technologies and pulp and paper production. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2018, iss. 225, pp. 213–225. DOI: 10.21266/2079-4304.2018.225.213-225. (In Russ.)

Flate D.M. Properties of paper. М., 1986. 680 p. (In Russ.)

Glickman S.A. Introduction to the physical chemistry of high polymers. Saratov: Ed. Saratov University. 1959. 379 p. (In Russ.)

Golovina S.V., Vasiliev E.M., Yakhnin E.D. Studies of contact interaction between fibers. *Theses of the VIII All-Union Conference on Coll. chemistry and Physical Chemistry. mechanics*. Tashkent, 1983. Part II, pp. 29–31. (In Russ.)

Hirn U., Schennach R. Comprehensive analysis of individual pulp fiber bonds quantifies the mechanisms of fiber bonding in paper. *Scientific Reports* 5, 2015. 9 p.

Lindman B., Medronho B.F. The Subtleties of Dissolution and Regeneration of Cellulose: Breaking and Making Hydrogen Bonds. *Journal BioResources*, 2015, vol. 10, pp. 3811–3814.

Moskvitin N.I. Physico-chemical bases of bonding processes. М.: Lest. prom-st', 1964. 300 p. (In Russ.)

Osipov P.S., Ermolinsky V.G., Shpakov F.V. Micellar catalysis in pulp and paper production. *Cellulose. Paper. Paperboard*, 2016, no. 9, pp. 56–59. (In Russ.)

Papkov S.P., Feinberg E.Z. Interaction of cellulose and cellulose materials with water. M., 1976. 213 p. (In Russ.)

Reizin R. On some deformation properties of paper and paper pulp. *Izvestia akad. Latv. SSR*, 1960, no. 6 (155), pp. 89–94. (In Russ.)

Zabelin L.V., Zakoshchikov A.P., Postnikov V.K. Cotton pulp: study. village, M.: TSNII NTI, 1976. 279 p. (In Russ.)

*Материал поступил в редакцию 20.10.2023*

---

**Ермолинский В.Г., Ковалева О.П.** Физико-химическая механика как инструмент для решения проблем целлюлозно-бумажного производства // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 249. С. 310–320. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.310-320

В настоящее время основной задачей многих инвестиционных программ развития целлюлозно-бумажных предприятий является как снижение уровня загрязнения окружающей среды, так и повышение качества выпускаемой продукции, в том числе и на предприятиях, внедривших элементы наилучших доступных технологий. Анализ результатов многочисленных исследований показывает, что эффективность технологий целлюлозы для химической переработки и для производства бумаги, а также высокий уровень и стабильность качества искусственных волокон, изделий из бумаги и картона могут быть достигнуты только при условии учёта специфики процессов структурообразования в дисперсных системах, дисперсионной средой в которых является вода. Каждый из дуализм в поведении воды сформировался под влиянием различных точек зрения на природу связей в структуре целлюлозных волокон и изделий из них. В теоретических основах физико-химии полимеров воде отводится роль пластификатора, а в основах физико-химической механики воду рассматривают как коагулянт в дисперсной системе. В статье рассматриваются состояние и перспективы применения теоретических взглядов научных школ физико-химии полимеров и физико-химической механики дисперсных систем при модернизации целлюлозно-бумажной и текстильной промышленности.

**Ключевые слова:** дисперсные системы, целлюлоза, фазовое состояние, рекристаллизация, гидрофобные взаимодействия.

**Ermolinsky V.G., Kovaleva O.P.** Physico-chemical mechanics as a tool for solving problems of pulp and paper production. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 249, pp. 310–320 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.310-320

Currently, the main objective of many investment programs for the development of pulp and paper enterprises is both to reduce the level of environmental pollution and to

improve the quality of products, including at enterprises that have introduced elements of the best available technologies. Analysis of the results of numerous studies shows that the effectiveness of cellulose technologies for chemical processing and for paper production, as well as the high level and stability of the quality of artificial fibers, paper and cardboard products can be achieved only if the specifics of the processes of structure formation in dispersed systems in which the dispersion medium is water are taken into account. The apparent dualism in the behavior of water was formed under the influence of different points of view on the nature of the bonds in the structure of cellulose fibers and products made from them. In the theoretical foundations of the physico-chemistry of polymers, water is assigned the role of a plasticizer, and in the fundamentals of physico-chemical mechanics, water is considered as a coagulant in a dispersed system. The article discusses the state and prospects of applying the theoretical views of scientific schools of polymer physics and chemistry and physico-chemical mechanics of dispersed systems in the modernization of the pulp and paper and textile industries.

**К e y w o r d s :** dispersed systems, cellulose, phase state, recrystallization, hydrophobic interactions.

---

**ЕРМОЛИНСКИЙ Виктор Григорьевич** – доцент Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат химических наук.

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

**ERMOLINSKY Viktor G.** – PhD (Chemistry). Associate Professor of the St.Petersburg State Forest Technical University,

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: lta\_cbp@mail.ru

**КОВАЛЕВА Ольга Петровна** – доцент Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук.

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

**KOVALEVA Olga P.** – PhD (Technical) Associate Professor of the St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: lta\_cbp@mail.ru

**Е.В. Школьников**

**ВЛИЯНИЕ ВОДНЫХ ЭКСТРАКТОВ ДРЕВЕСНОЙ КОРЫ  
НА КИСЛОТНУЮ КОРРОЗИЮ  
АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ 10Х18Н10Т И 10Х17Н13М2Т**

*Введение.* Ущерб от коррозии технологического оборудования на предприятиях по химической переработке древесины можно уменьшить различными методами [Олиференко и др., 2021], включая ингибицию кислотных сред доступными и экологически безопасными композициями на основе водных экстрактов коры осины [Школьников, Ананьева, 1999]. Нефтегазодобывающая промышленность предъявляет к ингибиторам коррозии требование устойчивости защитного действия в присутствии сероводорода и диоксида углерода [Школьников, Смирнов, Ананьева, 1993].

В последнее десятилетие проводятся интенсивные поисковые исследования эффективных биоразлагаемых ингибиторов на основе экстрактов коры деревьев различных пород, листьев зеленых растений и другого возобновляемого растительного сырья [Zakeri, Bahmani, Aghda, 2022]. Природные экстрактивные вещества применяются для снижения коррозии металлов в водно-органических средах с невысоким содержанием сильных кислот. В крепких минеральных кислотах преимущественно используются синтетические органические ингибиторы, содержащие полярные функциональные группы с гетероатомами O, S или N, а также ароматические кольца, гетероциклы,  $\pi$ -электроны или неподеленные электроны как центры физической или химической адсорбции на металле.

Систематические исследования на кафедре химии Санкт-Петербургского лесотехнического университета показали перспективность комплексной химической переработки древесной коры с получением ингибиторов коррозии, а также дубителей, поверхностно-активных веществ, удобрений (компостов) или топливных брикетов [Shkol'nikov, 2017]. Согласно работе [Школьников, Ананьева, 1997], водоэкстрактивные вещества еловой коры (1,5 г/л) в 7–8 раз замедляют коррозию стали 10Х17Н13М2Т в 10%-х растворах муравьиной и уксусной кислот соответственно при 50 и 90 °C.

Для настоящего исследования выбраны аустенитные стали 10Х18Н10Т и 10Х17Н13М2Т, применяемые для плакирования биметаллических котлов целлюлозного производства и при изготовлении химических реакторов.

Механизм ингибиования коррозии аустенитных сталей в сильных кислотах, а также возможность увеличения антакоррозийного действия экстрактов коры изменением породного состава древесной коры, минеральными и органическими добавками изучены недостаточно.

Цель работы – гравиметрическое и электрохимическое исследование влияния температуры и состава ингибирующих композиций на основе водных экстрактов коры осины (ЭКО), ели (ЭКЕ) и сосны (ЭКС) на скорость и механизм коррозии конструкционных сталей 10X18H10T и 10X17H13M2T в 5%-й соляной кислоте, применяемой с добавкой ингибитора для промывки и химической очистки варочных котлов целлюлозного производства, гидролизных и теплообменных аппаратов.

*Материалы и методика исследования.* Коррозионные испытания<sup>1</sup> сталей 10X18H10T и 10X17H13M2T (аналог AISI 316Ti) проводили на шлифованных прямоугольных пластинах размером 4x15x30 мм, нарезанных из холоднокатаного листового проката, с отверстием диаметром 2,5 мм для подвешивания. Раствор 5%-й соляной кислоты (1,4 моль/л) готовили из концентрированной кислоты HCl «чда» и дистиллированной воды. Среднюю скорость равномерной коррозии  $K$  3–5 шлифованных и обезжиренных ректифицированным этианолом стальных пластин, подвешенных на стеклянных крючках в закрытых химических стаканах с кислотой (в соотношении 5мл кислоты на 1 см<sup>2</sup> поверхности образцов), определяли гравиметрическим способом с использованием электронных микровесов ВСЛ–60/0.1А по стандартной методике. Расчет средней скорости коррозии  $K$  (г/(м<sup>2</sup>·ч)) проводили по формуле

$$K = \frac{\Delta m}{S\tau}, \quad (1)$$

где  $\Delta m$  – потеря массы (г) образца за время  $\tau$  (ч);  $S$  – площадь поверхности (6–10 · 10<sup>-4</sup> м<sup>2</sup>).

Для приготовления ингибирующих композиций использовали свежие водные экстракты образцов коры, полученных сухой осенней окоркой спелых деревьев осины обыкновенной *Populus tremula* L. (ЭКО), ели *Picea excelsa* (Lam.) Link (ЭКЕ) и сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. (ЭКС) Лисинского лесхоза Ленинградской области. Измельченную на молотковой мельнице и фракционированную на ситах воздушно-сухую кору (луб и корка,  $l = 3$ –5 мм) обрабатывали в стеклянных колбах с обратным холодильником или в стальных автоклавах дистиллированной водой при гидромодуле 5 и температуре 100 °C в течение 8 ч. В этих условиях из древес-

---

<sup>1</sup> С участием Г.Ф. Ананьевой в проведении лабораторных испытаний.

ной коры извлекается ~80% общей массы водоэкстрактивных веществ (ВЭВ): танины (гидролизуемые галлотанины и эллаготанины, конденсированные танины), моно- и дисахариды, гликозиды, крахмал, арабиногалактан, камеди и пектины [Школьников, Ананьева, 1997; Feng et al, 2013].

Специально проведенное гравиметрическое исследование травления углеродистой стали Ст3 в 2М растворе  $H_2SO_4$  (80 °C, 1 ч) показало, что взятые в отдельности добавки (3 г/л) танина, арабиногалактана, галактозы, маннита, пирокатехина, ксилозы, глюкозы и мальтозы обладают существенным антакоррозийным действием  $Z$ , равным соответственно 43, 44, 45, 56, 60, 62, 73 и 74% ( $K_0=800 \pm 12 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ) Следует при этом заметить, что в сильнокислой среде конденсированные танины образуют осадок флобафенов и мало влияют на коррозию сталей.

При обработке древесной коры кипящей водой выделение водорастворимых веществ протекает по механизму последовательных и отчасти сопряженных реакций первого порядка. Согласно кинетическому исследованию [Школьников, Ананьева, 2001] на первой стадии преобладает диффузионно контролируемый физический процесс экстрагирования танинов, свободных сахаров и других ВЭВ. При увеличении времени водной обработки или при повышении температуры возрастает вклад второй стадии с энергоемкими химическими превращениями преимущественно гидролиза танинов и углеводов с накоплением редуцирующих веществ и органических кислот, однако без существенного увеличения антакоррозионного действия  $Z$ . Величина  $Z$  не изменялась заметно также при хранении экстрактов в закрытой колбе из темного стекла в течение 30 суток при 20–25 °C. С добавкой  $NaCl$  1 г/л 50%-й водный экстракт коры осины сохранял в этих условиях защитное действие (~85%) на сталь Ст3 в растворах 2М  $H_2SO_4$  и 4М  $HCl$  в течение года.

В отфильтрованных экстрактах коры определяли плотность с помощью ареометра, водородный показатель pH с использованием лабораторного pH-метра-милливольтметра pH-673, сухой остаток гравиметрическим методом и органические кислоты потенциометрическим титрованием до pH 8,5. Выход ВЭВ при обработке кипящей водой в течение 8 ч при гидромодуле 5 составлял ~12, 20 и 30% массы абсолютно сухой коры (а.с.к.) соответственно из коры сосны, ели и осины. Согласно работе [Соболева, Воронин, Есякова, 2020] из исследованных видов древесной коры именно осиновая кора содержит наибольшее количество экстрактивных веществ. Упаренные до 25–50% сухих веществ однородные коричневые экстракты плотностью 1,15–1,30 г/см<sup>3</sup> и pH 3,5–4,0 содержали с учетом данных [Школьников, Ананьева, 2001; Feng et al., 2013] танины (до 6%), D-ксилозу, D-глюкозу, галактозу, L-арabinозу и другие моносахариды (в

сумме до 7%), органические кислоты (до 2% массы а.с.к.). Однаковую общую концентрацию сухих ВЭВ коры 0,5 и 1,0 г/л обеспечивали введением соответственно 2,0 и 4,0 г 25% экстракта в 1 л кислоты. Для повышения антакоррозийного действия экстрактов изучали влияние добавки к экстрактам йодистого калия «чда» или уротропина технического  $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$ , часто используемого в патентах в качестве синергиста комбинированных ингибиторов кислотной коррозии.

Электрохимическое исследование ингибираванной коррозии стальных пластин, подготовленных в соответствии с ГОСТ 9.514–99, проводили на потенциостате П-5848 методом построения поляризационных кривых в динамическом режиме со скоростью 24 мВ/мин и в статическом режиме с выдержкой 5 мин при заданном потенциале в области малых (до  $\pm 10$  мВ) и больших поляризаций (до  $\pm 1200$  мВ). Использовали стандартную электрохимическую ячейку ЯЭС-1 с разделенными катодным и анодным электролитами; она включает в себя исследуемый стальной электрод, насыщенный хлорсеребряный электрод сравнения и платиновый электрод для измерения и регулирования электрического тока. Стальные электроды перед каждым опытом зачищали тонкозернистой наждачной шкуркой 00, обезжиривали этанолом, промывали дистиллированной водой и подвергали катодной обработке при потенциале  $-1,0$  В (н.в.э.) в течение 3 мин. Нерабочую поверхность стальных электродов покрывали изолирующим лаком. Заданную температуру поддерживали циркуляцией воды через «рубашку» электрохимической ячейки с использованием ультратермостата Zeamil-Horyzont UTU-2/77.

*Результаты исследования.* Из экспериментальных данных гравиметрического определения средней скорости коррозии сталей по формуле (1) без ингибитора ( $K_0$ ) и с ингибитором ( $K_i$ ) рассчитали защитное действие  $Z$  (%)

$$Z = 100(K_0 - K_i) / K_0 \quad (2)$$

и ингибиторный эффект  $\gamma = K_0 / K_i$  (табл. 1). Как следует из данных табл. 1, при одинаковой концентрации (1 г/л) антакоррозийное действие водоэкстрактивных веществ существенное ( $Z = 44\text{--}55\%$  при  $20^\circ\text{C}$ ) и увеличивается в ряду ЭКС < ЭКЕ < ЭКО. Добавки экстрактов коры смешают стационарный потенциал электрохимической коррозии  $E_{\text{кор}}$  в положительном направлении при  $20$  и  $40^\circ\text{C}$  (табл. 1), уменьшают скорость анодного ( $i_a$ ) и катодного ( $i_k$ ) процессов (см. типичные кривые на рис. 1–2) и поддерживают исследуемые аустенитные стали при анодной поляризации в состоянии частичной или полной пассивации. Потенциал начала пассивации  $E_{\text{пп}}$  стали 10X18H10T в чистой соляной кислоте, а также с добавками ЭКО, уротропина или их смеси равен  $+70$  мВ, а потенциал резкого увеличения плотности анодного тока (образования стабильных питтингов) вследствие активации хлорид-анионами

равен +220 мВ (н.в.э.) при 20 °C (рис. 1, кривые 1–4). Пассивация исследуемых сталей сильнее выражена при 20 °C и при содержании сухих ВЭВ коры 3,75 г/л. С ингибитором ЭКО анодный ток растворения при пассивации стали 10X18H10T уменьшается в ~5 раз при потенциале +250 мВ (рис. 1, кривая 2), с добавкой 0,75 г/л уротропина в 2 раза (кривая 3), а с добавкой комбинированного ингибитора (3,75 г/л ЭКО + 0,75 г/л  $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$ ) в 3 раза (кривая 4).

Таблица 1

**Влияние температуры и ингибирующих добавок на стационарный потенциал коррозии  $E_{\text{кор}}$  и параметры защиты сталей 10X18H10T и 10X17H13M2T в 5% -й соляной кислоте**

**The effect of temperature and inhibitory additives on the stationary corrosion potential of  $E_{\text{cor}}$  and the protection parameters of 10X18N10T and 10X17N13M2T steels in 5% hydrochloric acid**

| Ингибирующие добавки<br>(в пересчете на сухие вещества)       | $-E_{\text{кор}} \pm 3 \text{ мВ (н.в.э.)}$<br>при $t \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ |                    | $K_0 \pm 0,2 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ | $Z, \%$          | $\gamma$           |
|---|---|--------------------|---|------------------|--------------------|
|   | 20  | 40                 |   |                  |                    |
| –   | 135   | <u>180</u><br>150* | <u>1,60</u><br>0,98*                                | –                | –                  |
| 1 г/л ЭКС   | 107   | 174                | 0,89  | 44               | 1,8                |
| 1 г/л ЭКЕ   | 103   | 168                | 0,80  | 50               | 2,0                |
| 1 г/л ЭКО   | 100   | 164                | 0,73  | 55               | 2,2                |
| 3,75 г/л ЭКО  | 75  | –                  | 0,32  | 80               | 5,0                |
| 0,5 г/л ЭКС + 0,5 г/л ЭКЕ                                     | 105   | 170                | 0,52  | 68               | 3,1                |
| 0,5 г/л ЭКС + 0,5 г/л ЭКО                                     | 103   | 168                | 0,40  | 75               | 4,0                |
| 1 г/л $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$                             | 125   | 172                | 0,76  | 52               | 2,1                |
| 1 г/л ЭКС + 1 г/л $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$                 | 105   | <u>150</u><br>145* | <u>0,70</u><br>0,26*                                | <u>56</u><br>73* | <u>2,3</u><br>3,7* |
| 3,75 г/л ЭКО + 0,75 г/л $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$           | 50  | –                  | 0,25  | 84               | 6,4                |
| 1 г/л ЭКЕ + 1 г/л $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$                 | 95  | 158                | 0,10  | 70               | 3,3                |
| 0,5 г/л ЭКС + 0,5 г/л ЭКЕ + 1 г/л $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$ | 100   | <u>145</u><br>130* | <u>0,53</u><br>0,20*                                | <u>67</u><br>80* | <u>3,0</u><br>5,0* |
| 1 г/л КИ  | 115   | 173                | 0,53  | 67               | 3,0                |
| 0,5 г/л ЭКЕ + 0,5 г/л ЭКО + 1 г/л КИ                          | 85  | <u>125</u><br>120* | <u>0,16</u><br>0,08*                                | <u>90</u><br>92* | <u>10</u><br>13*   |
| 0,5 г/л ЭКС + 0,5 г/л ЭКЕ + 1 г/л КИ                          | 90  | 145                | 0,30  | 81               | 5,3                |
| 0,5 г/л ЭКС + 0,5 г/л ЭКО + 1 г/л КИ                          | 87  | 140                | 0,24  | 85               | 6,7                |

Примечание: \*Сталь 10X17H13M2T.

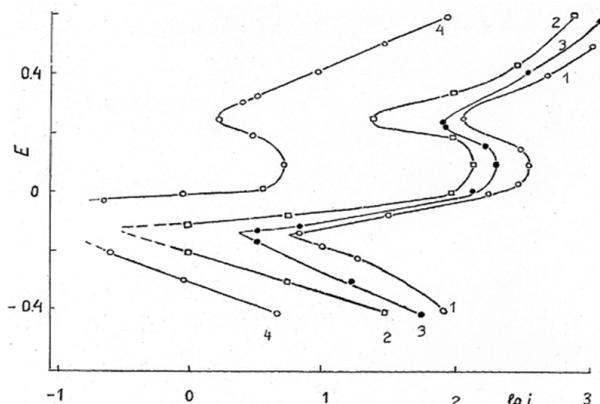


Рис. 1. Потенциодинамические кривые поляризации (24 мВ/мин) стали 10X18H10T в 5%-м растворе HCl при 20 °C ( $E$ ,  $V$ , н.в.э.;  $\lg i$  [ $A/m^2$ ]) без ингибитора (1) и с ингибитором: 2 – 3,75 г/л ЭКО, 3 – 0,75 г/л  $(CH_2)_6N_4$ , 4 – 3,75 г/л ЭКО + 0,75 г/л  $(CH_2)_6N_4$

Fig. 1. Potentiodynamic polarization curves ( $24 \text{ mV min}^{-1}$ ) of 10X18H10T steel in a 5% HCl solution at  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $E$ ,  $V$ , n.h.e.;  $\lg i$  [ $\text{A/m}^2$ ]) without an inhibitor (1) and with an inhibitor: 2 – 3,75 g/l EKO, 3 – 0,75 g/l  $(CH_2)_6N_4$ , 4 – 3,75 g/l EKO + 0,75 g/l  $(CH_2)_6N_4$

В нагретой до  $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$  соляной кислоте добавки ЭКО (ЭКЕ или ЭКС) или их композиции с уротропином (йодидом калия) уменьшают скорость катодного и анодного процессов и поддерживают стали 10X18H10T и 10X17H13M2T в пассивном состоянии соответственно в интервале потенциалов 600–900 и 800–1100 мВ (рис. 2).

Защитное действие ингибитора ЭКО на аустенитные стали при  $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$  возрастает с разбавлением соляной кислоты (7→3 мас%). Наиболее эффективным по гравиметрическим данным (табл. 1) является комбинированный ингибитор (0,5 г/л ЭКО + 0,5 г/л ЭКЕ + 1 г/л KI, в пересчете на сухие вещества экстрактов везде в настоящей работе). Эта добавка к кислоте смещает потенциал начала пассивации стали 10X17H13M2T в отрицательном направлении примерно на 100 мВ и расширяет область пассивации при  $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , значительно сдвигая потенциал начала образования питтингов  $E_p$  в положительном направлении (рис. 2, кривая 4) по сравнению с неингибионной кислотой ( $E_p = 820 \text{ mV}$ , рис. 2, кривая 1). Ранее в работе [Школьников, Ананьева, 1998] показано, что молибденсодержащая аустенитная сталь 10X17H13M2T в хлоридных растворах (1M NaCl; 0,5 M  $H_2SO_4$  + 0,5M NaCl) при  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  имеет положительные значения потенциалов питтингообразования и repassivation.

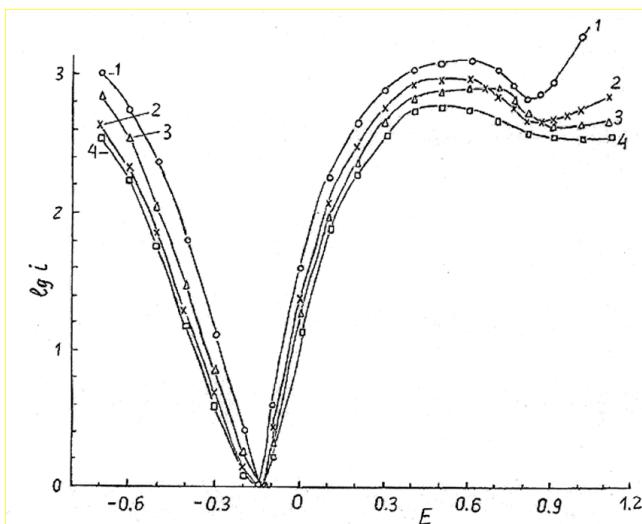


Рис. 2. Потенциостатические кривые поляризации стали 10Х17Н13М2Т при 40 °С в 5% HCl ( $E$ , В, н.в.э.;  $lg i$  [ $\text{mA/cm}^2$ ]) без ингибитора ( $I$ ) и с ингибитором:  
 2 – 1 г/л ЭКС + 1 г/л  $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$ , 3 – 0,5 г/л ЭКС + 0,5 г/л ЭКЕ + 1 г/л  $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$ ,  
 4 – 0,5 г/л ЭКЕ + 0,5 г/л ЭКО + 1 г/л КИ

Fig. 2. Potentiostatic polarization curves of steel 10X17H13M2T at 40 °C in 5% HCl ( $E$ , V, n.h.e.;  $lg i$  [ $\text{mA/cm}^2$ ]) without inhibitor ( $I$ ) and with inhibitor:  
 2 – 1 g/l EKS + 1 g/l  $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$ , 3 – 0,5 g/l EKS + 0,5 g/l EKE + 1 g/l  $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$ ,  
 4 – 0,5 g/l EKE + 0,5 g/l EKO + 1 g/l KI

При нагревании от 20 до 40 °С коррозионная активность соляной кислоты возрастает, скорость коррозии сталей увеличивается примерно в 2 раза, перенапряжение катодного выделения водорода



уменьшается, а потенциал  $E_{\text{кор}}$  смещается в отрицательном направлении (табл. 1). В стационарном состоянии  $E = E_{\text{кор}}$  выполняется приближенно равенство

$$i_M^{\leftarrow} = i_H^{\rightarrow} = i_{\text{кор}}, \quad (4)$$

где  $i_M^{\leftarrow}$  – плотность тока анодного окисления стали (железа)



$i_H^{\rightarrow}$  – плотность катодного тока водородной деполяризации;  $i_{\text{кор}}$  – плотность коррозионного тока или скорость электрохимической коррозии, зависящая

от разности начальных потенциалов анодного и катодного процессов, анодной и катодной поляризумостей, а также омического сопротивления коррозионной среды, незначительного у 5%-й соляной кислоты.

Анализ поляризационных кривых исследуемых сталей показывает, что добавка ЭКО (рис. 1, кривые 1 и 2) или ЭКЕ к соляной кислоте тормозит катодный и особенно анодный процесс, понижая плотность тока при одинаковой абсолютной величине электродного потенциала и увеличивая наклон поляризационных кривых. Добавка ЭКС приводит к значительному торможению катодного процесса водородной деполяризации. При совместном присутствии катодного ингибитора ЭКС и преимущественно анодного ингибитора ЭКЕ или ЭКО усиливается торможение катодного и анодного процессов электрохимической коррозии стали 10X18H10T в 5%-й HCl при 20 и 40 °C с частичной пассивацией в области потенциалов +400 – 700 мВ (н.в.э.). При этом водоэкстрактивные вещества ЭКС и ЭКЕ (ЭКО) взаимно усиливают ингибирующее действие на кислотную коррозию стали. Ингибиторный эффект по электрохимическим данным

$$\gamma_{\text{эх}} = i_{\text{кор}} / i_{\text{кор}}^{\text{инг}} \quad (6)$$

возрастает при добавлении уротропина ( $\gamma_{\text{эх}} = 1,8$ ) или йодида калия ( $\gamma_{\text{эх}} = 2,2$ ) к ЭКС, ЭКЕ и к их смеси (рис. 3) и удовлетворительно согласуется с результатами гравиметрического определения ингибиторного эффекта (табл. 1).

Для определения скорости электрохимической коррозии  $i_{\text{кор}}$  использовали известное уравнение Стерна–Гири (Stern–Geary)

$$i_{\text{кор}} = i |b_k| \cdot b_a / [2,3 \Delta E (|b_k| + b_a)], \quad (7)$$

где  $i$  – плотность возникающего тока ( $\text{А}/\text{м}^2$ ) при изменении потенциала на малую величину  $\Delta E$  ( $\leq 10$  мВ) катодной или анодной поляризации вблизи стационарного потенциала коррозии  $E_{\text{кор}}$ ;  $b_k$  и  $b_a$  – наклоны катодной и анодной поляризационных кривых на прямолинейных участках, соответствующих уравнению Тафеля. Значения  $i_{\text{кор}}$  получены экстраполяцией тафелевых участков кривых до стационарного потенциала.

Теоретическое уравнение (7), используемое при условии отсутствия концентрационной поляризации и незначительности омического сопротивления коррозионной среды, применимо для исследуемых нами коррозионных процессов с водородной деполяризацией. Найденные из рис. 3 (кривые 1–4) значения  $|b_k|$  равны соответственно 11,3; 13,4; 13,6 и 13,0 мВ, а значения  $b_a$  равны 9,4; 9,8; 9,8 и 9,5 мВ соответственно в 5% HCl без ингибитора и в присутствии комбинированных ингибиторов.

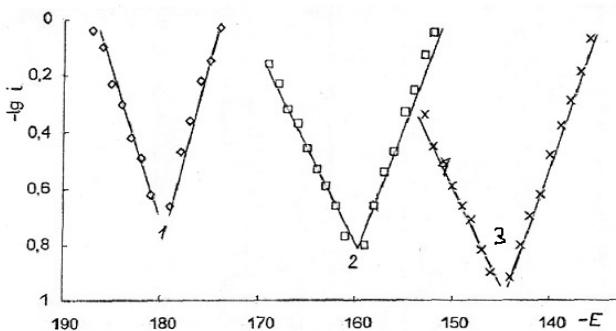


Рис. 3. Потенциостатические кривые поляризации стали 10Х18Н10Т вблизи стационарного потенциала коррозии  $E_{\text{кор}}$  при 40 °С ( $E$ , мВ, н.в.э.  $\lg i$  [ $\text{A} \cdot \text{м}^{-2}$ ]) в 5%-й соляной кислоте без ингибитора (1) и в присутствии ингибирующих добавок: 2 – 5% HCl + 1 г/л ЭКС + 1 г/л  $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$ , 3 – 5% HCl + 0,5 г/л ЭКЕ + 0,5 г/л ЭКС + 1 г/л КИ

Fig. 3. Potentiostatic polarization curves of 10X18H10T steel near the stationary corrosion potential of  $E_{\text{cor}}$  at 40 °C ( $E$ , mV, n.h.e.;  $\lg i$  [ $\text{A}/\text{m}^2$ ]) in 5% hydrochloric acid without inhibitor (1) and in the presence of inhibitory additives: 2 – 5% HCl + 1 g/l EKS + 1 g/l  $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$ , 3 – 5% HCl + 0,5 g/l EKE + 0,5 g/l EKS + 1 g/l KI

По нашим гравиметрическим данным, рост ингибирующего действия от 78% до 86% при нагревании 5%-й соляной кислоты от 20 до 50 °С и увеличение энергии активации коррозии от 17 до  $23 \pm 2$  кДж/моль соответственно в 5% HCl без ингибитора и с добавкой 3,75 г/л ЭКО свидетельствуют о химической адсорбции ЭКО на исследуемых сталях. В отличие от возможной одновременно физической (электростатической) адсорбции процесс активируемой хемосорбции усиливается при нагревании, повышая эффективность ингибиции кислотной коррозии.

Гравиметрическое исследование коррозии стали 10Х17Н13М2Т проводили также в лабораторных условиях, моделирующих химическую очистку 5%-й соляной кислотой (3ч при 50 °С) варочного и теплообменного оборудования, добавляя органоминеральный осадок (20 г/л), снятый с верхней полусферы варочного аппарата «Камрю» Светогорского ЦБК. Растворение осадка происходило с образованием сероводорода и диоксида углерода. Композиция (3,75 г/л ЭКО + 1,25 г/л  $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$ ) оказалась в этих условиях хорошее защитное действие 93,5% (скорость коррозии стали уменьшилась при ингибиции от 9,5 до 0,6  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{ч})$ ,  $\gamma = 16$ ).

Химическое модифицирование водных экстрактов коры различными добавками показало, что лучшими синергистами являются йодид калия и уротропин. Согласно работе [Bayol, Kayakırılma, Erbil, 2007] эффективность ингибиования кислотной коррозии углеродистой стали уротропином увеличивалась при нагревании от 20 до 50 °C. По нашим гравиметрическим данным при коррозионном испытании стали 10X18H10T в 5%-й HCl при 60 °C отдельные добавки  $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$  и KI (1 г/л) к экстракту ЭКО с 2 г сухих ВЭВ в 1 литре повышали ингибиторный эффект от 1,6–3,2 до 6 и 23 соответственно. В практическом отношении предпочтительнее в качестве синергиста широко применяемый уротропин (гексаметилен-тетрамин, гексамин), хорошо растворимый в воде и частично гидролизуемый сильными кислотами. Согласно работе [Cooney, 1986], в 1,0–1,5 М растворах HCl гексамин протонируется на третичных атомах азота и медленно при 25 °C разлагается в основном на ингибирующие формальдегид  $\text{CH}_2\text{O}$  и аммиак  $\text{NH}_3$  по механизму мономолекулярного затухания с константой скорости  $\sim 8 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ , а также с увеличением энталпии и энергии Гиббса согласно нашему термодинамическому расчету. При введении гексамина в слабо-кислые водные экстракты древесной коры формальдегид, образующийся при гидролизе гексамина, может реагировать с учетом данных [Feng et al., 2013] с полифенольными танинами экстрактов с образованием метиленовых мостиковых и эфирных связей, химически модифицируя ингибитор.

#### Выходы

1. По гравиметрическим данным при одинаковом содержании 1 г/л ингибирующее действие  $Z$  водоэкстрактивных веществ (ВЭВ) древесной коры на коррозию исследованных сталей в 5%-й HCl увеличивается в ряду ЭКС < ЭКЕ < ЭКО, а также при повышении концентрации ВЭВ до 3,8 г/л и температуры от 20 до 50 °C (для 3,8 г/л ЭКО и стали 10X18H10T при 20 °C  $Z = 80\%$ , а для стали 10X17H13M2T при 50 °C  $Z = 86\%$ ).

2. При совместном присутствии катодного ингибитора ЭКС и преимущественно анодного ингибитора ЭКЕ или ЭКО взаимно усиливается торможение катодного и анодного процессов электрохимической коррозии стали 10X18H10T в 5%-й HCl при 20 и 40 °C с частичной пассивацией в области потенциалов от 400 до 700 мВ (н.в.э.).

3. Добавки  $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$  и KI (1 г/л) к экстракту ЭКО с 2 г сухих ВЭВ в 1 литре уменьшают скорость коррозии стали 10X18H10T в 5%-й HCl при 60 °C соответственно в 6 и 23 раза. В условиях, моделирующих очистку 5%-й HCl варочного и теплообменного оборудования с образованием  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{S}$ ,

ингибиторная композиция (3,75 г/л ЭКО + 1,25 г/л  $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$ ) оказывает защитное действие 93,5% на сталь 10Х17Н13М2Т.

4. Наиболее эффективным по гравиметрическим и электрохимическим данным является комбинированный ингибитор (0,5 г/л ЭКЕ + 0,5 г/л ЭКО + 1 г/л КІ. Эта добавка к раствору 5%-й HCl значительно смещает стационарный потенциал коррозии исследованных сталей при 20 и 40 °С в положительном направлении, а потенциал начала пассивации молибденсодержащей стали 10Х17Н13М2Т – в отрицательном направлении на 100 мВ при 40 °С.

*Конфликт интересов.* Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

### **Библиографический список**

Олиференко Г.Л., Иванкин А.Н., Устюгов А.В., Зарубина А.Н. Проблема коррозии технологического оборудования на предприятиях по химической переработке древесины // Лесной вестник/ Forestry Bulletin. 2021. Т. 25. № 3. С. 142–151. URL: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-3-142-151>

Соболева С.В., Воронин В.М., Есякова О.А. Содержание биологически активных веществ водно-этанольных экстрактов из коры осины и изучение их рострегулирующей активности // Химия растительного сырья. 2020. № 1. С. 373–380. URL: <https://doi.org/10.14258/jcrgm.2020014442>

Школьников Е.В., Ананьева Г.Ф. Ингибирирование кислотной коррозии сталей водорастворимыми веществами еловой коры // Известия Санкт-Петербургской государственной лесотехнической академии. 1997. Вып. 163. С. 81–87.

Школьников Е.В., Ананьева Г.Ф. Ускоренное определение склонности аустенитных сталей к питтинговой коррозии // Журнал прикладной химии. 1998. Т. 71. № 7. С. 1134–1137.

Школьников Е.В., Ананьева Г.Ф. Ингибирирование коррозии варочного и теплообменного оборудования при очистке соляной кислотой // Целлюлоза. Бумага. Картон, 1999. № 7–8. С. 38–40.

Школьников Е.В., Ананьева Г.Ф. Кинетика выделения водорастворимых веществ из коры ели и сосны при водно-щелочной обработке // ИВУЗ. Лесной журнал. 2001. № 2. С. 95–100.

Школьников Е.В., Смирнов В.Д., Ананьева Г.Ф. Контроль и ингибирирование коррозии сталей в кислых сероводородсодержащих средах // Мониторинг нефтегазовых сооружений в условиях коррозии: матер. Междунар. совещания, Сузdalь, 29–30 сентября 1993 г. М., 1993. С. 32–34.

Bayol E., Kayakirilmaz K., Erbil M. The inhibitive effect of hexamethylenetetramine on the acid corrosion of steel // Materials Chemistry and Physics. 2007. Vol. 104. P. 74–82. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2007.02.073>

Cooney P.A. Mechanistic studies of the decomposition reactions of hexamine and some acetylated and nitrated derivatives. Durham theses, Durham University. 1986. 248 p. Available at Durham E-Theses (дата обращения: 07.09.2023).

*Feng S., Cheng S., Yuan Z., Leitch M., Xu C.* Valorization of bark for chemicals and materials: A review// *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 26. P. 560–578. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.024>

*Shkol'nikov E.V.* Chemical processing and comprehensive utilization of tree bark. Abstracts Intern. confer. «Renewable Wood and Plant Resources: Chemistry, Technology, Medicine». Saint Petersburg, Russia: VVM Publishing Ltd., 2017. P. 152–153.

*Zakeri A., Bahmani E., Aghdam A.S.R.* Plant extracts as sustainable and green corrosion inhibitors for protection of ferrous metals in corrosive media: A mini review // *Corrosion Communications*. 2022. Vol. 5. P. 25–38. URL: <https://doi.org/10.1016/j.corcom.2022.03.002>

## References

*Bayol E., Kayakurilmaz K., Erbil M.* The inhibitive effect of hexamethylenetetramine on the acid corrosion of steel. *Materials Chemistry and Physics*, 2007, vol. 104, pp. 74–82. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2007.02.073>.

*Cooney P.A.* Mechanistic studies of the decomposition reactions of hexamine and some acetylated and nitrated derivatives, Durham theses, Durham University. 1986. 248 p. Available at Durham E-Theses (accessed September 07, 2023).

*Feng S., Cheng S., Yuan Z., Leitch M., Xu C.* Valorization of bark for chemicals and materials: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, vol. 26, pp. 560–578. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.024>

*Oliferenko G.L., Ivakin A.N., Ustyugov A.V., Zarubina A.N.* Problema korrozii tekhnologicheskogo oborudovaniya na predpriyatiyakh po khimicheskoy pererabotke drevesiny [The corrosion problem of technological equipment at chemical wood processing enterprises]. *Forestry Bulletin*. 2021. vol. 25, no. 3, pp. 142–151. URL: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-3-142-151>.

*Soboleva S.V., Voronin V.M., Esyakova O.A.* Soderzhaniye biologicheski aktivnykh veshchestv vodno-ethanol'nykh ekstraktov iz kory osiny i izucheniiye ikh rostreguliruyushchey aktivnosti [The content of biologically active substances of water-ethanol extracts from aspen bark and the study of their growth-regulating activity]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2020, №1, pp. 373–380. URL: <https://doi.org/10.14258/jcprm.2020014442>

*Shkol'nikov E.V., Anan'eva G.F.* Ingibirovaniye kislotnoy korrozii staley vodorastvori-mymi veshchestvami elovoy kory [Inhibition of acid corrosion of steels by water-soluble substances of spruce bark]. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 1997, iss. 163, pp. 81–87. (In Russ.)

*Shkol'nikov E.V., Anan'eva G.F.* Uskorennoye opredeleniye sklonnosti austenitnykh stalei k pittingovoy korrozii. *Zhurnal prikladnoy khimii*, 1998, vol. 71, no. 7, pp. 1134–1137. (In Russ.)

*Shkol'nikov E.V., Anan'eva G.F.* Ingibirovaniye korrozii varochnogo i teploobennogo oborudovaniya pri ochistke solyanoy kislotoy [Inhibition of corrosion

of cooking and heat exchange equipment during cleaning with hydrochloric acid]. *Tselyuliza. Bumaga. Karton*, 1999, no. 7–8, pp. 38–40. (In Russ.)

Shkol'nikov E.V., Anan'eva G.F. Kinetika vydeleniya vodorastvorimykh veshchestv iz kory yeli i sosny pri vodno-shchelochnoy obrabotke [Kinetics of the release of water-soluble substances from the spruce and pine bark during water-alkaline treatment]. *IVUZ. Lesnoy zhurnal*, 2001, no. 2, pp. 95–100. (In Russ.)

Shkol'nikov E.V., Smirnov V.D., Anan'eva G.F. Kontrol' i ingibirovaniye korrozii staley v kislykh serovodorodsoderzhashchikh sredakh [Control and inhibition of steels corrosion in acidic hydrogen sulfide-containing media]. *Monitoring neftegazovykh sooruzheniy v usloviyakh korrozii: materialy Mezhdunar. Soveshch. Suzdal'*. 29–30 sentyabrya 1993 g. M., 1993, pp. 32–34. (In Russ.)

Shkol'nikov E.V. Chemical processing and comprehensive utilization of tree bark. Abstracts of Intern. confer. «Renewable Wood and Plant Resources: Chemistry, Technology, Medicine». Saint-Petersburg, Russia: VVM Publishing Ltd, 2017, pp. 152–153.

Zakeri A., Bahmani E., Aghdam A.S.R. Plant extracts as sustainable and green corrosion inhibitors for protection of ferrous metals in corrosive media: A mini review. *Corrosion Communications*, 2022, vol. 5, pp. 25–38. URL: <https://doi.org/10.1016/j.corcom.2022.03.002>.

*Материал поступил в редакцию 27.09.2023*

---

**Школьников Е.В.** Влияние водных экстрактов древесной коры на кислотную коррозию аустенитных сталей 10X18H10T и 10X17H13M2T // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 249. С. 321–334. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.321-334

Механизм ингибиции коррозии аустенитных сталей 10X18H10T и 10X17H13M2T в сильных кислотах, а также возможность увеличения антикоррозийного действия экстрактов коры изменением породного состава древесной коры, минеральными и органическими добавками изучены недостаточно. Цель работы – гравиметрическое и электрохимическое исследование влияния температуры и состава ингибирующих композиций на основе водных экстрактов коры осины (ЭКО), ели (ЭКЕ) и сосны (ЭКС) на скорость и механизм коррозии сталей 10X18H10T и 10X17H13M2T в 5%-й соляной кислоте. Эта кислота применяется с добавкой ингибитора для промывки и химической очистки варочного и теплообменного оборудования. Получены и анализируются новые данные по кинетике кислотной коррозии исследованных сталей, необходимые для определения механизма ингибиции коррозии водоэкстрактивными веществами древесной коры. Показано, что при одинаковом содержании 1 г/л ингибирующее действие водоэкстрактивных веществ (ВЭВ) древесной коры на кислотную коррозию сталей увеличивается в ряду ЭКС < ЭКЕ

< ЭКО, при повышении концентрации ВЭВ до 3,8 г/л и температуры от 20 до 50 °С , при смешении экстрактов коры разных видов и еще сильнее при введении в экстракты синергистов гексаметиленететрамина или йодида калия.

**Ключевые слова:** ингибирование кислотной коррозии, аустенитные стали, водные экстракты древесной коры.

**Shkol'nikov E.V.** The effect of tree bark aqueous extracts on acid corrosion of austenitic steels 10X18N10T and 10X17N13M2T. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 249, pp. 321–334 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.321-334

The mechanism of corrosion inhibition of austenitic steels 10X18N10T and 10X17N13M2T in strong acids, as well as the possibility of increasing the anti-corrosive effect of bark extracts by changing the species composition of tree bark, mineral and organic additives have not been sufficiently studied. The aim of the work is a gravimetric and electrochemical study of the effect of temperature and inhibitory compositions based on aqueous extracts of aspen (EKO), spruce (EKE) and pine (EKS) bark on the rate and mechanism of 10X18N10T and 10X17N13M2T steels corrosion in 5% hydrochloric acid. This acid is used with the addition of an inhibitor for washing and chemical cleaning of cooking and heat exchange equipment. New data on the kinetics of acid corrosion of the studied steels are obtained and analyzed, which are necessary to determine the mechanism of inhibition by water-extractive substances of tree bark. It is shown that with the same content of 1 g / l the inhibitory effect of wood bark water-extractive substances on steels acid corrosion increases in a number of EKS < EKE < EKO, with an increase in the concentration of extractive substances to 3,8 g / l and a temperature from 20 to 50 °C, when mixing bark extracts of different types and even stronger when introducing synergists hexamethylenetetramine or potassium iodide into the extracts.

**Ключевые слова:** ингибирование кислотной коррозии, аустенитные стали, водные экстракты древесной коры.

---

**ШКОЛЬНИКОВ Евгений Васильевич** – профессор кафедры «Химия» Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета, доктор химических наук, профессор. ORCID: 0000-0002-0199-1200. SPIN-код: 2269-3782. Researcher: G-8108-2016. Scopus Author ID: Scopus 7003735499.

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

**SHKO'NIKOV Evgeny V.** – DSc (Chemical), Professor, St.Petersburg State Forest University. ORCID: 0000-0002-0199-1200. SPIN-code: 2269-3782. Researcher ID: G-8108-2016, Scopus Author ID: Scopus 7003735499.

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

**А.В. Епифанов, М.А. Епифанова, О.В. Рыбников, Э.Л. Аким**

**БАЛАНСОВАЯ СХЕМА  
РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СБРОСА  
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ИНТЕГРИРОВАННЫМ ЦБК БУМАГИ,  
КАРТОНА И ХТММ**

*Введение.* Расчет технологических нормативов сбросов включает определение объектов технологического нормирования. Объекты технологического нормирования являются частью объекта негативного воздействия и, как правило, включают производственные цепочки изготовления товарной продукции. К основной продукции могут относиться следующие производства: небеленой и беленой целлюлозы, бумаги, картона, беленой и небеленой химико-термомеханической массы. При расчете технологических нормативов сбросов на интегрированных ЦБК могут быть выделены производства, нормируемые по производству беленой целлюлозы, небеленой целлюлозы и древесной массы. Исторически сточные воды ЦБК с разных стадий технологических процессов, локальных очистных сооружений, систем водооборота, поступают в производственную канализацию и очищаются на общезаводских очистных сооружениях. Очищенные сточные воды сбрасываются через выпуск сточных вод в водный объект.

Одним из этапов расчета технологических нормативов сбросов интегрированных ЦБК является определение фактических масс сбросов загрязняющих веществ от объектов технологического нормирования с учетом очистки сточных вод на локальных и общезаводских очистных сооружениях. Многие интегрированные ЦБК принимают сточные воды абонентов, не связанных с выпусктом основной продукции ЦБК. В этом случае массы сбросов загрязняющих веществ абонентов должны быть исключены из технологических нормативов сбросов. Данные расчеты могут быть выполнены на основе балансовых моделей масс загрязняющих веществ.

*Актуальность.* Разработка алгоритмов расчета фактических масс сбросов маркерных загрязняющих веществ и технологических показателей сбросов интегрированных ЦБК от отдельных объектов технологического нормирования с учетом очистки сточных вод на локальных и общезаводских очистных сооружениях позволит установить технологически обоснованные значения технологических нормативов сбросов.

*Состояние вопроса.* В российской и зарубежной литературе отсутствуют алгоритмы расчета технологических показателей сбросов загрязняющих веществ при производстве бумаги, картона и древесной массы. В европейских странах отражены только общие подходы [Suhr, 2015; Mavrotas, 2007]. Проблемы оценки массы сброса загрязняющих веществ отдельно для каждого производства рассматривались в различных научных статьях [Боголицын, 2005; Боголицын, 2021; Гермер, 2008; Шишкун, 2006; Жильникова, 2017].

*Научная новизна.* Разработан алгоритм расчета технологических показателей сбросов для интегрированного ЦБК, выпускающего бумагу, картон и древесную массу.

*Цель исследования.* Разработка и расчет технологических нормативов сбросов для интегрированных ЦБК, выпускающих бумагу, картон и древесную массу.

*Материалы и методики исследования.* Применен балансовый метод для разработки балансовых схем расчета технологических показателей и технологических нормативов для ЦБК.

Большинство предприятий ЦБП принимают на очистку городские сточные воды, а также сточные воды абонентов, не связанных с производством продукции комбинатом. Эти массы сбросов не должны учитываться в технологических показателях и технологических нормативах комбината [Гермер, 2008; Гревцов, 2022]. Как правило сточные воды абонентов проходят очистку на очистных сооружениях комбината и затем сбрасываются общим потоком через водовыпуск в водный объект. Таким образом, необходимо для каждого абонента определить массу образовавшихся от него загрязняющих веществ с учетом очистки на очистных сооружениях [Боголицин, 2021; Шишкун, 2006]. Наиболее очевидным представляется расчет массы как произведения расхода сточных вод абонента на концентрации загрязняющих веществ после очистных сооружений комбината.

Однако если концентрации маркерных веществ в сточных водах абонента значительно выше концентраций в сточных водах комбината, то использование данного подхода приведет к завышению эффективности очистки сточных вод абонента, и соответственно часть загрязняющих веществ абонента будет отнесена к сбросу комбината.

Наиболее простым вариантом расчета технологических нормативов сбросов является их расчет по одному объекту технологического нормирования на основе суммарного производства продукции. Этот подход оправдан, если полученные значения фактических технологических показателей сбросов (ТП) не превышают наиболее жестких технологических показате-

лей сбросов, отвечающих применению наилучших доступных технологий (ТПндр) [Мочалова, 2017].

Если ТП превышает наименьшее из значений ТПндр (небеленая целлюлоза, беленая целлюлоза, древесная масса), то интегрированному ЦБК придется разрабатывать программу повышения экологической эффективности по снижению сбросов маркерных загрязняющих веществ или расчитывать ТП отдельно по объектам технологического нормирования.

Опыт внедрения современных технологий на ЦБК показывает, что можно достигнуть значительного снижения нагрузки на водные ресурсы даже при расширении выпуска продукции. Положительным примером служит НПАО «Светогорский ЦБК», которому удалось после запуска производства БХТММ за счет внедрения уникальной локальной системы очистки стоков БХТММ и реализации комплекса технологических водоохраных мероприятий при варке, промывке и отбелке целлюлозы в разы снизить удельные показатели сброса загрязняющих веществ на единицу выпускаемой продукции и существенно сократить водный след комбината [Смирнов, 2006; Рыбников, 2013; ISO 14046:2014, 2014; Directive 2010/75/EU, 2010; ИТС 22.1-2016, 2016]. Включение в ассортимент более экологичной продукции – бумаги Эко – в 2022 г., базирующееся на выполненных ранее исследованиях [Рыбников, 2013], позволило добиться снижения воздействия на окружающую среду, включая сокращение углеродного следа и выбросов в атмосферу, и снизить расход древесины на получение волокнистых полуфабрикатов с  $4,2 \text{ м}^3 / \text{тонну}$  для лиственной целлюлозы до  $2,7 \text{ м}^3 / \text{тонну}$  для осиновой беленой ХТММ. Кроме этого, сократился расход реагентов и энергии, в частности благодаря отказу от использования ступеней отбелки диоксидом хлора.

Рассмотрим балансовую модель сброса загрязняющих веществ после общезаводских очистных сооружений при производстве интегрированным ЦБК бумаги, картона и ХТММ.

Первый объект технологического нормирования (ОТН) (производство бумаги) будем нормировать по беленой целлюлозе, второй ОТН (производство картона) будем нормировать по небеленой целлюлозе, третий ОТН (производство ХТММ) будем нормировать по производству древесной массы. Данный расчет можно выполнить путем разработки балансовой модели. Основы разработки балансовых методов изложены в [Приказ Мин-Природы № 579, 2019; Щелчков, 2019]. Метод материального баланса используется для оценки эмиссий в окружающую среду от технологического процесса или единицы технологического оборудования и учитывает коли-

чества вещества на входе в процесс и выходе из процесса, а также его разложение в технологическом процессе. Балансовый метод наиболее эффективен, если значение фактического технологического показателя попало в диапазон между  $T\pi_{\text{НДТ н/б}}$  и  $T\pi_{\text{НДТ б/ц}}$ . Определить оптимальные значения технологических показателей можно по предложенными формулам.

Вначале рассчитываем фактический технологический показатель по всей продукции.

$$T\pi = \frac{M_{\text{факт}}}{T_{\text{прод}}}, \quad (1)$$

где  $T\pi$  – фактический технологический показатель по всей продукции, кг/т;  $M_{\text{факт}}$  – суммарная масса сброса загрязняющих веществ, кг;

$$T_{\text{прод}} = T_1 + T_2 + T_3; \quad (2)$$

$T_1$  – годовой выпуск воздушно-сухой продукции, нормируемой по беленой целлюлозе, т;  $T_2$  – годовой выпуск воздушно-сухой продукции, нормируемой по небеленой целлюлозе, т;  $T_3$  – годовой выпуск воздушно-сухой продукции, нормируемой по древесной массе, т.

Очевидно, что фактическая масса сброса загрязняющих веществ от каждого вида продукции может быть рассчитана как произведение массы произведенной продукции на удельную норму образования загрязняющих веществ с учетом их очистки на очистных сооружениях. Тогда получим:

$$M_{\text{факт}} = T_1 \cdot y_1 + T_2 \cdot y_2 + T_3 \cdot y_3, \quad (3)$$

где  $y_1$  – удельная норма образования загрязняющих веществ на выпуск 1 тонны продукции  $T_1$ , кг/т;  $y_2$  – удельная норма образования загрязняющих веществ на выпуск 1 тонны продукции  $T_2$ , кг/т;  $y_3$  – удельная норма образования загрязняющих веществ на выпуск 1 тонны продукции  $T_3$ , кг/т.

$$T\pi_{\text{факт}} = \frac{T_1 \cdot y_1 + T_2 \cdot y_2 + T_3 \cdot y_3}{T_1 + T_2 + T_3}. \quad (4)$$

*Результаты исследования.* На условном интегрированном ЦБК выделяем 3 объекта технологического нормирования:

1. ОТН-1 (Бумага беленая);
2. ОТН-2 (Картон и бумага ЭКО);
3. ОТН-3 (Беленая химико-термомеханическая масса (БХТММ)).

На основе технологических регламентов составляем балансовую модель вклада отдельных производственных процессов в значения технологических показателей готовой продукции (рис. 1) [Епифанова, 2021].

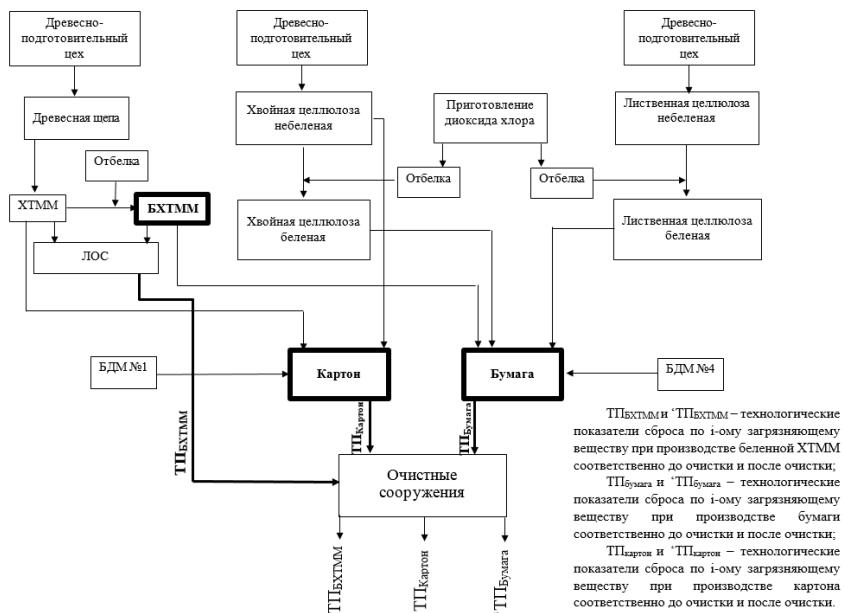


Рис. 1. Балансовая модель вклада отдельных производственных процессов в значения технологических показателей сброса готовой продукции для интегрированного ЦБК

Fig. 1. Balance model of the contribution of individual production processes to the values of technological indicators of the discharge of finished products for integrated pulp and paper production

На Светогорском ЦБК выделены следующие основные производства:

- Производство хвойной небелёной целлюлозы;
- Производство хвойной беленой целлюлозы;
- Производство лиственной беленой целлюлозы;
- Производство бумаги;
- Производство картона;
- Производство ХТММ.

Загрязняющие вещества при производстве хвойной небеленой целлюлозы образуются в следующих технологических процессах: станция нейтрализации, выпарка, ДПЧ, кислотный и щелочного потоки, МТК, СРК, обезвоживание сырья, промывка, варка и каустизация.

Загрязняющие вещества при производстве хвойной беленой целлюлозы, помимо процессов, перечисленных для хвойной небелёной целлюлозы, образуются при производстве диоксида хлора, отбеленных потоков целлюлозы.

Загрязняющие вещества при производстве лиственной целлюлозы образуются на станции нейтрализации и каустизации. Кроме этого, загрязняющие вещества образуются в технологических процессах, общих для лиственной и хвойной целлюлозы; к ним относятся: варка, выпарка, производство хлора, ДПЦ, МТК и СРК, обезвоженное сырье.

Загрязняющие вещества при производстве картона и бумаги определяются только сбросом загрязняющих веществ от БДМ.

Загрязняющие вещества при производстве бумаги на БДМ определяются сбросами цеха осаждения карбоната кальция и самой БДМ.

Производство ХТММ является практически изолированным технологическим процессом. Загрязняющие вещества после локальных очистных сооружений сбрасываются в систему крафт аэрации.

*Расчет технологических показателей сброса для первичных волокнистых небеленых полуфабрикатов (ПВПФн/б) и первичных волокнистых беленых полуфабрикатов (ПВПФб).*

$$T\pi_x^i = \frac{\sum_{j=1}^J N_i^j}{M_x}, \quad (5)$$

где  $T\pi_x^i$  – технологический показатель образования  $i$ -го загрязняющего вещества при производстве продукции  $X$ , кг/т;  $N_i^j$  – масса поступления в сточные воды  $i$ -го загрязняющего вещества при выполнении технологической операции  $j$ , кг;  $J$  – количество технологических операций для производства продукции  $x$ ;  $M_x$  – масса произведенной продукции  $X$ , т.

*Расчет технологических показателей сброса для продукции полного цикла.*

$$N_{бумага} = N_{БХЦ} \cdot y_{БХЦ}^б + N_{БЛЦ} \cdot y_{БЛЦ}^б + N_{ДМ} \cdot y_{ДМ}^б + N_{БДМ}, \quad (6)$$

$$T\pi_{бумага} = \frac{N_{бумага}}{M_{бумага}}, \quad (7)$$

$N_{бумага}$  – количество загрязняющих веществ, образовавшихся в процессе производства бумаги, кг;  $N_{БДМ}$  – количество загрязняющих веществ, образовавшихся от работы бумагоделательной машины при производстве бумаги, кг;  $y_{БХЦ}^б, y_{БЛЦ}^б, y_{ДМ}^б$  – доли беленой лиственной целлюлозы, беленой хвойной целлюлозы, небеленой хвойной целлюлозы, древесной массы, которые пошли на производство бумаги.

Для расчета технологических показателей по конечной продукции необходимо знать процентное соотношение сырья данная информация представлена в табл. 1:

Таблица 1

**Композиция волокнистых полуфабрикатов  
для производства бумаги и картона**

**Composition of fibrous semi-finished products  
for the production of paper and cardboard**

| Волокнистый полуфабрикат     | Процент сырья от общего производства, % |
|------------------------------|---|
| Композиция бумаги            |   |
| БХТММ                        | 20                                      |
| Лиственная беленая целлюлоза | 48                                      |
| Хвойная беленая целлюлоза    | 32                                      |
| Композиция картона           |   |
| БХТММ                        | 11                                      |
| Лиственная беленая целлюлоза | 19                                      |
| Хвойная беленая целлюлоза    | 10                                      |
| Хвойная небеленая целлюлоза  | 60                                      |

Производство БХТММ осуществляется на отдельной линии, где есть собственные очистные сооружения, следовательно, для расчета ТП достаточно знать концентрацию маркерных загрязняющих веществ после локальных очистных сооружений.

На рис. 2 представлен накопительный график вкладов технологических процессов в технологические показатели по ХПК.

По оси х от древесно-подготовительного цеха до каустизации приведены процессы, в которых образуются загрязненные сточные воды при производстве хвойной и лиственной небеленой целлюлозы. При производстве беленой целлюлозы к загрязняющим веществам, образовавшимся при производстве небеленой целлюлозы, добавляются загрязняющие вещества от производства диоксида хлора и процесса отбелки целлюлозы. Как было указано ранее, производство ХТММ является отдельным технологическим процессом, который выделен в отдельное производство. Количество загрязняющих веществ на тонну БХТММ приведено на графике отдельной точкой. Далее на графике приведено количество загрязняющих веществ, попадающих в сточные воды при производстве продукции на БДМ 1 и БДМ 4. Количество загрязняющих веществ, поступающих при производстве тонны бумаги, и картона, рассчитано с учетом композиции бумаги и картона (см. табл. 1). На завершающем этапе количество образующихся загрязняющих веществ на тонну продукции пересчитано с учетом их очистки на общезаводских очистных сооружениях.

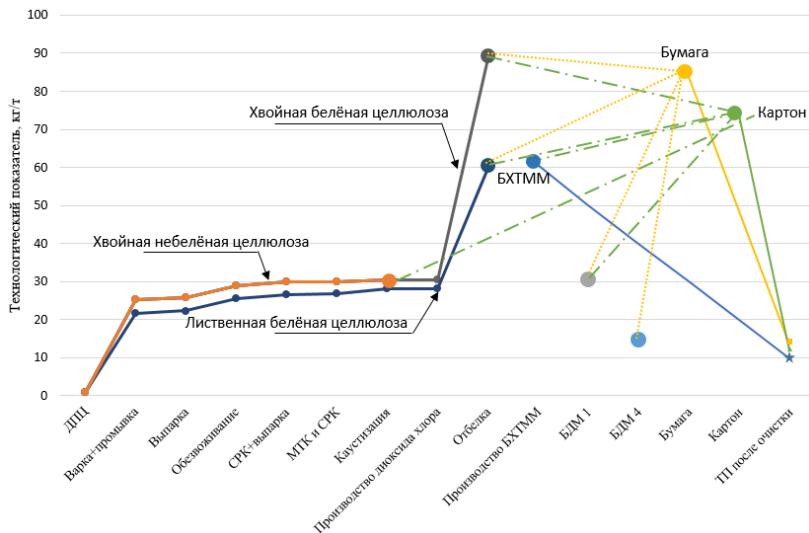


Рис. 2. Накопительный график вклада технологических процессов в технологический показатель сброса ХПК производства бумаги и картона

Fig. 2. Cumulative schedule of the contribution of technological processes to the technological indicator of the discharge of COD of paper and cardboard production

Картон и бумага представляют собой композицию волокнистых полуфабрикатов, следовательно, необходимо рассчитать для начала технологические показатели сброса для производства хвойной небелёной целлюлозы, хвойной беленой целлюлозы, лиственной беленой целлюлозы и, в соответствии с композицией, рассчитать технологические показатели и, в соответствии с эффективностью работы очистных сооружений, получить финальные значения технологических показателей.

При производстве хвойной беленой целлюлозы максимальные значения технологических показателей при варке и при отбелке, остальные процессы в сумме дают не более 10% финального значения технологического показателя по хвойной беленой целлюлозе. Такой же график у лиственной беленой целлюлозы образует меньший технологический показатель.

Технологический показатель для бумаги, композиция которой состоит из хвойной беленой целлюлозы, лиственной беленой целлюлозы и БХТММ, также должен включать загрязнения, образовавшиеся на бумагоделательной машине. Технологический показатель для бумаги рассчитывается: до очистных сооружений и после – до очистных сооружений он составил 28 кг/т, после 0,5 кг/т.

Аналогично рассчитаны технологические показатели сброса по БПК<sub>п</sub> и взвешенным веществам (рис. 3–4).

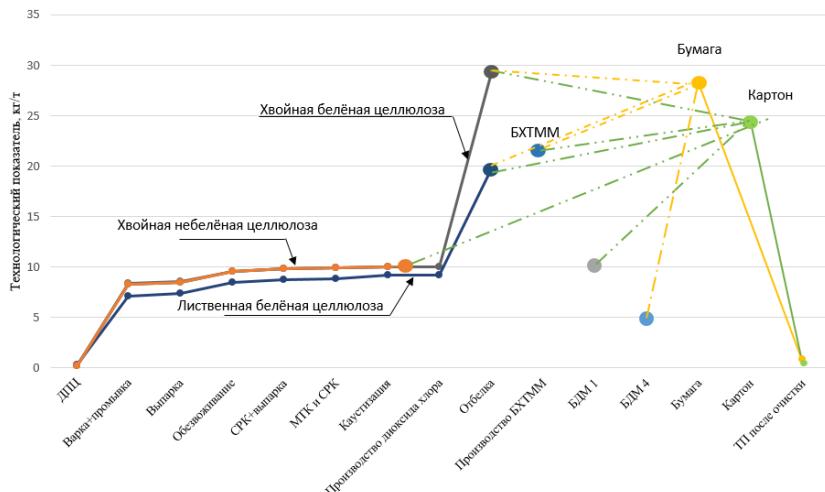


Рис. 3. Накопительный график вклада технологических процессов в технологический показатель сброса  $\text{БПК}_{\text{п}}$  производства бумаги и картона

Fig. 3. Cumulative schedule of the contribution of technological processes to the technological indicator of Bod discharge of paper and cardboard production

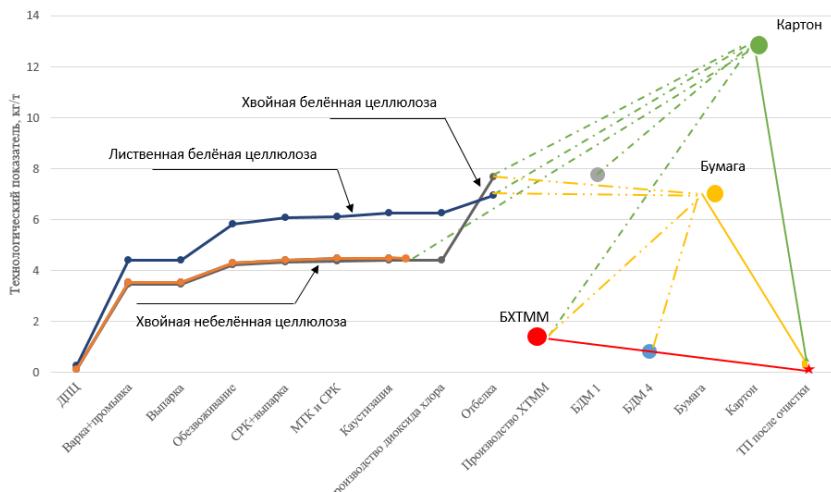


Рис. 4. Накопительный график вклада технологических процессов в технологический показатель сброса взвешенных веществ производства бумаги и картона

Fig. 4. Cumulative schedule of the contribution of technological processes to the technological indicator of the discharge of suspended substances of paper and cardboard production

Результаты расчетов технологических показателей для бумаги, картона и ХТММ по БПК<sub>п</sub>, ХПК и взвешенным веществам приведены в табл. 2. Для производства БХТММ расчеты технологических показателей сбросов проведены с учетом очистки сточных вод на локальных и общезаводских очистных сооружениях.

Таблица 2

**Технологические показатели маркерных веществ  
для производства бумаги, картона и БХТММ**

**Technological indicators of marker substances for paper production,  
the production of cardboard and BCTMM**

| Показатель             | Бумага                       |   | Картон                       |   | БХТММ                        |   |
|------------------------|------------------------------|---|------------------------------|---|------------------------------|---|
|                        | ТП <sub>факт</sub> ,<br>кг/т | ТП <sub>ндт</sub> по бе-<br>леной целлю-<br>лозе кг/т | ТП <sub>факт</sub> ,<br>кг/т | ТП <sub>ндт</sub> по не-<br>беленой цел-<br>люлозе кг/т | ТП <sub>факт</sub> ,<br>кг/т | ТП <sub>ндт</sub> по бе-<br>леной целлю-<br>лозе кг/т |
| ХПК                    | 12,94                        | ≤30   | 11,60                        | ≤12   | 9,73                         | ≤40   |
| БПК                    | 0,51                         | ≤1,2  | 0,24                         | ≤0,7  | 0,12                         | ≤6  |
| Взвешенные<br>вещества | 0,35                         | ≤1,9  | 0,43                         | ≤1,2  | 0,1                          | ≤2  |

*Выводы.* Разработан алгоритм расчета фактических масс сбросов маркерных загрязняющих веществ и технологических показателей сбросов интегрированных ЦБК, выпускающих бумагу, картон и древесную массу, от отдельных объектов технологического нормирования с учетом очистки сточных вод на локальных и общезаводских очистных сооружениях.

Предложенный алгоритм базируется на балансовом методе расчета масс загрязняющих веществ для объектов технологического нормирования по отдельным стадиям технологического процесса. Алгоритм апробирован на примере целлюлозно-бумажного комбината, выпускающего бумагу, картон и ХТММ.

По результатам проведенных расчетов по всем загрязняющим веществам для всех объектов технологического нормирования фактические технологические показатели образования загрязняющих веществ на единицу выпускаемой продукции меньше значений технологических показателей НДТ.

*Конфликт интересов.* Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Библиографический список**

Боголицын К.Г., Москалюк Е.А., Костогоров Н.М., Шульгина Е.В., Иванченко Н.Л. Применение интегральных показателей качества сточных вод для внутрипроиз-

водственного эколого-аналитического контроля производства целлюлозы // Химия растительного сырья. 2021. № 2. С. 343–352. URL: <http://journal.asu.ru/cw/article/view/7871>.

*Боголицын К.Г., Соболева Т.В., Гусакова М. А., Почтовалова А.С., Личутина Т.Ф.* Научные основы эколого-аналитического контроля промышленных сточных вод ЦБП // Екатеринбург. 2010. 168 с.

*Гермер Э.И.* Современная концепция экологического нормирования технологических процессов ЦБП и возможные пути ее реализации в России. О проекте новой системы экологического нормирования – предпосылки его появления и концептуальные решения; проблемы, оставшиеся за рамками проекта // ИВУЗ. Лесной журнал. 2008. № 2. С. 108–117.

*Гревцов О.В.* Технологическое нормирование сбросов промышленных сточных вод на основе наилучших доступных технологий // Инновации. Наука. Образование. 2022. № 50. С. 1933–1939.

*Епифанов А.В., Епифанова М.А.* Алгоритм управления водоохранной деятельностью АО «Сегежский ЦБК» на основе математического моделирования // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 1(7). С. 106–109.

*Епифанова М.А., Епифанов А.В., Аким Э.Л.* Алгоритм расчета технологических показателей для нескольких объектов технологического нормирования // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2021. Вып. 237. С. 258–271

*Жильникова Н.А., Шишкин А.И., Епифанов А.В., Епифанова М.А.* Алгоритм управления перераспределением техногенной нагрузки для территориальных природно-технических комплексов на основе геоинформационных систем // Информационно-управляющие системы. 2017. № 1 (86). С. 93–101

ИТС 1-2022 Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям целлюлозно-бумажное производство Москва: Бюро НДТ, 2022. URL: [https://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=1858&etkstructure\\_id=1872](https://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=1858&etkstructure_id=1872) (Дата обращения: 20.04.2023)

ИТС 22.1-2016 Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям Общие принципы производственного экологического контроля и его метрологическое обеспечение. 2016 (утв. Приказом Росстандарта от 4.03.2016 №1571). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200143295> (дата обращения: 01.04.2023).

*Мочалова Л.А.* Технологическое нормирование на основе наилучших доступных технологий // Экономические, экологические и социальные проблемы горной промышленности Урала: Сборник научных статей. Екатеринбург: Уральский государственный горный университет. 2017. С. 147–153.

Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 579 от 27.08.2019 «Об утверждении нормативного документа в области охраны окружающей среды “Технологические показатели наилучших доступных технологий

производства целлюлозы, древесной массы, бумаги, картона"». URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_333931/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_333931/) (дата обращения: 11.06.2023).

Рыбников О.В., Бондаренко Н.П., Мандре Ю.Г., Аким Э.Л. Поэтапная эколого-технологическая реконструкция интегрированного целлюлозно-бумажного комбината ЗАО ИП («ОАО Светогорск») // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2013. № 5. С. 62–68.

Смирнов М.Н., Локшин Ю.Х., Смирнов А.М., Аким Э.Л. Современная концепция водопользования на предприятиях ЦБП // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2006. №6. с. 66–74.

Щелков К.А. Основные аспекты применения информационно-технических справочников по НДТ // Экология производства. 2019. № 5. С. 20–26.

Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24.11.2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control). URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32010L0075> (дата обращения: 11.04.2023).

ISO 14046:2014 «Environmental management – Water footprint –Principles, requirements and guidelines». URL: <https://www.iso.org/standard/43263.html> (дата обращения 20.05.2023).

Mavrotas G., Georgopoulou E., Mirasgedis S., Sarafidis Y., Lalas D., Hontou V., Gakis N. An integrated approach for the selection of Best Available Techniques (BAT) for the industries in the greater Athens area using multi-objective combinatorial optimization // Energy Economics. 2007. Vol. 29, iss. 4. P. 953–973. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2007.01.002>

Suhr M., Klein G., Kourtzi I., Rodrigo Gonzalo M., Giner Santonja G., Serge Roudier, Delgado Sancho L. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control) // Luxembourg: Publications Office of the European Union. 2015. P. 906. URL: <https://doi.org/10.2791/370629>

## References

Bogolitsyn K.G., Moskalyuk E.A., Kostogorov N.M., Shulgina E.V., Ivanchenko N.L. Application of integral indicators of wastewater quality for intra-industrial environmental-analytical control of cellulose production. *Chemistry of plant raw materials*, 2021, no. 2, pp. 343–352. (In Russ.)

Bogolitsyn K.G., Soboleva T.V., Gusakova M.A., Pochtovaeva A.S., Lichutina T.F. Scientific foundations of environmental-analytical control of industrial wastewater from pulp and paper industry. Yekaterinburg, 2010. 168 p. (In Russ.)

Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24.11.2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control). URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32010L0075> (accessed April 11m 2023). (In Russ.)

*Epifanov A.V., Epifanova M.A.* Algorithm for managing the water conservation activities of Segezha Pulp and Paper Mill JSC based on mathematical modeling. *Questions of radio electronics*, 2019, no. 1(7), pp. 106–109. (In Russ.)

*Epifanova M.A., Epifanov A.V., Akim E.L.* Algorithm for calculating technological indicators for several objects of technological standardization. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2021, iss. 237, pp. 258–271. (In Russ.)

*Germer E.I.* Modern concept of environmental regulation of technological processes of pulp and paper industry and possible ways of its implementation in Russia. About the project of a new system of environmental regulation – the prerequisites for its appearance and conceptual solutions; problems remaining outside the scope of the project. *IVUZ. Forest magazine*, 2008, no. 2, pp. 108–117. (In Russ.)

*Grevtsov O.V.* Technological regulation of industrial wastewater discharges based on the best available technologies. *Innovations. The science. Education*, 2022, no. 50, pp. 1933–1939. (In Russ.)

ISO 14046:2014 «Environmental management – Water footprint –Principles, requirements and guidelines». URL: <https://www.iso.org/standard/43263.html> (accessed May 20, 2023).

ITS 1-2022 Information and technical reference book on the best available technologies for pulp and paper production M.: NDT Bureau, 2022. URL: [https://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=1858&etkstructure\\_id=1872](https://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=1858&etkstructure_id=1872) (accessed April 20, 2023).

ITS 22.1-2016 Information and technical reference book on the best available technologies. General principles of industrial environmental control and its metrological support. 2016 (approved by Order of Rosstandart dated March 4, 2016 No. 1571). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200143295> (accessed January 04, 2023). (In Russ.)

*Mavrotas G., Georgopoulou E., Mirasgedis S., Sarafidis Y., Lalas D., Hontou V., Gakis N.* An integrated approach for the selection of Best Available Techniques (BAT) for the industries in the greater Athens area using multi-objective combinatorial optimization. *Energy Economics*, 2007, vol. 29, iss. 4, pp. 953–973. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2007.01.002>. (In Russ.)

*Mochalova L.A.* Technological standardization based on the best available technologies. *Economic, environmental and social problems of the mining industry of the Urals*: collection of scientific articles. Ekaterinburg: Ural State Mining University. 2017, pp. 147–153. (In Russ.)

Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation No. 579 dated August 27, 2019 «On approval of the regulatory document in the field of environmental protection “Technological indicators of the best available technologies for the production of cellulose, wood pulp, paper, cardboard”». URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_333931/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_333931/) (accessed November 06, 2023).

*Rybников O.V., Bondarenko N.P., Mandre Yu.G., Akim E.L.* Stage-by-stage environmental and technological reconstruction of the integrated pulp and paper mill of CJSC IP («JSC Svetogorsk»). *Pulp. Paper. Cardboard*, 2013, no. 5, pp. 62–68. (In Russ.)

*Shchelchkov K.A.* Main aspects of the application of information and technical reference books on BAT. *Ecology of production*, 2019, no. 5, pp. 20–26. (In Russ.)

*Smirnov M.N., Lokshin Yu.Kh., Smirnov A.M., Akim E.L.*, Modern concept of water use at pulp and paper enterprises. *Pulp. Paper. Cardboard*, 2006, no. 6, pp. 66–74. (In Russ.)

*Suhr M., Klein G., Kourtzi I., Rodrigo Gonzalo M., Giner Santonja G., Serge Roudier, Delgado Sancho L.* Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control). *Luxembourg: Publications Office of the European Union*, 2015, p. 906. URL: <https://doi.org/10.2791/370629>

*Zhilnikova N.A., Shishkin A.I., Epifanov A.V., Epifanova M.A.* Algorithm for managing the redistribution of technogenic load for territorial natural-technical complexes based on geographic information systems. *Information and management systems*. 2017, no. 1 (86), pp. 93–101. (In Russ.)

*Материал поступил в редакцию 27.11.2023*

---

**Епифанова М.А., Епифанов А.В., Рыбников О.В., Аким Э.Л.** Балансовая схема расчета технологических показателей сброса при производстве интегрированным ЦБК бумаги, картона и ХТММ // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 249. С. 335–351. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.335-351

Расчет технологических нормативов сбросов включает определение объектов технологического нормирования. Объекты технологического нормирования являются частью объекта негативного воздействия и, как правило, включают производственные цепочки изготовления товарной продукции. К основной продукции могут относиться производства: небеленой и беленой целлюлозы, бумаги, картона, беленой и небеленой химико-термомеханической массы. Одним из этапов расчета технологических нормативов сбросов интегрированных ЦБК является определение фактических масс сбросов загрязняющих веществ от объектов технологического нормирования с учетом очистки сточных вод на локальных и общезаводских очистных сооружениях. В работе рассмотрена балансовая модель сброса загрязняющих веществ после общезаводских очистных сооружений при производстве интегрированным ЦБК бумаги, картона и ХТММ. Первый объект технологического нормирования (ОТН) (производство бумаги) будет нормироваться по беленой целлюлозе, второй ОТН (производство картона) будет нормироваться по небеленой целлюлозе, третий ОТН (производство ХТММ) будет нормироваться по производству древесной массы. Данный расчет можно выполнить путем разработки балансовой модели. Метод материального баланса используется для

оценки эмиссий в окружающую среду от технологического процесса или единицы технологического оборудования и учитывает количества вещества на входе в процесс и выходе из процесса, а также его разложение в технологическом процессе. Определить оптимальные значения технологических показателей можно по предложенным в статье формулам. Картон и бумага представляют собой композицию волокнистых полуфабрикатов, следовательно, необходимо для начала рассчитать технологические показатели сброса для производства хвойной небелёной целлюлозы, хвойной беленой целлюлозы, лиственной беленой целлюлозы и в соответствии с композицией рассчитать технологические показатели, и в соответствии с эффективностью работы очистных сооружений получить финальные значения технологических показателей. По результатам расчета построены графики, показывающие вклад каждого производственного процесса в технологический норматив сброса.

**Ключевые слова:** технологическое нормирование, целлюлозно-бумажное производство, нормативы допустимых сбросов, балансовый метод, объекты технологического нормирования.

**Epifanova M.A., Epifanov A.V., Rybnikov O.V., Akim E.L.** Balance scheme for calculating technological discharge indicators during the production of paper, cardboard and CTMM by an integrated pulp and paper mill. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 249, pp. 335–351 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.335-351

The calculation of technological standards for discharges includes the identification of objects of technological regulation. Objects of technological regulation are part of the object of negative impact and, as a rule, include production chains for the production of commercial products. The main products may include the production of: unbleached and bleached cellulose, paper, cardboard, bleached and unbleached chemical-thermo-mechanical pulp. One of the stages in calculating technological discharge standards integrated by the pulp and paper mill is the determination of the actual masses of pollutant discharges from technological standardization facilities, taking into account wastewater treatment at local and on-site treatment facilities. The paper examines a balance model for the discharge of pollutants after general plant treatment facilities during the production of paper, cardboard and CTMM by an integrated pulp and paper mill. The first object of technological standardization (OTN) (paper production) will be standardized on bleached cellulose, the second OTN (cardboard production) will be standardized on unbleached cellulose, the third OTN (production of CTMM) will be standardized on the production of wood pulp. This calculation can be performed by developing a balance sheet model. The material balance method is used to estimate emissions into the environment from a technological process or a piece of technological equipment and takes into account the quantities of a substance entering and leaving the process, as well as its decomposition in the technological process. The optimal values of

technological indicators can be determined using the formulas proposed in the article. Cardboard and paper are a composition of fibrous semi-finished products, therefore, it is necessary to first calculate the technological indicators of discharge for the production of unbleached softwood pulp, bleached softwood pulp, bleached hardwood pulp and, in accordance with the composition, calculate the technological indicators and, in accordance with the efficiency of the treatment facilities, obtain the final values technological indicators. Based on the calculation results, graphs were constructed showing the contribution of each production process to the technological discharge standard.

**Ключевые слова:** технологическая регуляция, пульповая и бумажная промышленность, нормативы сброса загрязнений, балансовый метод, объекты технологической регуляции.

---

**ЕПИФАНОВ Андрей Валерьевич** – доцент Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, кандидат технических наук. ORCID: 0000-0002-3429-9835 ResearcherID: AAX-5435-2021.

191186, ул. Большая Морская, д. 18, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: epifandr@yandex.ru

**EPIFANOV Andrey V.** – PhD (Technical), Assistant Professor Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. ORCID: 0000-0002-3429-9835. Researcher ID: AAX-5435-2021.

191186. Bolshaya Morskaya str. 18. St. Petersburg. Russia. E-mail: epifandr@yandex.ru

**ЕПИФАНОВА Марина Анатольевна** – старший преподаватель Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, кандидат технических наук. ORCID: 0000-0002-5709-527X, ResearcherID: AAX-5432-2021.

191186, ул. Большая Морская, д. 18, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: epif.marina@gmail.com

**EPIFANOVA Marina A.** – PhD (Technical), Senior Lecturer Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. ORCID: 0000-0002-5709-527X, ResearcherID: AAX-5432-2021.

191186. Bolshaya Morskaya str. 18. St. Petersburg. Russia. E-mail: epif.marina@gmail.com

**РЫБНИКОВ Олег Валентинович** – исполнительный директор НПАО «Светогорский ЦБК».

188990, ул. Заводская, д. 17, г. Светогорск, Выборгский район, Ленинградская область, Россия. E-mail: oleg\_rybnikov@yahoo.com

**RYBNIKOV Oleg V.** – Executive Director of NPAO «Svetogorsk CBK». 188990. Zavodskaya str. 17. Svetogorsk. Vyborg district. Leningrad region. Russia. E-mail: oleg\_rybnikov@yahoo.com

**АКИМ Эдуард Львович** – профессор Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, доктор технических наук. ORCID: 0000-0002-0098-6565, ResearcherID: B-4128-2018, Author ID: 6701739751.

191186, ул. Большая Морская, д. 18, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: akim-ed@mail.ru

**AKIM Eduard L.** – DSc (Technical), Professor Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. ORCID: 0000-0002-0098-6565, ResearcherID: B-4128-2018, Author ID: 6701739751.

191186. Bolshaya Morskaya str. 18. St. Petersburg. Russia. E-mail: akim-ed@mail.ru

## СОДЕРЖАНИЕ

---

|  |     |
|--|-----|
| Предисловие .....  | 5   |
| <b>1. ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО</b>   |     |
| <i>Проездов П.Н., Тарбаев В.А., Тарасенко П.В., Розанов А.В.</i>   |     |
| Закономерности роста <i>Ulmus pumila</i> L. и <i>Fraxinus lanceolata</i> Borkh.<br>В полезащитных лесных полосах в орошающем сухостепном Заволжье .....  | 6   |
| <i>Ильинцев А.С., Наквасина Е.Н.</i> Влияние покрытия волоков<br>порубочными остатками на повреждаемость почв при разработке лесосек<br>в северной подзоне тайги .....   | 22  |
| <i>Авла Харди Какакхан Авла, Алексеев А.С.</i> Оценка потенциала роста<br>лесов в Иракском Курдистане на основе анализа метеоклиматических<br>данных .....   | 38  |
| <i>Ильин Ф.С., Сидоренков В.М., Мусин Х.Г., Гайфуллин А.Х.,<br/>Чернов В.И.</i> Повышение качества и устойчивости дубрав с использованием<br>инновационных и усовершенствованных технологий в лесах Среднего<br>Поволжья ..... | 55  |
| <i>Байков М.В.</i> Сроки выхода шмелей рода <i>Bombus</i> (Нутрапортера:<br>Apidae) из состояния зимней диапаузы на территории Ленинградской<br>области .....  | 76  |
| <i>Смирнов А.П., Смирнов А.А.</i> Естественное возобновление леса<br>в осушенных сосновках, пройденных комплексными рубками .....  | 87  |
| <i>Николаева М.А., Орлова Л.В., Жигунов А.В., Николаев С.А., Бегле-<br/>цов М.С.</i> Оценка развития лиственницы в географических культурах<br>Ленинградской области .....   | 103 |
| <i>Громов Н.П., Данилов Д.А.</i> Историко-архивное исследование<br>усадебно-паркового комплекса «Белогорка» .....  | 127 |
| <i>Ань Х.М., Грязкин А.В., Калайджян Р.Л., Волдаев Л.К., Балков-<br/>ский Р.А.</i> Количественные характеристики основных видов полезных<br>растений в высокопродуктивных ельниках Охтинского лесничества .....                | 152 |
| <b>2. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ЛЕСОЗАГОТОВОВОК</b>  |     |
| <i>Куликов А.А., Иванова И.В., Дюкова И.Н.</i> Методологические<br>особенности описания процессов теплопроводности .....   | 166 |
| <i>Говядин И.К., Чубинский А.Н., Алексеев А.С.</i> Метод измерения<br>диаметров деревьев на основе технологий искусственного интеллекта .....  | 177 |

|   |     |
|---|-----|
| <i>Александров В.А., Александров А.В., Бучников А.А.</i> Вибронагруженность оператора валочно-пакетирующей машины при технологическом переезде с удержанием срезанного дерева в ЗСУ при его горизонтальном расположении ..... | 195 |
| <i>Угрюмов С.А., Шадрин Р.А., Козлова И.К.</i> Заключительные лесосечные работы в условиях лесничеств Северо-Запада Российской Федерации .....  | 202 |
| <i>Ласточкин Д.М., Сидыганов Ю.Н., Кретинин В.И., Медяков А.А.</i> Анализ частоты колебаний вертикально удерживаемого дерева на виброподвесе .....  | 220 |
| <i>Чудинов С.А.</i> Оценка технико-экономической эффективности строительства лесовозных автомобильных дорог из фиброкементогрунта.....  | 230 |
| <i>Грязин В.А., Багаутдинов И.Н., Шестаков Я.И., Галиутдинов А.Р.</i> Управление движением валочной головки с фрезой валочно-пакетирующей машины .....  | 244 |
| <i>Каляшов В.А., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И.</i> Оценка технологических свойств оттаивающих почвогрунтов под нагрузкой от лесной машины и трелевочной системы на склонах .....                | 256 |
| <b>3. ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ, ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЕРЕВОПЕРЕРАБОТКИ</b>   |     |
| <i>Сиваков В.П., Вурако А.В., Вихарев С.Н., Исаков С.Н., Исаева К.С.</i> Влияние расположения блоков ротаметров циркуляционной смазки подшипников сушильной части на мощность привода .....                                   | 271 |
| <b>4. ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ. БИОТЕХНОЛОГИЯ</b>   |     |
| <i>Лаврентьев И.В., Дубовый В.К., Симонова Е.И.</i> Гидрофилизация как фактор повышения водопоглощения целлюлозного композита .....   | 285 |
| <i>Александров А.А., Момзякова К.С., Дебердеев Т.Р., Канарский А.В., Дебердеев Р.Я., Ямашев Т.А., Канарская З.А.</i> Получение микрокристаллической целлюлозы из тросты технической конопли .....                             | 297 |
| <i>Ермолинский В.Г., Ковалева О.П.</i> Физико-химическая механика как инструмент для решения проблем целлюлозно-бумажного производства .....  | 310 |
| <i>Школьников Е.В.</i> Влияние водных экстрактов древесной коры на кислотную коррозию аустенитных сталей 10Х18Н10Т и 10Х17Н13М2Т ..   | 321 |
| <i>Епифанов А.В., Епифанова М.А., Рыбников О.В., Аким Э.Л.</i> Балансовая схема расчета технологических показателей сброса при производстве интегрированным ЦБК бумаги, картона и ХТММ .....                                  | 335 |
|   | 353 |

## CONTENTS

---

|               |   |
|---------------|---|
| Preface ..... | 5 |
|---------------|---|

### 1. FORESTRY

|   |     |
|---|-----|
| <i>Proezdov P.N., Tarbaev V.A., Tarasenko P.V., Rozanov A.V.</i> Patterns of growth of <i>Ulmus pumila</i> L. and <i>Fraxinus lanceolata</i> Borkh. in protective forest strips in the irrigated dry-steppe Zavolzhye .....     | 6   |
| <i>Ilintsev A.S., Nakvasina E.N.</i> Effects of felling residues reinforcement of the strip roads on soil damage after logging operations in the northern taiga subzone .....   | 22  |
| <i>Awla Hardy Kakakhan Avla, Alekseev A.S.</i> Assessment of the forests growth potential in Iraqi Kurdistan based on the analysis of hydro meteorological data .....   | 38  |
| <i>Ilyin F.S., Sidorenkov V.M., Musin H.G., Gaifullin A.H., Chernov V.I.</i> Improving the quality and sustainability of oak forests using innovative and improved technologies in the forests of the Middle Volga region ..... | 55  |
| <i>Baykov M.V.</i> The timing of the release of bumblebees of the genus <i>Bombus</i> (Hymenoptera: Apidae) from the state of winter diapause in the Leningrad province .....   | 76  |
| <i>Smirnov A.P., Smirnov A.A.</i> Natural renewal of the forest in drained pine forests, passed by complex logging .....  | 87  |
| <i>Nikolaeva M.A., Orlova L.V., Zhigunov A.V., Nikolaev C.A., Begletsov M.S.</i> Assessment of larch development in provenance trials of the Leningrad region .....   | 103 |
| <i>Gromov N.P., Danilov D.A.</i> Historical and archival study of the estate-park complex «Belogorka» .....   | 127 |
| <i>An Kh.M., Gryazkin A.V., Kalaydzhyan R.L., Voldaev L.K., Balkovsky R.A.</i> Quantitative characteristics of the main types of useful plants in highly productive spruce forests of the Okhtinsky forestry .....              | 152 |

### 2. TECHNOLOGY AND EQUIPMENT OF LOGGING INDUSTRIES

|   |     |
|---|-----|
| <i>Kulikov A.A., Ivanova I.V., Dyukova I.N.</i> Methodological features of the description of thermal conductivity processes .....          | 166 |
| <i>Govyadin I.K., Chubinsky A.N., Alekseev A.S.</i> Method for measuring tree diameters based on artificial intelligence technologies ..... | 177 |

|  |     |
|--|-----|
| <i>Aleksandrov V.A., Aleksandrov A.V., Buchnikov A.A.</i> Vibration load of the feller buncher machine operator during technological transfers without load .....  | 195 |
| <i>Ugryumov S.A., Shadrin R.A., Kozlova I.K.</i> Final logging operations in the conditions of forestry in the North-West of the Russian Federation .....  | 202 |
| <i>Lastochkin D.M., Sidiganov Yu.N., Cretinin V.I., Medyakov A.A.</i> Analysis of the vibration frequency of a vertically held tree on a vibration suspension .....  | 220 |
| <i>Chudinov S.A.</i> Assessment of the technical and economic efficiency of the construction of logging roads made of fiber cement soil .....  | 230 |
| <i>Gryazin V.A., Bagautdinov I.N., Shestakov Y.I., Galyautdinov A.R.</i> Control of the movement of the felling head with the cutter of the feller buncher .....   | 244 |
| <i>Kalyashov V.A., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I.</i> Assessment of technological properties of thawing soils under load from a forest machine and a skidding system on slopes .....            | 256 |
| <b>3. WOOD SCIENCE. MECHANICAL WOODWORKING INDUSTRY</b>  |     |
| <i>Sivakov V.P., Vurasko A.V., Vikharev S.N., Isakov S.N., Isaeva K.S.</i> The influence of the location of the rotameter blocks of the circulating lubrication of the bearings of the drying part on the drive power .....    | 271 |
| <b>4. CHEMICAL TECHNOLOGY OF WOOD. BIO TECHNOLOGY</b>  |     |
| <i>Lavrentyev I.V., Duboviy V.K., Simonova E.I.</i> Enhancing Water Absorption in Cellulosic Composites through Hydrophilization .....   | 285 |
| <i>Aleksandrov A.A., Momzyakova K.S., Deberdeev T.R., Kanarsky A.V., Deberdeev R.Ya., Yamashev T.A., Kanarskaya Z.A.</i> Preparation of microcrystalline cellulose from industrial hemp trusts .....                           | 297 |
| <i>Ermolinsky V.G., Kovaleva O.P.</i> Physico-chemical mechanics as a tool for solving problems of pulp and paper production .....   | 310 |
| <i>Shkol'nikov E.V.</i> The effect of tree bark aqueous extracts on acid corrosion of austenitic steels 10X18N10T and 10X17N13M2T .....  | 321 |
| <i>Epifanova M.A., Epifanov A.V., Rybnikov O.V., Akim E.L.</i> Balance scheme for calculating technological discharge indicators during the production of paper, cardboard and CTMM by an integrated pulp and paper mill ..... | 335 |

Научное издание

ИЗВЕСТИЯ  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОЙ  
ЛЕСОТЕХНИЧЕСКОЙ  
АКАДЕМИИ

Выпуск 249

*Издаются с 1886 года*

*Редактор В.Н. Добронравина*

*Компьютерная верстка Е.А. Корнуковой*

---

Подписано в печать с оригинал-макета 28.07.2024. Выход в свет 01.09.2024. Формат 150\*210.  
Печать цифровая. Уч.-изд. л. 22.25. Печ. л. 22.25. Тираж 500 экз. Заказ № 49 С 205. Свободная цена

---

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет  
имени С.М. Кирова

Издательско-полиграфический отдел СПбГЛТУ  
194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., 5, литер У