

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 250

*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 трудового красного знамени Никитский ботанический сад – национальный научный центр РАН» (Московское представительство), СПбГЛТУ,

**Д.А. Данилов**, д-р с.-х. наук, СПбГЛТУ, Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха,

**К. Деглиз**, проф., Университет Лотарингии,

**Д.В. Евтюгин**, д-р хим. наук, профессор, Университет Айеури (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. Мусолини**, 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. Потоккина**, д-р биол. наук, проф., СПбГЛТУ, СПбНИИЛХ,

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

*Адрес редакции, издателя,*

*типографии:* 194021, г. Санкт-Петербург, Институтский пер., д. 5, литер У.

Факс: (812) 670-93-90.

Тел.: (812) 670-92-59.

*Сайт организации:* [www.spbltu.ru](http://www.spbltu.ru)

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

*E-mail:* [izvestiya.spbltu@mail.ru](mailto:izvestiya.spbltu@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. 250. Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2024. – 428 с. – ISBN 978-5-9239-1494-8, ISSN-р: 2079-4304, ISSN-е: 2658-5871.

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

Темплан 2024 г. Изд. № 208

ISBN 978-5-9239-1494-8

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 250

*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. Evtyugin**, PhD, University of Aveiro (Aveiro),

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**A.V. Sheloumou**, 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](http://www.spbftu.ru)*

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

*Serial's website: [izvestia.spbftu.ru](http://izvestia.spbftu.ru)*

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

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

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

UDC 630

**Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii:** Iss. 250. Saint-Petersburg.: SPbFTU, 2024. – 428 p. – ISBN 978-5-9239-1494-8, ISSN-p: 2079-4304, ISSN-e: 2658-5871.

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

Templan 2024 r. Izd. N 208

ISBN 978-5-9239-1494-8

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 «Пресса России» (индекс 11215).

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

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

*Редколлегия*

УДК 630.531

М.О. Гурьянов, О.И. Антонов

## **ИЗМЕНЧИВОСТЬ РАЗМЕРНО-ВЕСОВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МЕЖМУТОВОЧНЫХ ВЕТВЕЙ ДЕРЕВЬЕВ ЕЛИ ЕВРОПЕЙСКОЙ РАЗЛИЧНЫХ КЛАССОВ РОСТА**

*Введение.* Интенсивное лесовыращивание подразумевает проведение регулярных рубок ухода, а также выполнение многоприемной обрезки ветвей для получения высококачественной бессучковой древесины. При этом производительность работ, связанная с ее формированием, во многом зависит от количественных параметров кроны: числа живых и сухих ветвей в мутовке и межмутовочном пространстве, диаметров ветвей, количества мутовок и др. Таким образом, изучение архитектоники кроны является важным элементом лесоводственных и экологических исследований.

Аспектами биологической продуктивности ассимиляционного аппарата древесных пород, а также структурными параметрами кроны в связи с обрезкой ветвей, занимались многие отечественные и зарубежные ученые [Яблоков, 1934; Молчанов, 1952; Полякова, 1954; Карчаускас, 1958; Казимиров, 1977; Кузнецов и др., 1986; Вороницын, 1989; Усольцев, 1998, 2010; Феклистов и др., 2014, 2017; Rutter, 1957; Satoo et al., 1970; Fujimori, 1971; Ford, 1982; Kallio, 1984; Arvidson, 1985; Pollarschutz, 1994 и др.].

Количество работ по строению кроны ели значительно меньше, чем по сосне. Результаты исследований в чистых и смешанных насаждениях ели показали, что между степенью повреждения кроны и приростом имеется тесная связь, однако площадь питания, а также конкуренция соседних деревьев, могут оказывать гораздо большее влияние на прирост отдельных деревьев [Kramer, 1986]. Существует зависимость между приростом по объему на 1 м<sup>2</sup> поверхности кроны и степенью ее повреждения (потерей хвои). В шведском институте сельскохозяйственных наук была разработана динамическая модель линейного и весового роста ветвей для молодых насаждений ели европейской [Madgwick et al., 1986].

Как известно, крона дерева у хвойных пород является физиологическим центром, который управляет процессом формирования древесины [Полубояринов, 1974]. В связи с этим, удаление любого количества хвои в результате обрезки ветвей, тем самым вмешательство в данный процесс, должно быть обоснованным. Это касается в первую очередь интенсивности удаления ветвей с тем, чтобы уменьшить возможное негативное влияние этого вида ухода на показатели роста деревьев.

Одной из характерных особенностей крон деревьев ели европейской (*Picea abies* (L.) Н. Karst) является значительное количество межмутовочных ветвей, отрицательно влияющих на качество древесины.

*Цель работы* заключалась в изучении закономерностей распределения межмутовочных ветвей, а также зависимости их размерно-весовых показателей от классов роста деревьев (классов Крфта).

*Объектом исследований* являлись 29-летние групповые культуры ели в Таицком участковом лесничестве Гатчинского лесничества Ленинградской области, выращиваемые с целью формирования высококачественной древесины методом обрезки ветвей. На момент проведения полевых работ, объект характеризовался следующими таксационными характеристиками: средняя высота  $H_m$  – 14,0 м, средний диаметр  $D_m$  – 12,2 см, густота  $N$  – 2635 шт./га, сумма площадей сечений  $G$  – 30,78 м<sup>2</sup>/га, запас  $M$  – 221 м<sup>3</sup>/га, бонитет – I, тип леса – кисличный.

*Материалы и методика исследований.* Формирование крон происходит под влиянием большого количества факторов, к ключевым из которых можно отнести древесную породу и условия местопроизрастания. В этом отношении выбор в качестве объекта исследования искусственных древостоев ели позволил свести к минимуму различия в них, так как за счет одинаковой схемы посадки и высокой сохранности культур, расстояния от каждого из рассмотренных деревьев до соседних были примерно одинаковыми [Антонов, Гурьянов, 2020]. Таким образом, можно предполагать, что формирование крон происходило в схожих, с точки зрения конкурентных взаимоотношений, условиях и без существенного повреждающего воздействия, возникающего порой в результате охлестывания в смешанных насаждениях с участием мягколиственных пород. Компактность и расположение опытного объекта, площадь которого составляет 2,0 га, обеспечили сходство микроклиматических и почвенных условий.

Вместе с тем, несмотря на указанное сходство в условиях местопроизрастания, формируемое насаждение содержит деревья, различающиеся по

своим размерным показателям, жизненному состоянию и биосоциологическому положению. Для характеристики последнего еще в XIX веке Густавом Крафтом было введено пять классов роста, из которых к первому классу относятся деревья, занимающие господствующее положение в древостое, к последнему, пятому – находящиеся исключительно под пологом сильно угнетенные и усыхающие [Kraft, 1884].

В рамках предлагаемой работы рассмотрены деревья I и IV классов роста. Такой выбор был сделан для получения максимальной контрастности положения рассматриваемых деревьев в пологе древостоя. На основании сплошного перечета стволов было выбрано и срублено по три модельных дерева на каждый класс роста. Деревья выбирались средними по величине и форме кроны. У всех модельных деревьев до рубки измерялся диаметр кроны в двух направлениях и расстояние до ближайших деревьев. После рубки – протяженность живой кроны, высота, текущий прирост в высоту, текущий диаметр терминального побега, количество мутовок и расстояние между ними. Кроме того, у модельных деревьев определялось количество живых и сухих ветвей в мутовках. У живых ветвей измерялась длина и текущий прирост по длине, диаметр у основания ветви и вес, а у сухих ветвей – диаметр у основания. Также определялось количество живых и сухих межмутовочных ветвей, их диаметр у основания и вес живых ветвей.

В итоге были получены данные о размерных показателях 223 живых ветвей, расположенных в 104 межмутовочных пространствах, для каждого из которых определялись также весовые показатели средних ветвей, а также количество сухих ветвей. В дальнейшем, для установления закономерностей размерно-весовых показателей межмутовочных ветвей, была проведена статистическая обработка полученных данных, включающая в себя корреляционный и регрессионный анализ.

*Результаты исследования.* Для анализа процессов роста ключевых размерных показателей межмутовочных ветвей – длин и диаметров оснований, была использована логистическая модель:

$$y = \frac{K}{1 + E \cdot e^{-r \cdot n}}, \quad (1)$$

где  $K$  – ёмкость среды, максимально возможное в данных условиях значение изучаемого показателя;  $E$  – кратность роста;  $r$  – относительная скорость роста;  $n$  – номер мутовки и, соответственно, возраст, лет.

Полученные для деревьев I и IV классов роста значения параметров логистической кривой приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Параметры логистической модели, описывающей возрастную динамику диаметров оснований и длин межмутовочных ветвей**

**Parameters of a logistic model describing the age dynamics of base diameters and lengths of branches in interwhorl range**

Оцениваемый показатель	Класс роста	Параметры логистической модели (1)			$R^2$ , %
		$K$	$E$	$r$	
Диаметр основания ветвей, см	I	16,89	2,82	0,13	72,2
	IV	60,68	20,47	0,04	43,6
Длина ветвей, м	I	4,36	22,4	0,15	88,1
	IV	0,93	5,74	0,21	77,1

Графическое представление возрастной динамики эмпирических и теоретических значений размерных показателей межмутовочных ветвей показано на рис. 1, из которого видно, что несмотря на увеличение диаметра основания и длины ветвей с возрастом, их зависимость от возраста проявляется не столь явно, как у ветвей в мутовках [Гурьянов и др., 2020]. Это обусловлено в первую очередь тем, что формирование и развитие межмутовочных ветвей происходят вследствие изменения факторов внешней среды [Галицкий, 2012]. Как следствие, ветви, возникшие в последующие годы, характеризующиеся более благоприятными условиями, могут обогнать в росте своих предшественников.

Если же сравнивать размеры ветвей у деревьев разных классов роста то, как видно из рис. 1, у деревьев I класса их рост идет более активно, чем у деревьев IV класса.

Помимо диаметров оснований и длин ветвей, с помощью ростовых моделей можно описать возрастную динамику их массы. Следует отметить, что при моделировании ростовых процессов ветвей, расположенных как в мутовках, так и между ними, необходимо учитывать ограниченность срока их жизни, обусловленную процессом очистки ствола от сучьев. Так, у рассмотренных модельных деревьев I класса роста наибольший выявленный возраст ветви составил 18 лет, а у деревьев IV класса – 14, причем относятся они к ветвям первого порядка. Срок жизни ветвей высшего порядка ниже в 2–3 раза [Цельникер, 1994]. Это приводит к тому, что на фоне увеличивающихся длины и диаметра основания ветвей, их вес начинает снижаться после 11 лет у деревьев I класса роста и 9 лет – IV класса.

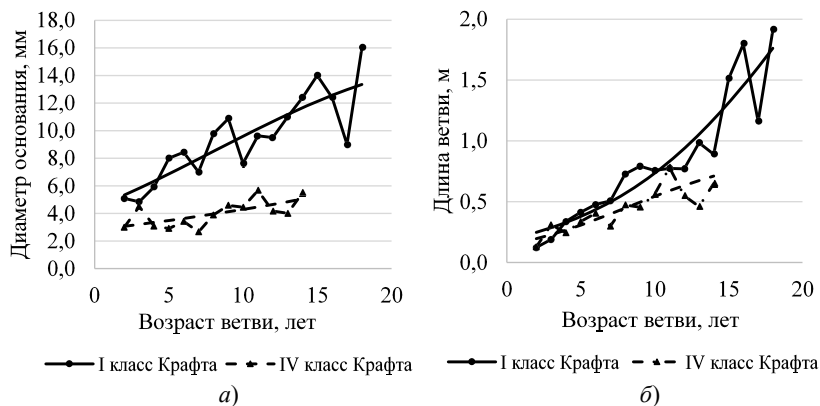


Рис. 1. Возрастная динамика диаметров оснований (а) и длин (б) междуголовных ветвей у деревьев I и IV классов роста

Fig. 1. Age dynamics of base diameters (a) and lengths (b) of branches in interwhorl range in trees of I and IV growth classes

Как следствие, для описания возрастной динамики массы ветвей становится непригодна асимптотическая логистическая ростовая модель, что обусловило выбор с этой целью экспоненциальной функции вида:

$$N = a \cdot e^{\frac{-(n-b)^2}{c}}, \quad (2)$$

где  $n$  – номер междуголовного интервала, при движении от вершины дерева к его основанию;  $a$ ,  $b$  и  $c$  – параметры модели.

Параметры экспоненциальной модели, описывающей зависимость количества и массы ветвей от номера междуголовного интервала, представлены в табл. 2.

Помимо размеров и массы ветвей, значительный интерес представляет их количество, так как связанное с ним число сучков в стволовой древесине является одним из основных сортообразующих показателей. Следует сказать, что формирование междуголовных ветвей, обусловленное в значительной степени влиянием факторов внешней среды, приводит к высокой изменчивости их количества. Так, например, в смежные годы у одного и того же дерева число междуголовных ветвей составляло 4 и 15 штук. У модельных деревьев одного и того же класса роста число сформировавшихся в один год ветвей различалось в несколько раз.



Таблица 2

**Параметры экспоненциальной модели, описывающей зависимость количества и массы ветвей от номера межутовочного интервала**

**Parameters of an exponential model describing the dependence of the number and mass of branches on the number of the interwhorl interval**

Показатель	Класс роста	Параметры экспоненциальной модели (2)			$R^2$ , %
		$a$	$b$	$c$	
Вес средней ветви, кг	I	0,19	14,40	77,28	72,7
	IV	0,02	8,90	19,15	60,2
Общий вес ветвей в межутовочном интервале, кг	I	2,14	8,89	22,19	84,8
	IV	0,20	7,48	42,44	21,4
Общее количество ветвей, шт.	I	18,61	11,27	220,47	80,8
	IV	18,61	13,47	75,28	84,4
Количество живых ветвей, шт.	I	20,49	6,79	31,86	96,6
	IV	9,73	7,09	38,39	77,3

Уменьшение количества ветвей в нижней части кроны легко объясняется процессом очистки ствола от сучьев, а сравнительно более низкое их число в верхней части кроны позволяет выдвинуть гипотезу о том, что с возрастом у деревьев ели происходит уменьшение интенсивности образования межутовочных ветвей.

Учитывая указанную динамику числа ветвей, для ее описания может быть использована приведенная выше экспоненциальная функция (2). С ее помощью можно показать изменение общей массы межутовочных ветвей в зависимости от номера интервала. Полученные значения параметров, а также показатели точности аппроксимации приведены в табл. 2 и показаны на рис. 2.

Сравнение показателей деревьев I и IV классов роста показало, что если общее количество живых и сухих межутовочных ветвей у них различается не столь сильно, особенно в центральной части кроны, то в долях живых ветвей наблюдаются более существенные расхождения, что позволяет сказать о различиях в сроках их жизни.

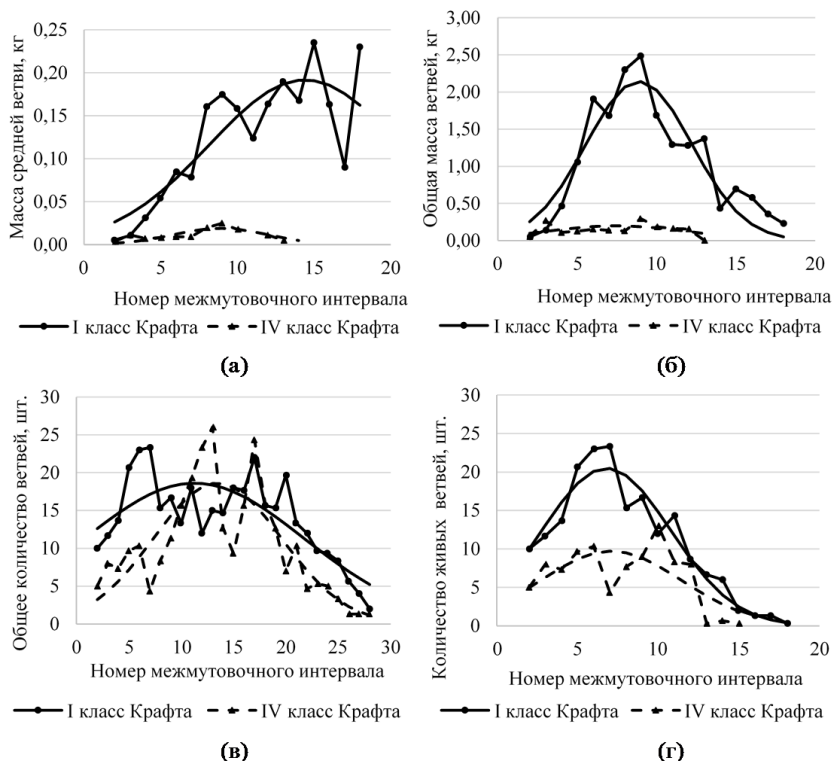


Рис. 2. Зависимость массы средней ветви (а), общей массы ветвей (б), общего количества ветвей (в) и количества живых ветвей (г) деревьев I и IV классов роста от номера межузловочного интервала

Fig. 2. Dependence of the mass of the middle branch (a), the total mass of branches (б), the total number of branches (в) and the number of living branches (г) of trees of growth classes I and IV on the number of the interwhorl interval

Подобная зависимость обусловлена в первую очередь особенностями светового режима – ветви деревьев IV класса роста, характеризующихся сравнительно меньшими размерами, в более раннем возрасте попадают в затененную зону, в которой их хвоя уже не может достаточно эффективно выполнять фотосинтетическую функцию, что приводит к их скорейшему усыханию.

Для анализа сроков жизни ветвей в рамках исследования была использована модель Гомпертца, описывающая зависимость доли живых ветвей в межмутовочном интервале от его номера:

$$y = e^{-e^{a+b \cdot n}}, \quad (3)$$

где  $a$  и  $b$  – параметры модели;  $n$  – номер межмутовочного интервала.

На основании параметров модели Гомпертца, приведенных в табл. 3, представляется возможным определить характеристики стадий изменения доли живых ветвей в межмутовочных интервалах, в частности, начало стадии ее максимального снижения [Алексеев, Лайранд, 1993]:

$$n_1 = \frac{1}{b} \cdot \left( \ln \left( \frac{3 - \sqrt{5}}{2} \right) - a \right), \quad (4)$$

где  $a$  и  $b$  – параметры модели.

Так, для деревьев I класса роста  $n_1 = 12$ , а IV – 9, т. е. именно с этих межмутовочных интервалов начинается резкое снижение доли живых ветвей (рис. 3).

Таблица 3

**Параметры модели Гомпертца, описывающей динамику долей живых межмутовочных ветвей при движении от вершины к основанию ствола**

**Parameters of model of Gompertz describing the dynamics of the shares of living branches in interwhorl range when moving from the top to the base of the trunk**

Класс роста	Параметры модели Гомпертца (3)		$R^2$ , %
	$a$	$b$	
I	–7,83	0,57	99,7
IV	–8,38	0,72	99,6

В целом же максимальный номер межмутовочного интервала, в котором наблюдались живые ветви у деревьев I класса роста, был равен 18, а у IV – 14. Общее число интервалов с наличием живых или сухих ветвей составило соответственно 28 и 26.

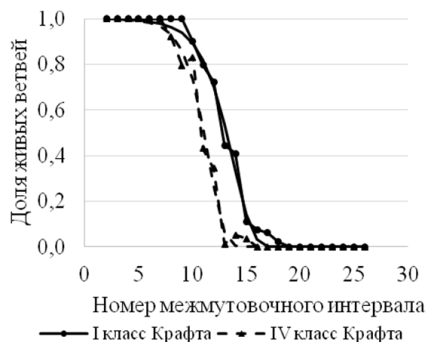


Рис. 3. Зависимость доли живых ветвей от номера межмутовочного интервала

Fig. 3. Dependence of the proportion of live branches on the number of the interwhorl interval

Как отмечалось выше, формирование межмутовочных ветвей происходит под существенным влиянием факторов внешней среды, определяющих также рост деревьев, в том числе и в высоту. Это позволило выдвинуть гипотезу о существовании взаимосвязи между количеством ветвей и величиной межмутовочного интервала, в котором они расположены.

Для проверки данной гипотезы были вычислены коэффициенты парной корреляции, составившие для деревьев I класса роста 0,56 и 0,95 – для IV. Величины  $r$ -критерия составили соответственно 0,003 и 0,000. Таким образом, можно считать, что между рассмотренными показателями существует достоверная прямая корреляция, иными словами при большем приросте в высоту формируется и развивается большее количество межмутовочных ветвей.

Помимо хода роста и возрастной динамики количества ветвей, значительный интерес представляет установление взаимосвязей между их размерами, в первую очередь – диаметром основания и длиной. Проведенный в ходе исследования регрессионный анализ показал, что для ее описания может быть использована степенная функция вида:

$$l = a \cdot d_0^b, \quad (5)$$

где  $l$  – длина ветви, см;  $d_0$  – диаметр основания ветви, мм;  $a$  и  $b$  – параметры модели.

Для большей наглядности, по приведенным в таблице 4 параметрам степенной функции (5) был построен график (см. рис. 4), из которого видно, что при равных диаметрах оснований дерева IV класса роста характеризу-

ются большей, чем деревья I класса длиной ветвей. Аналогичная зависимость была выявлена и для ветвей ели, расположенных в мутовках [Гурьянов и др., 2020].

Таблица 4

**Параметры степенной функции, описывающей зависимость длин межмутовочных ветвей от диаметров их оснований**  
**Parameters of a power function describing the dependence of the lengths of branches in interwhorl range on the diameters of their bases**

Класс роста	Параметры степенной функции (5)		$R^2$ , %
	$a$	$b$	
I	1,93	1,63	76,9
IV	8,97	1,15	68,8

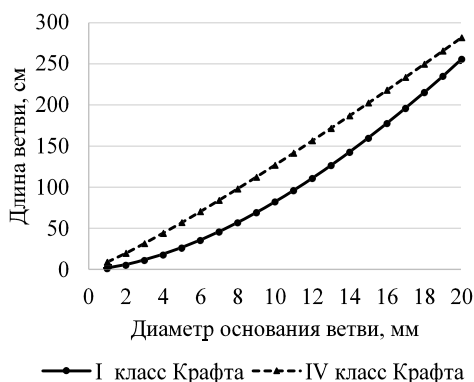


Рис. 4. Зависимость длин межмутовочных ветвей деревьев I и IV классов роста от диаметров их оснований

Fig. 4. The dependence of the lengths of the branches in interwhorl range of trees of growth classes I and IV on the diameters of their bases

В отличие от сильной прямой взаимосвязи диаметров оснований и длин межмутовочных ветвей деревьев ели европейской, зависимость от них массы ветвей является менее выраженной. Это обусловлено уже отмечавшимся различием в продолжительности жизни ветвей различных порядков, из-за которого, несмотря на то, что у ветвей первого порядка продолжается рост по диаметрам оснований и длинам, отмирание ветвей второго и более порядков со временем приводит к снижению массы вследствие опадения хвои и части ветвей.

Таблица 5

**Параметры экспоненциальной модели, описывающей зависимость массы межмутовочных ветвей от их диаметров оснований и длин**

**Parameters of an exponential model describing the dependence of the mass of branches in interwhorl range on their base diameters and lengths**

Независимая переменная	Класс роста	Параметры экспоненциальной модели (1)			$R^2$ , %
		$a$	$b$	$c$	
Диаметр основания, мм	I	1,89	10,74	23,68	36,4
	IV	0,35	6,75	9,58	52,7
Длина, см	I	1,86	87,91	3128,61	35,0
	IV	0,33	82,55	1669,46	44,4

Из рассмотренных в рамках исследования моделей с наибольшей точностью зависимость массы межмутовочных ветвей от их длин и диаметров оснований также описывается экспоненциальной моделью (2), полученные в ходе регрессионного анализа параметры которой и графическое представление приведены в табл. 5 и на рис. 5.

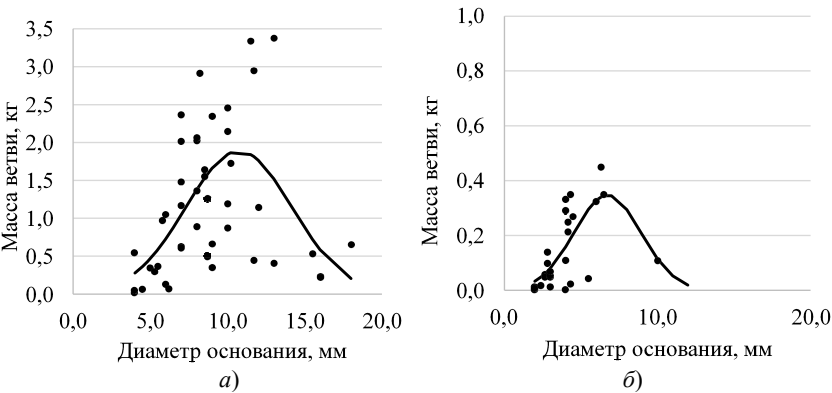


Рис. 5. Зависимость массы межмутовочных ветвей деревьев ели первого (а) и четвертого (б) классов роста от диаметров оснований

Fig. 5. Dependence of the mass of the branches in interwhorl range of spruce trees of the first (a) and fourth (b) growth classes on the diameters of the bases

*Выводы.* Проведенный анализ закономерностей размерно-весовых показателей межмутовочных ветвей ели европейской показал, что у деревьев разных классов роста наблюдается существенное различие между ними. Так, деревья IV класса роста характеризуются сравнительно меньшими размерами, массой, а также продолжительностью жизни ветвей. Полученные данные могут быть использованы при разработке методики выращивания деревьев ели, направленной на минимизацию количества сучьев в стволовой древесине, оценке фитомассы деревьев и ряде других научно-практических задач.

*Сведения о финансировании исследования.* Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

*Конфликт интересов.* Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

### Библиографический список

Алексеев А.С., Лайранд Н.И. К методике дендрэкологического анализа // Ботанический журнал. 1993. Т. 78, № 10. С. 103–107.

Антонов О.И., Гурьянов М.О. Строение кроны ели европейской в культурах в связи с выращиванием высококачественной древесины. Монография (научное издание) «Рациональное природопользование и биоразнообразие экосистем». Пенза: РИО ПГАУ, 2020. С. 43–63.

Вороницын К.И., Гугелев С.М. Машинная обрезка сучьев на лесосеке. М.: Лесн. пром-ть, 1989. 168 с.

Галицкий В.В. Модели динамики дерева и сообщества деревьев: развитие от двухмерных к трехмерным моделям // Матем. биология и биоинформ. 2012. Т. 7, вып. 1. С. 54–80.

Гурьянов М.О., Антонов О.И., Джикович Ю.В. Зависимость размерно-весовых показателей ветвей деревьев ели европейской от их фитоценотического состояния // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020. Вып. 233. С. 6–18.

Казмиров Н.И., Волков А.Д., Зябченко С.С., Иванчиков А.А., Морозова Р.М. Обмен веществ и энергии в сосновых лесах Европейского Севера. Л.: Наука, 1977. 304 с.

Карчаускас С.А. Индивидуальный уход в насаждениях лесов первой группы : автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. Минск. 1958. С. 16.

Кузнецов А.Н., Величко Я.М., Старостин В.А. Особенности формирования крон сосны и ели // Лесн. хоз-во. 1986. № 12. С. 23–26.

Молчанов А.А. Гидрологическая роль сосновых лесов на песчаных почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1952. 488 с.

Полубояринов О.И. Влияние лесохозяйственных мероприятий на качество древесины. Л.: ЛТА, 1974. 96 с.

Полякова Н.Ф. Соотношение между массой листвы, приростом древесины и транспирацией // ДАН СССР. 1954. Т. 96. № 6. С. 1261–1263.

Усольцев В.А. Фитомасса и первичная продукция лесов Евразии. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. 570 с.

Усольцев В.А. Формирование банков данных о фитомассе лесов. Екатеринбург: УрО РАН, 1998. 541 с.

Феклистов П.А., Токавина О.Н. Особенности ассимиляционного аппарата, водного режима и роста деревьев сосны в осушенных сосняках : монография. Архангельск : САФУ, 2014. 179 с.

Феклистов П.А., Хабарова Е.П. Ассимиляционный аппарат деревьев сосны на осушенных и избыточно увлажненных почвах : монография. Архангельск : САФУ, 2017. 141 с.

Цельникер Ю.Л. Структура кроны ели // Лесоведение. 1994. № 4. С. 35–44.

Яблоков А.С. Культура лиственницы и уход за насаждениями. М.: Гослестехиздат, 1934а. 128 с.

Arvidson A. Stamkvistning av *Pinus contorta* – teknik // Sver. skogsvardsforb. fidskr. 1985. No. 6. P. 35–36.

Ford E.D. High productivity in a polestage *Sitka spruce* stand and its relation to canopy structure // Forestry. 1982. Vol. 55, no. 1. P. 1–17.

Fujimori T. Primary productivity of a young *Tsuga heterophylla* stand and some speculations about biomass of forest communities on the Oregon coast. USDA Forest Service. Research paper PNW – 123. 1971. 11 p.

Kallio P. The essence of biology in the North // Nordia. 1984. Vol. 18 (2). P. 53–65.

Kraft G. Beiträge zur Lehre von den Durchforstungen, Schlagstellungen und Lichtungshieben. Hannover: Klindworth's Verlag, 1884. 147 p.

Kramer H. Relation between crown parameters and volume increment of *Picea abies* stands damaged by environmental pollution // Scand. J. Forest Res. 1986. Vol. 1, no. 2. P. 251–263.

Madgwick H.A.I., Tamm C.O. Crown development in young *Picea abies* stands // Scand. J. Forest Res. 1986. 1. No. 2. P. 195–204.

Pollarschutz J. Lebensraum für kraftige baume. Burchforsten nutzt dem Menschen und dem Wald // Pap. Osterr. 1994. No. 4. P. 15–19.

Rutter A.J. Studies in the growth of young plant of *Pinus sylvestris* L. I. The annual cycle of assimilation and growth // Annals of Botany. 1957. Vol. 21. P. 399–425.

Satoo T., Madgwick H.A.I. Forest Biomass. Martinus Nijhoff / Dr. W. Junk Publishers, 1982. 152 p. (Forestry Science, No. 6).



## References

Alekseev A.S., Lairand N.I. On the methodology of dendroecological analysis. *Botanical Magazine*, 1993, vol. 78, no. 10, pp. 103–107. (In Russ.)

Antonov O.I., Guryanov M.O. The structure of the crown of the European spruce in cultures in connection with the cultivation of high-quality wood. Monograph (scientific publication) «Rational nature management and biodiversity of ecosystems». Penza: RIO PGAU. 2020, pp. 43–63. (In Russ.)

Arvidson A. Stamkvistning av *Pinus contorta* – teknik. Sver. skogsvårdsförb. fidskr., 1985, no. 6, pp. 35–36.

Feklistov P.A., Khabarova E.P. Assimilation apparatus of pine trees on drained and excessively moistened soils : monograph. Arkhangelsk: SAFU, 2017. 141 p. (In Russ.)

Feklistov P.A., Tyukavina O.N. Features of assimilation apparatus, water regime and growth of pine trees in drained pine forests: monograph. Arkhangelsk: SAFU, 2014. 179 p. (In Russ.)

Ford E.D. High productivity in a polestage *Sitka spruce* stand and its relation to canopy structure. *Forestry*, 1982, vol. 55, no. 1, pp. 1–17.

Fujimori T. Primary productivity of a young *Tsuga heterophylla* stand and some speculations about biomass of forest communities on the Oregon coast. USDA Forest Service. Research paper PNW – 123. 1971. 11 p.

Galitsky V.V. Models of tree dynamics and tree communities: development from two-dimensional to three-dimensional models. *Matem. biology and bioinform*, 2012, vol. 7, iss. 1, pp. 54–80. (In Russ.)

Guryanov M.O., Antonov O.I., Djikovich Yu.V. The dependence of the size and weight indicators of branches of European spruce trees on their phytocenotic state. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2020, no. 233, pp. 6–18. (In Russ.)

Kallio P. The essence of biology in the North. *Nordia*, 1984, vol. 18 (2), pp. 53–65.

Karchauskas S.A. Individual care in forest plantations of the first group: author. diss. ... cand. sciences. Minsk, 1958. 16 p. (In Russ.)

Kazimirov N.I., Volkov A.D., Zhabchenko S.S., Ivanchikov A.A., Morozova R.M. Metabolism and energy in pine forests of the European North. L.: Nauka, 1977. 304 p. (In Russ.)

Kraft G. Beiträge zur Lehre von den Durchforstungen, Schlagstellungen und Lichtungshieben. Hannover: Klindworth's Verlag, 1884. 147 p.

Kramer H. Relation between crown parameters and volume increment of *Picea abies* stands damaged by environmental pollution. *Scand. J. Forest Res.*, 1986, vol. 1, no. 2, pp. 251–263.

Kuznetsov A.N., Velichko Ya.M., Starostin V.A. Features of the formation of pine and spruce crowns. *Forestry*, 1986, no. 12, pp. 23–26. (In Russ.)

Madgwick H.A.I., Tamm C.O. Crown development in young *Picea abies* stands. *Scand. J. Forest Res.*, 1986, 1, no. 2, pp. 195–204.

*Molchanov A.A.* Hydrological role of pine forests on sandy soils. M.: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1952. 488 p. (In Russ.)

*Pollarschutz J.* Lebensraum für kraftige baume. Burchforsten nutzt dem Menschen und dem Wald. *Pap. Osterr.*, 1994, no. 4, pp. 15–19.

*Poluboyarinov O.I.* Impact of forestry activities on wood quality. L.: LTA, 1974. 96 p. (In Russ.)

*Polyakova N.F.* The relationship between the mass of foliage, wood growth and transpiration. *DAN SSSR*, 1954, vol. 96, no. 6, pp. 1261–1263. (In Russ.)

*Rutter A.J.* Studies in the growth of young plant of *Pinus sylvestris* L. I. The annual cycle of assimilation and growth. *Annals of Botany*, 1957, vol. 21, pp. 399–425.

*Satoo T., Madgwick H.A.I.* Forest Biomass. Martinus Nijhoff / Dr. W. Junk Publishers, 1982. 152 p. (Forestry Science, No. 6).

*Usoltsev V.A.* Formation of data banks on the phytomass of forests. Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 1998. 541 p. (In Russ.)

*Usoltsev V.A.* Phytomass and primary production of Eurasian forests. Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2010. 570 p. (In Russ.)

*Voronitsyn K.I., Gugelev S.M.* Machine pruning of branches in the cutting area. M.: Forest industry, 1989. 168 p. (In Russ.)

*Yablokov A.S.* Larch culture and plant care. M.: Goslestekhzizdat, 1934. 128 p. (In Russ.)

*Zelniker Yu.L.* Structure of the spruce crown. *Forest science*, 1994, no. 4, pp. 35–44. (In Russ.)

*Материал поступил в редакцию 02.10.2023*

---

**Гурьянов М.О., Антонов О.И.** Изменчивость размерно-весовых показателей межмутовочных ветвей деревьев ели европейской различных классов роста // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 250. С. 6–22. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.6-22

Интенсивное лесовыращивание подразумевает проведение регулярных рубок ухода, а также выполнение многоприемной обрезки ветвей для получения высококачественной бессучковой древесины. При этом производительность работ, связанная с ее формированием, во многом зависит от количественных параметров кроны: числа живых и сухих ветвей в мутовке и межмутовочном пространстве, диаметров ветвей, количества мутовок и др. По этой причине, изучение архитектоники кроны является важным элементом лесоводственных и экологических исследований. Статистический анализ, проведенный на основании данных о размерных показателях 223 живых ветвей, расположенных в 104 межмутовочных пространствах, их доле от общего количества,

включающего сухие ветви, а также о весовых показателях средних по межмутовочным пространствам ветвей деревьев ели европейской, позволил выявить наличие существенных различий в длинах, диаметрах оснований и массе ветвей, а также продолжительности их жизни у деревьев разных классов роста. Так, деревья четвертого класса роста характеризуются сравнительно меньшими размерами и массой, а также продолжительностью жизни ветвей. Методом регрессионного анализа было установлено, что для описания возрастной динамики размерных показателей межмутовочных ветвей может быть использована логистическая ростовая кривая. Динамика весовых показателей при движении от вершины кроны к основанию дерева с высокой точностью описывается экспоненциальной моделью, а доли живых ветвей – моделью Гомпертца. Выявленные закономерности в дальнейшем могут быть использованы при разработке методики выращивания деревьев ели, в частности, определении интенсивности обрезки ветвей, направленной на минимизацию количества сучьев в стволовой древесине, оценке фитомассы деревьев и ряде других научно-практических задач.

**Ключевые слова:** ель европейская, размерно-весовые параметры, межмутовочные ветви.

**Guryanov M.O., Antonov O.I.** Variability of size-weight parameters of interwhorl branches of European spruce trees of different growth classes. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 250, pp. 6–22 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.6-22

Intensive reforestation involves carrying out regular thinning, as well as performing multi-stage pruning for getting high-quality knot-free timber. At the same time, the productivity of work associated with its formation largely depends on the quantitative parameters of the crown: the number of living and dry branches in the whorl and interwhorl range, the diameters of the branches, the number of whorls, etc. Therefore, the study of crown architectonics is an important element of silvicultural and environmental research, since the economic impact largely determines the process of species competition in the forest ecosystem. Statistical analysis carried out on the basis of data on the size indicators of 223 living branches located in 104 interwhorl ranges, their share of the total number, including dry branches, as well as the weight indicators of the average by interwhorl spaces of Norway spruce tree branches, revealed the presence of significant differences in lengths, base diameters and weight of branches, as well as their life expectancy in trees of different growth classes. Thus, trees of the fourth growth class are characterized by comparatively smaller size and weight, as well as the lifespan of the branches. Using regression analysis, it was found that a logistic growth curve can be used to describe the age-related dynamics of the size indicators of interwhorl branches. The dynamics of weight indicators by moving from the top of the crown to the base of the tree is described with high accuracy by an

exponential model, and the proportion of living branches – by the model of Gompertz. The identified patterns can be used in developing of methods for growing spruce trees, in particular, determining the intensity of pruning of branches aimed at minimizing their number in the stem wood, assessing the phytomass of trees and a number of other scientific and practical tasks.

**Keywords:** European spruce, sized and weight parameters, interwhorl branches.

---

**ГУРЬЯНОВ Михаил Олегович** – доцент кафедры лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-code: 2801-5477.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: m-bear2004@mail.ru

**GURYANOV Mikhail O.** – PhD (Agriculture), Associate Professor of the Department of Forest Taxation, Forest Inventory and Geographic Information Systems St.Petersburg State Technical University. SPIN-code: 2801-5477.

194021. Institutskiy per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: m-bear2004@mail.ru

**АНТОНОВ Олег Иванович** – доцент, профессор кафедры общей экологии, анатомии и физиологии растений Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор сельскохозяйственных наук.

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

**ANTONOV Oleg I.** – DSc (Agriculture), Professor of the Department of General Ecology, Anatomy and Physiology of the Plants St.Petersburg State Technical University.

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

**Е.Е. Лукашик, А.С. Алексеев**

**ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ КАРТИРОВАНИЕ  
И ТИПОЛОГИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ  
ОХОТНИЧЬИХ УГОДИЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ  
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

*Введение.* Охотничье хозяйство России является по праву одной из важнейших традиционных форм природопользования и на сегодняшний день как отрасль экономики и деятельности людей направлено на сохранение и использование охотничьих ресурсов и среды их обитания. С середины XX века и до 80-х годов XX века охотничье хозяйство нашей страны прошло путь становления и развития в связи с увеличением подготовки охотоведов, экспортных закупочных цен на пушную продукцию, созданием государственного управленческого аппарата и приносило до четвертой части доходов государства, обеспечивая при этом рабочие места, охрану окружающей среды и статус ведущей «пушной державы» [Винобер, 2019; Мельников и др., 2007]. Далее охотничье хозяйство претерпевало упадок, как в организационно-управленческой части, так и в части нормативно-правового регулирования, что стало сдерживать и ограничивать экономический рост и развитие отрасли.

В 2009 году был принят Федеральный закон № 209-ФЗ «Об охоте и о сохранении охотничьих ресурсов и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», определяющий основные положения и принципы регулирования охотничьей деятельности, в том числе основные мероприятия по сохранению охотничьих ресурсов и среды их обитания. В число таких мероприятий входит Государственный мониторинг охотничьих ресурсов и среды их обитания (далее – Государственный мониторинг). Государственный мониторинг представляет собой систематические наблюдения за состоянием популяций животных, отнесенных к охотничьим ресурсам: за их численностью, распространением, объемами изъятия их из естественной среды обитания, а также наблюдения за состоянием самой среды обитания охотничьих ресурсов. Структура данной системы наблюдений отражена в Приказе Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 27.07.2021 г.

№ 512 «Порядок осуществления государственного мониторинга охотничьих ресурсов и среды их обитания и применения его данных».

Пункт 3.5 Приказа Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 27.07.2021 г. №512 гласит о том, что при осуществлении Государственного мониторинга охотничьих ресурсов и среды их обитания не реже одного раза в 10 лет проводится оценка элементов среды обитания охотничьих ресурсов с формированием достоверных сведений о распределении площадей охотничьих угодий на категории и классы среды обитания как в границах охотничьих хозяйств, так и по субъектам Российской Федерации в целом. Сведения, полученные в результате оценки элементов среды обитания охотничьих ресурсов, являются основой для формирования региональных Схем размещения, использования и охраны охотничьих угодий на территории субъекта Российской Федерации в части определения размещения категорий и классов среды обитания охотничьих ресурсов, их площадных характеристик, а далее – для определения площадей угодий, свойственных определенному виду охотничьего животного, и расчета класса бонитета данного охотничьего угодья [Греков, 2021; Смирнов, 2022].

Важность осуществления Государственного мониторинга подчеркнута в «Стратегии развития охотничьего хозяйства в Российской Федерации до 2030 года», утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 3 июля 2014 г. №1216-р; отмечается, что Государственный мониторинг является инструментом формирования устойчивого и рационального использования охотничьих ресурсов, а также инструментом для сохранения среды обитания охотничьих ресурсов и их биологического разнообразия. Ряд авторов [Цындыжапова и др., 2021; Мышляков, 2013; Греков, 2018] отмечает, что при решении задач повышения информационной и научной обеспеченности охотничьего хозяйства, предусмотренных Стратегий развития охотничьего хозяйства в Российской Федерации до 2030 года, наиболее действенным является инвентаризация современного состояния среды обитания охотничьих животных на единой методологической основе, в том числе при проведении мониторинга с применением данных дистанционного зондирования поверхности Земли, аэрофотосъемки охотничьих ландшафтов и геоинформационного анализа. Однако при мониторинге, анализе и типологической оценке охотничьих угодий с применением данных дистанционного зондирования Земли ДЗЗ и геоинформационных систем (ГИС) в недостаточной мере решены вопросы методики дешифрирования и автоматизированной классификации территории угодий с привязкой к элементам среды обитания охотничьих ресурсов.

*Объект и методика исследования.* Материалами для исследования являются научные публикации отечественных и зарубежных авторов по теме применения данных дистанционного зондирования Земли (данных ДЗЗ) и ГИС технологий в практике охотничьего и лесохозяйственного хозяйств. В ходе исследования проведен анализ наиболее актуальных методов обработки и алгоритмов компьютерного анализа данных ДЗЗ, применимых для геоинформационного картирования и типологической оценки охотничьих угодий.

Объектом исследования для апробации рассмотренных методов геоинформационного картирования и типологической оценки охотничьих угодий является охотничье хозяйство НП «Охотничье хозяйство «Ольгино» (участок №2) Маловишерского муниципального района Новгородской области. Обработка геопространственной информации проводилась с применением общепринятых методов геоинформатики [Борзов и др., 2016; Бучнев, Пяткин, 2017; Шихов и др., 2020; Алексеев, 2022; Черниховский, 2022] и учетом требований ГОСТ Р 50828-95 Геоинформационное картографирование. Пространственные данные, цифровые и электронные карты. Общие требования.

Современные методы мониторинга, оценки состояния лесных ландшафтов и инвентаризации лесов с применением дистанционного зондирования Земли и ГИС-технологий представлены в научных трудах профессоров: В.И. Сухих, Е.А. Лупяна, А.В. Любимова, В.А. Малинникова, А.С. Алексеева, Д.М. Черниховского, а также Р.В. Котельникова, В.П. Саворского [Сухих, 2005; Малинников, 2006; Лупян и др., 2015; Алексеев и др., 2017; Саворский и др., 2017; Любимов и др., 2018]. Указанными авторами рассматриваются различные вопросы, касающиеся методик применения ДЗЗ и геоинформационных систем в определении таксационных показателей лесных насаждений, экологической оценки состояния лесов под воздействием антропогенных факторов дистанционными методами, автоматизированной классификации данных спутниковой съемки для формирования тематических карт.

Неотъемлемой частью изучения ландшафтов и мониторинга их состояния с помощью данных дистанционного зондирования Земли является дешифрирование и автоматизированная классификация растровых изображений. Инструментами дешифрирования являются различные программные средства обработки данных дистанционного зондирования Земли, а результат напрямую зависит от используемых методик [Али и др., 2020; Фан и др., 2021]. В основном методы классификации основываются на пиксельной классификации изображений (pixel-based classification – РВС), полученных с помощью спутниковой съемки и аэрофотосъемки

в различных оптических диапазонах. Чаще всего в данном случае применяется классификация, основанная на максимальном правдоподобии. Такая классификация может быть проведена с обучением или без обучения, а также может сочетать оба метода сразу. Для того, чтобы преодолеть ограниченность применения только спектральной информации с изображений, полученных при помощи дистанционного зондирования Земли, возможно использовать классификацию, которая основывается на объектах и сегментах в целом, а не только на отдельных пикселях. Речь идет об объектной классификации (object-based classification – OBC), которая основывается на формировании иерархической сети объектов, являющихся однородными, с учетом границ признаков классификации. В процессе сегментации учитываются различные типы данных на всем изображении, включая как значения пикселей, так и контекстную информацию, особенности размещения объектов и взаимосвязи между ними [Whiteside et al., 2011].

Основанная на пикселях классификация управляемых изображений определяет класс каждого пикселя изображения путём сравнения п-мерного вектора данных пикселя с вектором модели для каждого класса. Как правило, векторы данных состоят из пикселей со значениями серого уровня из мультиспектральных каналов. Классификация максимального правдоподобия является наиболее широко используемым методом для пиксельной классификации.

Объектный метод принимает во внимание форму, текстуру и спектральную информацию. Классификация по данному методу начинается с важнейшего первого шага группировки соседних пикселей в области, которые затем могут быть использованы на стадии классификации после. Объектный метод классификации не может напрямую работать с отдельными пикселями, но может быть использован для создания однородных объектов изображения через процесс сегментации [Yang et al., 2009; Xin Pan et al., 2021]. При этом сегментация изображения определяется как идентификация однородных признаков на изображении, на основе полученного идентификатора, и производится последующая классификация сегментов в рамках изображения дистанционного зондирования. Существуют два вида принципов сегментации: нисходящий и восходящий. Нисходящая сегментация включает в себя разделение крупного региона на более мелкие части, в то время как восходящая сегментация предполагает интеграцию мелких элементов в более крупные.

В течение последнего десятилетия описано довольно большое количество методик ландшафтных исследований, в которых применяются так



называемые ландшафтные индексы (метрики). Данные индексы, рассчитанные с помощью алгоритмов, реализованных в программном обеспечении ГИС, основываются на пространственной информации в форме векторных топографических карт, тематических карт или других картографических материалов в области лесного, сельского хозяйства, землепользования и характеристики земного покрова (Land Use and Land Cover – LULC) [Усова, 2007; Украинский и др., 2017]. При этом ландшафтные индексы могут быть определены при векторизации растровых карт на основе таких характеристик элементов ландшафтов, как структура, форма и фрагментация.

Для расчета вышеобозначенных характеристик используются такие показатели, как общая площадь ландшафтов, общее количество контуров в границах ландшафта, их периметр, индексы среднего расстояния между контурами. Они отражают различные особенности ландшафта, прежде всего его состав, структуру и пространственную конфигурацию, а также позволяют на основе многовременных рядов геоданных определять динамику изменений, происходящих в анализируемом ландшафте при появлении новых элементов ландшафта в результате его фрагментации или полного исчезновения таких элементов. Полученные таким образом ландшафтные индексы могут быть использованы при объектно-ориентированной автоматизированной классификации ландшафтов на основе данных дистанционного зондирования Земли.

Для классификации ландшафтов с применением метода максимально-го правдоподобия в большей мере подходят получаемые индексы на основе определяемых спектральных коэффициентов яркости природных и антропогенных объектов в результате анализа многозональной аэрокосмической съемки [Елсаков и др., 2005; Братков и др., 2016].

Опыт применения данных дистанционного зондирования Земли в проведении охотустроительных работ отражен в публикациях Е.В. Самсонова, П.В. Царева, С.Д. Цындыжаповой [Самсонов и др., 2017; Царев и др., 2020; Цындыжапова и др., 2021]. Авторы отмечают, что применение методов классификации мультиспектральных спутниковых снимков позволяет решать задачи по типологической классификации охотничьих угодий с минимизацией трудовых и финансовых затрат в сравнении с традиционными формами проведения охотустроительных работ и наземными обследованиями значительных по площади территорий. Данные мультиспектральной спутниковой съемки с достаточной степенью достоверности отражают многообразие форм ландшафтов, в том числе антропогенно-измененных, таких как агроценозы, карьеры, населенные пункты, а также свойства растительности и водных объектов.

Изучение зарубежных научных трудов по теме типологической классификации охотничьих угодий с применением данных дистанционного зондирования Земли [Radeloff et al., 1999; Gerrard et al., 2001; Clevenger et al., 2002; Chan-Ryul & Woo-Shin, 2003; Suchant et al., 2003; Kunovac & Omanović, 2012] показало, что данные ДЗЗ и геоинформационные системы стали важнейшими инструментами оценки пригодности и качества местообитаний охотничьих ресурсов. В статьях отечественных и зарубежных исследователей довольно часто упоминаются преимущества использования значений нормализованного разностного индекса растительности (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI) с целью определения динамики развития растительности в какой-либо вегетационный период, а также для оперативного определения санитарного состояния растительности и прогнозирования ее развития, смены одних растительных сообществ на другие и т. д. Индекс может быть использован также для прогнозирования распространения охотничьих ресурсов в зимний период года. В данном случае нормализованный разностный индекс растительности (NDVI) является показателем территориального размещения и использования животными кормовых и защитных участков в зависимости от времени года [Pettorelli et al., 2007; Hamel et al., 2009; Jaskula et al., 2018]. Комплексное применение таких данных дистанционного зондирования Земли, как цифровые модели рельефа и цифровые модели местности (ЦМР и ЦММ), а также плотные облака точек, полученные с помощью лидарной съемки, позволяют с большей точностью выявлять ландшафтные особенности, определяющие уровень защитных и кормовых свойств охотничьих угодий [Grzegorz et al., 2020]. Однако данные методы в большей степени подходят для обследования небольших площадей или определения эталонных участков с дальнейшей обучаемой классификацией спутниковых снимков.

*Результаты исследования.* Ведение охотничьего хозяйства в значительной степени связано с лесным хозяйством и лесопользованием. В связи с этим, многие методики применения данных дистанционного зондирования Земли в охотустроительных работах, отраженные в рассмотренных публикациях авторов, также актуальны и для оценки состояния охотничьих угодий. Однако существенные различия в подходах к выделению различных ландшафтов, отличных от лесных – категорий мест обитания охотничьих угодий (водные объекты, пойменные комплексы, сельхозугодья и др.) требуют иного методологического подхода к применению и обработке данных дистанционного зондирования Земли.

Исследования по изучению возможностей геоинформационного картирования и типологической оценки местообитаний на основе данных дистанционного зондирования Земли проводились в условиях охотничьего хозяйства НП «Охотничье хозяйство «Ольгино» (участок №2), расположенного в юго-восточной части Маловишерского муниципального района Новгородской области. Протяженность охотничьего угодья с запада на восток составляет около 10 км, с севера на юг – около 15 км; общая площадь участка составляет 7,627 тыс. га. Далее приведена характеристика почвенных и гидрологических условий исследуемого охотничьего хозяйства.

Высота поверхности над уровнем моря в восточной части охотничьего хозяйства колеблется от 70 до 110 метров. Основная часть исследуемой территории характеризуется неоднородностью рельефа с неравномерным размещением почвообразующих материнских пород, которое обуславливает разнообразие почв.

Развитию подзолистого и болотного процессов почвообразования способствует значительное годовое количество осадков и слабое испарение; значительное распространение имеют почвы избыточного увлажнения и болота. Основной водной артерией на территории хозяйства является река Мста, одновременно являющейся западной границей хозяйства. Протяженность р. Мста в границах исследуемого хозяйства составляет 16 км, ширина 50–70 м. Весенние разливы р. Мста формируют пойменные комплексы и привлекают значительное количество пролетной водоплавающей дичи. По гидрологическому режиму данная река относится к восточно-европейскому типу с преимущественно снеговым питанием с характерным высоким уровнем половодья и низкой летней межени и устойчивой зимней меженью [Дмитрук и др., 2009]. Площадь половодья р. Мста на территории охотничьего хозяйства невелика ввиду высокого берега реки.

Другими основными водотоками на территории охотничьего хозяйства является р. Веребушка (ширина – 5–8 м, глубина – 1,8–2,0 м) с притоками и менее значимые мелкие реки и ручьи. Характерной чертой рек является извилистость русла, порожистость и атмосферное питание. Озера на территории охотничьего хозяйства не представлены.

Территория охотничьего хозяйства НП «Охотничье хозяйство «Ольгино» (участок № 2) расположена на стыке подзоны южной тайги и зоны хвойно-широколиственных лесов. В настоящее время коренные леса в значительной степени вырублены, на их месте формируются вторичные мелколиственные леса – берзовые и осиновые.

При проведении охотустроительных работ выполняется типологическая классификация охотничьих угодий и комплексная качественная оцен-

ка элементов среды обитания охотничьих ресурсов на территории охотничьих угодий, при этом учитываются антропогенные, биотехнические и абиотические факторы, оказывающие влияние на распространение популяций охотничьих животных и их жизнедеятельность.

Типологическая классификация элементов среды обитания охотничьих ресурсов на территории охотничьего хозяйства НП «Охотничье хозяйство «Ольгино» (участок №2) проводилась с учетом требований действующего Приказа Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 31 августа 2010 года №335 (с изменениями на 29 августа 2018 года) «Об утверждении порядка составления схемы размещения, использования и охраны охотничьих угодий на территории субъекта Российской Федерации, а также требований к ее составу и структуре». Типологическая классификация и геоинформационное картографирование основывалась на методе комплексного использования алгоритмов автоматизированной классификации спутниковых снимков и материалов лесоустройства с дальнейшей постобработкой получаемых данных в геоинформационной системе.

Для автоматизированной классификации были выбраны снимки с искусственного спутника Земли Sentinel-2 L2A с проведенной атмосферной коррекцией через сервис Sentinel Hub EO Browser. Дата съемки – весенний период 23.05.2022 г. и летний период 29.06.2022 г., облачность от 1,0 до 2,0% на квадрат съемки 36VVL MGRS location, координаты центра объекта исследования 58.54691151°, 32.54430744°, пространственное разрешение – 10 м/пикс. Была принята следующая комбинация каналов спутникового снимка: B08 (ближний инфракрасный – БИК), B04 (красный – К), B02 (зеленый – З). Интерпретация комбинаций каналов и дешифрирование спутниковых снимков основывались на данных, представленных на портале «Географические информационные системы и дистанционное зондирование GIS-Lab» (<https://gis-lab.info/>), а также в литературных источниках [Шихов и др., 2020].

Синтез каналов БИК, К, З аддитивным способом создает изображение с так называемой «ложной цветопередачей». Такой вариант синтеза в основном применяется для изучения состояния растительного покрова, как древесного, так и травянистого, в том числе и сельскохозяйственных культур. Хвойные лесные насаждения на спутниковых снимках отображаются темно-красным цветом с оттенком коричневого, лиственные и смешанные леса с преобладанием лиственных пород отображаются более ярким красным цветом. Кустарники и травянистая растительность имеет ярко красный, алый цвет. Однако данная комбинация каналов также хорошо подходит для дешифрирования водных объектов, отображаемых черным цветом,

и элементов открытой почвы (например, незасеянные пашни), городской застройки, асфальтированных автомобильных дорог и железнодорожных путей, отображаемых в зелено-голубом цвете с оттенками коричневого.

Пойменные комплексы на территории объекта исследования выделялись путем создания временного композита из спутникового снимка весеннего периода 23.05.2022 г. во время высокого уровня воды в реках и затопления пойм и спутникового снимка летнего периода 29.06.2022 г. во время спада уровня воды в реках и усыхания пойм и устьев.

Для автоматизированной классификации спутникового снимка подбирались эталонные участки (не менее 3–5 на каждый из классифицируемых элементов среды обитания охотничьих ресурсов) на основе данных лесоустройства, формируемых через средства реализации запросов программного комплекса WinPLP с создаваемыми условиями отбора информации через функции для учета таких показателей, как доля хвойных или лиственных пород, высоты деревьев (для молодняков), наличия верховых, низинных болот, гарей, ветровалов и вырубок на территории лесного фонда. Дешифрирование и отбор эталонных участков по землям, не входящим в лесной фонд (населенные пункты, сельскохозяйственные земли, внутренние водные объекты, карьеры, рудеральные территории), осуществлялись по спутниковым снимкам высокого разрешения сервиса Google Earth с датой съемки 05.06.2019 г. с пространственным разрешением 2 м в программном обеспечении SAS.Planet [Зенкин, 2012].

В качестве инструмента классификации спутникового снимка был выбран плагин QGIS dzetsaka: Classification tool (<https://plugins.qgis.org/plugins/dzetsaka/>) с алгоритмом классификации по модели смеси Гауссовских распределений Gaussian Mixture Model (GMM). После выполненной классификации полученная растровая тематическая карта с отображением элементов среды обитания охотничьих ресурсов была векторизована для определения площадей. Далее была выполнена постобработка векторной тематической карты элементов среды обитания охотничьих ресурсов для уточнения границ элементов, приведения тематической карты к виду, пригодному для практического использования и повышения ее наглядности.

В связи с тем, что на территории исследуемого охотничьего хозяйства в большей степени представлены элементы среды обитания охотничьих животных, относящиеся к землям лесного фонда, контроль достоверности полученных данных о площадях осуществлялся на основе материалов лесоустройства и планов лесных насаждений Маловишерского лесничества Веребьинского уч. лесничества. Результаты представлены в таблице и на рисунке.

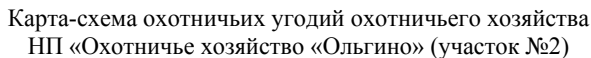
**Элементы среды обитания охотничьих ресурсов охотничьего хозяйства НП  
«Охотничье хозяйство «Ольгино» участок № 2**

**Elements of the habitat for hunting resources of the hunting farm «Olgiно» plot No. 2**

№ п/п.	Категория среды обитания охотничьих ресурсов	Классы среды обитания охотничьих ресурсов	Площадь, га	Доля от общей площади охот-хозяйства, %
1	Леса (территории, покрытые кронами древесной и древесно-кустарниковой растительности более чем на 20% площади и с высотой растений более 5 м)	Хвойные леса вечно-зеленые (хвойных вечнозеленых пород более 80%)	351,8	4,6
		Мелколиственные леса (мелколиственных пород более 80%)	1995,2	26,2
		Смешанные леса с преобладанием хвойных пород (хвойных пород 60–80%)	856,9	11,2
		Смешанные леса с преобладанием мелколиственных пород (мелколиственных пород 60–80%)	2739,8	35,9
		Смешанные леса с присутствием широколиственных пород (широколиственных пород менее 30%)	2,3	0,1
2	Молодняки и кустарники (территории, покрытые кронами древесной и древесно-кустарниковой растительности более чем на 20% площади и с высотой растений до 5 м)	Вырубки и зарастающие поля	345,1	4,5
		Хвойные вечнозеленые молодняки	152,2	2,0
		Лиственные молодняки и кустарники	524,3	6,9
3	Болота (территории, постоянно или большую часть года избыточно насыщенные водой и покрытые специфической гигрофитной растительностью)	Болота верховые	114,5	1,5
		Болота травяные	84,0	1,1

Окончание таблицы

№ п/п.	Категория среды обитания охотничьих ресурсов	Классы среды обитания охотничьих ресурсов	Площадь, га	Доля от общей площади охотхозяйства, %
4	Сельскохозяйственные угодья (территории, вовлеченные в сельскохозяйственный оборот – пашни (в т. ч. заливн.), залежи, сенокосы)	Пашни	11,0	0,1
		Луга сельскохозяйственного назначения (сенокосы и пастбища)	207,3	2,7
5	Внутренние водные объекты (все акватории водотоков (рек, ручьев, мелиоративных каналов), озер, прудов и водохранилищ)	Водотоки	106,0	1,4
6	Пойменные комплексы (территории, затопляемые в период половодья водотоков, находящиеся между среднестатистическим минимальным и максимальным урезами воды, в т. ч., покрытые древесно-кустарниковой растительностью)	С преобладанием леса (лес более 80%)	5,8	0,1
		С преобладанием травянистой растительности (лес и кустарники до 20%)	44,0	0,6
7	Преобразованные и поврежденные участки (леса, поврежденные пожарами (га-ри), территории ветровалов, торфоразработок, участки с нарушенным почвенным покровом в результате добычи полезных ископаемых и других техногенных воздействий)	Преобразованные и поврежденные участки (участки с нарушенным почвенным покровом в результате добычи полезных ископаемых)	14,8	0,2
8	Непригодные для ведения охотничьего хозяйства (территории, занятые населенными пунктами, промышленными комплексами, рудеральные территории (свалки, кладбища и др.))	Промышленные и рудеральные комплексы, населенные пункты и др.	72,0	0,9
Общая площадь охотничьего угодья		—	7627,0	100,0



Schematic map of hunting grounds of the hunting farm «Olginoy»  
(plot No. 2)

Анализируя полученные результаты, можно заключить, что на территории объекта исследования НП «Охотничье хозяйство «Ольгино» (участок № 2) преимущественно представлены смешанные леса с преоблада-



нием мелколиственных (35,9%), а также мелколиственные леса, в составе которых более 80% мелколиственных пород (26,2%). Хвойные леса вечно-зеленые, а также смешанные леса с преобладанием хвойных пород составляют 4,6 и 11,2% соответственно. Значительную площадь занимают зарастающие поля и территории, покрытые кустарниками, хвойными молодняками – 13,4%.

*Выводы.* Проведенное исследование показало, что преимуществом применения аэрокосмических методов обследования и дистанционного зондирования Земли является возможность переноса значительной части работ по охотустроительному проектированию в камеральные условия, увеличив производительность охотустроительных работ и достоверность получаемых материалов. Преимуществом работы с данными дистанционного зондирования Земли также является возможность неоднократно возвращаться к предмету исследования, проводить дополнительные исследования, уточнять результаты, что достаточно трудно осуществить без дополнительных финансовых затрат при традиционных методах исследований ландшафтов.

Предложенный подход с применением алгоритма автоматизированной классификации мультиспектрального космического снимка и геоинформационной обработки данных позволили успешно выполнить типологическую классификацию элементов среды обитания охотничьих ресурсов с формированием картографического и табличного материала в соответствии с современными нормативными требованиями для территории крупного охотничьего хозяйства Маловишерского района Новгородской области. Результаты автоматизированной классификации уточнены и подтверждены материалами государственного лесного реестра.

Применение геоинформационных систем в проведении охотустроительных работ и ведении охотничьего хозяйства позволяет реализовать качественный анализ состояния среды обитания охотничьих ресурсов, прогнозировать их распространение по территории охотничьих угодий, а также принимать обоснованные решения при проектировании биотехнических мероприятий как с биологической, так и с экономической точки зрения.

При этом предложенный подход может применяться не только для проведения типологической оценки охотничьих угодий, но и в качестве инструмента ландшафтного анализа в практике оперативного и ретроспективного мониторинга природных и антропогенно-измененных территорий, в том числе на землях особо охраняемых природных территорий, сельскохозяйственных землях и землях лесного фонда.

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

### **Библиографический список**

*Алексеев А.С., Михайлова А.А., Черниковский Д.М., Березин В.И.* Метод определения таксационных характеристик насаждений по аэрофотоснимкам сверхвысокого разрешения // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2017. № 2. С. 67–77.

*Алексеев А.С., Никифоров А.А.* Географические информационные системы. СПб.: Изд-во СПбГЛТУ, 2022. 116 с.

*Али М.С., Воробьев О.Н., Курбанов Э.А.* Алгоритм «дерево решений» для классификации лесов Сирийской Арабской Республики по снимку SENTINEL-2 // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2020. № 1 (45). С. 5–30. DOI: 10.25686/2306-2827.2020.1.5

*Борзов С.М., Потатуркин А.О., Потатуркин О.И., Федотов А.М.* Исследование эффективности классификации гиперспектральных спутниковых изображений природных и антропогенных территорий // Автометрия. 2016. 52, № 1. С. 3–14.

*Братков В.В., Кравченко И.В., Туаев Г.А., Атаев З.В., Абдулжалимов А.А.* Применение вегетационных индексов для картографирования ландшафтов Большого Кавказа // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2016. Т. 10. № 4. С. 97–111.

*Бучнев А.А., Пяткин В.П.* Классификация с обучением гиперспектральных данных дистанционного зондирования земли // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. матер. в двух томах. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 2. С. 8–12.

*Винобер А.В.* Охотоведение и охотничье хозяйство: в поисках идентичности, синхронизации и пролиферации идей (к 70-летию факультета охотоведения (1950–2020 гг.) // Гуманитарные аспекты охоты и охотничьего хозяйства. 2019. № 6(18). С. 5–17.

*Греков О.А.* Внедрение геоинформационных технологий в практику охотничьего хозяйства // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем : матер. XIX Всерос. науч.-практич. конференции с междунар. участием, Киров, 25 ноября 2021 года. Киров: Вятский государственный университет, 2021.

*Греков О.А.* Мониторинг среды обитания охотничьих животных с использованием современных космических и авиационных систем // Информация и Космос. 2018. № 2. С. 126–132.

*Дмитрук Н.Г., Широкова В.А., Низовцев В.А., Снытко В.А., Фролова Н.Л., Чеснов В.М., Галкин Ю.С., Озерова Н.А., Широков Р.С.* Мста, Ильмень, Волхов – старейший водный путь Балтийского региона // Устойчивое развитие и геоэко-

логические проблемы Балтийского региона: сб. матер. Междунар. науч.-практич. конференции, посвящ. 1150-летию Великого Новгорода, Великий Новгород, 2009. С. 51–59.

Елсаков В.В., Щанов В.М. Развитие топологических подходов при комплексных ландшафтных исследованиях экосистем Европейского Севера дистанционными методами // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды и потенциально опасных явлений и объектов. 2005. С. 267–272.

Зенкин Г.Ю. Использование карт Google Maps в задаче идентификации точек на спутниковых изображениях среднего пространственного разрешения // I-methods. 2012. № 1.

Лупан Е.А., Барталев С.А., Ершов Д.В. [и др.]. Организация работы со спутниковыми данными в информационной системе дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 222–250.

Любимов А.В., Селиванов А.А., Крючков А.Н. [и др.]. Анализ признаков дешифрирования таксационных показателей лесов с использованием вероятностных методов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20. № 2(82). С. 85–90.

Малинников В.А., Барталев С.С. Возможности региональной экологической оценки лесов по данным спутниковых наблюдений // ИВУЗ. Геодезия и аэрофотосъемка. 2006. № 6. С. 3–18.

Мельников В.В., Мельников В.К. Управление охотничьим хозяйством или охотой // Современные проблемы природопользования, охотоведения и звероводства. 2007. № 1

Мышляков С.Г. Особенности дешифрирования ландшафтов по мультиспектральным космическим снимкам для создания карты элементов среды обитания охотничьих ресурсов // Геоматика. 2013. № 1. С. 53–62.

Остачук А.М. Нормативно-правовая база деятельности охотпользователей в СССР, РСФСР, РФ // Международный журнал теории и научной практики. 2019. Т. 2, № 2. С. 53–67.

Самсонов Е.В., Самсонова А.М., Берлин Н.Г., Симбирцева Ю.В. Выделение таксономических единиц при инвентаризации охотничьего угодья // Агрофорсайт. 2017. № 5(11). С. 3.

Смирнов С.И. Внутрихозяйственное и территориальное охотустройство: современные проблемы и перспективы развития // Охотничье хозяйство и рациональное природопользование в условиях современной глобальной трансформации (Чтения памяти А.А. Силантьева): матер. Всерос. науч.-практ. конференции, Санкт-Петербург, 06 октября 2022 года. СПб.: СПбГЛТУ, 2022.

Сухих В.И. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. 392 с.

Украинский П.А., Терехин Э.А., Павлюк Я.В. Фрагментация лесов верхней части бассейна реки Ворскла с конца XVIII века // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2017. № 1. С. 82–91.

Усова И.П. Оценка фрагментации лесов с использованием ландшафтных индексов (на примере восточно-белорусской ландшафтной провинции) // Актуальные проблемы геоботаники. Мат-лы III Всероссийской школы-конференции. II часть. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. С. 250–253.

Фан Т.К., Нгуен Ч.Т., Алексеев А.С. и др. Применение дистанционных методов и ГИС-технологий для классификации земель Пушкинского района Санкт-Петербурга // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2021. Вып. 235. С. 84–102.

Царев П.В., Есков, Д.В., Тимофеева Е.В. Анализ методов классификации элементов среды обитания территории охотничьего угодья // Агрофорсайт. 2020. № 5(29). С. 29–34.

Цыдыжапова С.Д., Розломий Н.Г., Белов А.Н., Минхайдаров В.Ю. Инвентаризация местообитаний охотничьих животных в угодьях ОО «ВКЛО» Приморского края по результатам мультиспектральных изображений // Мниж. 2021. № 12-2 (114).

Черниковский Д.М. Геоинформационные системы в лесном деле. СПб.: Изд-во СПбГЛТУ, 2022. 88 с.

Шихов А.Н., Герасимов А.П., Пономарчук А.И., Перминова Е.С. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения: учеб. пособие / Пермский государственный национальный исследовательский университет. Электронные данные. Пермь, 2020. 191 с.

Шихов А.Н., Герасимов А.П., Пономарчук А.И., Перминова Е.С. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения: учеб. пособие / Пермский государственный национальный исследовательский университет. Электронные данные. Пермь, 2020. 191 с.

Chan-Ryul P., Woo-Shin L. Development of a GIS-based habitat suitability model for wild boar *Sus scrofa* in the Mt. Baekwoonsan region, Korea // Mammal Study. 2003. 28(1). P. 17–21.

Clevenger A.P., Wierzbowski J., Chruszcz B., Gunson K. GIS-Generated, Expert-Based Models for Identifying Wildlife Habitat Linkages and Planning Mitigation Passages // Conservation Biology. 2002. 16. P. 503–514.

Gerrard R., Stine P., Church R., Gilpin M. Habitat evaluation using GIS: a case study applied to the San Joaquin Kit Fox // Landscape and Urban Planning. 2001. 52. P. 239–255.

Grzegorz, Szewczyk & Lipka, Krzysztof & Wezyk, Piotr & Zięba-Kulawik, Karolina & Winczek, Monika. Methods of Landscape Valorization and Possibilities of Its Application in Hunting Area Categorisation. 10.5772/intechopen.94048, 2020.

Hamel S., Garel M., Festa-Bianchet M., Gaillard J.M., Côté S.D. Spring normalized difference vegetation index (NDVI) predicts annual variation in timing of peak faecal crude protein in mountain ungulates // *J. ApplEcol.* 2009. 46. P. 582–589.

Jaskula J., Sojka M., Wicher-Dysarz J. Analysis of the vegetation Process in a Two-stage Reservoir on the Basis of Satellite Imagery – a Case Study: Razyny Reservoir on the Sama River // *Rocznik Ochrona Środowiska.* 2018. 20. P. 203–220.

Kunovac S., Omanović M. Game habitats modeling. International Conference Structure and dynamics of ecosystems Dinarides – status, possibilities and prospects. 15–16. June 2011. Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, Department of Natural Sciences and Mathematics, Proceedings. 2012. 23. P. 127–134.

Pettorelli N., Pelletier F., von Hardenberg A., Festa-Bianchet M., Cote S.D. Early onset of vegetation growth versus rapid green-up: impacts on juvenile mountain ungulates // *Ecology.* 2007. 88. P. 381–390.

Radeloff V.C., Pidgeon A.M., Hostert P. Habitat and population modelling of roe deer using an interactive geographic information system // *Ecological Modelling.* 1999. 114(2-3). P. 287–304.

Suchant R., Baritz R., Braunisch V. Wildlife habitat analysis: a multidimensional habitat management model // *J. Nat. Conserv.* 2003. 10. P. 253–268.

Whiteside T.G., Boggs G.S., Maier S.W. Comparing object-based and pixel-based classifications for mapping savannas // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.* 2011. Vol. 13, iss. 6. P. 884–893.

Xin Pan, Ce Zhang, Jun Xu, Jian Zhao. Simplified object-based deep neural network for very high resolution remote sensing image classification // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.* 2021. Vol. 181. P. 218–237. URL: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.09.014>.

Yang, He & Ma, Ben & Du, Qian. Decision fusion for supervised and unsupervised hyperspectral image classification // *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS).* 2009. 4. IV-948. 10.1109/IGARSS.2009.5417535.

## References

Alekseev A.S., Mihajlova A.A., Chernihovskij D.M., Berezin V.I. Metod opredeleniya taksacionnyh harakteristik nasazhdenij po aerofotosnimkam sverhvyssokogo razresheniya. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo hozyajstva*, 2017, no. 2, pp. 67–77. (In Russ.)

Alekseev A.S., Nikiforov A.A. Geograficheskie informacionnye sistemy. SPb.: Izd-vo SPbGLTU, 2022. 116 p. (In Russ.)

Ali M.S., Vorob'yov O.N., Kurbanov E.A. Algoritm «derevo reshenij» dlya klassifikacii lesov Sirijskoj Arabskoj Respubliki po snimku SENTINEL-2. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie*, 2020, no. 1 (45), pp. 5–30. DOI: 10.25686/2306-2827.2020.1.5

Borzov S.M., Potaturkin A.O., Potaturkin O.I., Fedotov A.M. Issledovanie effektivnosti klassifikacii giperspektral'nyh sputnikovyh izobrazhenij prirodnyh i antropogennyh territorij. *Avtometriya*, 2016, 52, no. 1, pp. 3–14. (In Russ.)

Bratkov V.V., Kravchenko I.V., Tuaeov G.A., Ataev Z.V., Abdulzhalimov A.A. Primenenie vegetacionnyh indeksov dlya kartografirovaniya landshaftov Bol'shogo Kavkaza. *Izvestiya Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Estestvennye i tochnye nauki*, 2016, iss. 10, no. 4, pp. 97–111. (In Russ.)

Buchnev A.A., Pyatkin V.P. Klassifikaciya s obucheniem giperspektral'nyh dannyh distancionnogo zondirovaniya zemli. *Interekspo GEO-Sibir'-2017. XIII Mezhdunar. nauch. kongr. : Mezhdunar. nauch. konf. «Distancionnye metody zondirovaniya Zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchej sredy, geoekologiiya»* : sb. materialov v 2 t. (Novosibirsk, 17–21 aprelya 2017 g.). Novosibirsk : SGUGiT, 2017, iss. 2, pp. 8–12. (In Russ.)

Carev P.V., Eskov D.V., Timofeeva E.V. Analiz metodov klassifikacii elementov sredy obitaniya territorii ohotnich'ego ugod'ya. *Agroforsajt*, 2020, no. 5(29), pp. 29–34. (In Russ.)

Chan-Ryul P., Woo-Shin L. Development of a GIS-based habitat suitability model for wild boar *Sus scrofa* in the Mt. Baekwoonsan region, Korea. *Mammal Study*, 2003, 28(1), pp. 17–21.

Chernihovskij D.M. Geoinformacionnye sistemy v lesnom dele. SPb.: Izd-vo SPbGLTU, 2022. 88 p. (In Russ.)

Clevenger A.P., Wierzchowski J., Chruszcz B., Gunson K. GIS-Generated, Expert-Based Models for Identifying Wildlife Habitat Linkages and Planning Mitigation Passages. *Conservation Biology*, 2002, 16, pp. 503–514.

Cyndyzhapova S.D., Rozlomij N.G., Belov A.N., Minhajdarov V.Yu. Inventarizaciya mestoobitanij ohotnich'ih zhivotnyh v ugod'yah OO «VKLO» Primorskogo kraja po rezul'tatam mul'tispektral'nyh izobrazhenij. *Mnizh*, 2021, no. 12-2 (114). (In Russ.)

Dmitruk N.G., Shirokova V.A., Nizovcev V.A., Snytko V.A., Frolova N.L., Chesnov V.M., Galkin Yu.S., Ozerova N.A., Shirokov R.S. Msta, Il'men', Volhov – starejsij vodnyj put' Baltijskogo regiona. *Ustojchivoe razvitie i geoekologicheskie problemy Baltijskogo regiona*: sb. mater. Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 1150-letiyu Velikogo Novgoroda. Velikij Novgorod, 2009, pp. 51–59. (In Russ.)

Elsakov V.V., Shchanov V.M. Razvitie topologicheskikh podhodov pri kompleksnyh landshaftnyh issledovaniyah ekosistem Evropejskogo Severa distancionnymi metodami. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. Fizicheskie osnovy, metody i tekhnologii monitoringa okruzhayushchej sredy i potencial'no opasnyh yavlenij i ob"ektov*, 2005, pp. 267–272. (In Russ.)

Fan T.K., Nguen Ch.T., Alekseev A.S. i dr. Primenenie distancionnyh metodov i GIS-tekhnologij dlya klassifikacii zemel' Pushkinskogo rajona Sankt-Peterburga. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2021, no. 235, pp. 84–102. (In Russ.)

Gerrard R., Stine, P., Church, R., Gilpin, M. Habitat evaluation using GIS: a case study applied to the San Joaquin Kit Fox. *Landscape and Urban Planning*, 2001, 52, pp. 239–255.

Grekov O.A. Vnedrenie geoinformacionnyh tekhnologij v praktiku ohotnich'ego hozyajstva. *Biodiagnostika sostoyaniya prirodnih i prirodno-tekhnogennyh sistem* : mater. HIX Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, Kirov, 25 noyabrya 2021 goda. Kirov: Vyatskij gosudarstvennyj universitet, 2021.

Grzegorz Szewczyk & Lipka, Krzysztof & Wezyk, Piotr & Zięba-Kulawik, Karolina & Winczek, Monika. Methods of Landscape Valorization and Possibilities of Its Application in Hunting Area Categorisation. 10.5772/intechopen.94048, 2020.

Hamel S., Garel M., Festa-Bianchet M., Gaillard J.M., Côté S.D. Spring normalized difference vegetation index (NDVI) predicts annual variation in timing of peak faecal crude protein in mountain ungulates. *J. ApplEcol*, 2009, 46, pp. 582–589.

Jaskula J., Sojka M., Wicher-Dysarz J. Analysis of the vegetation Process in a Two-stage Reservoir on the Basis of Satellite Imagery – a Case Study: Razyny Reservoir on the Sama River. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 2018, 20, pp. 203–220.

Kunovac S., Omanović M. Game habitats modeling. International Conference Structure and dynamics of ecosystems «Dinarides – status, possibilities and prospects», 15–16. June 2011, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, Department of Natural Sciences and Mathematics, Proceedings, 2012, 23, pp. 127–134.

Lupyan E.A., Bartalev S.A., Ershov D.V. [i dr.]. Organizaciya raboty so sputnikovymi dannymi v informacionnoj sisteme distancionnogo monitoringa lesnyh pozharov Federal'nogo agentstva lesnogo hozyajstva (ISDM-Rosleskhoz). *Sovremennyye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, iss. 12, no. 5, pp. 222–250. (In Russ.)

Lyubimov A.V., Selivanov A.A., Kryuchkov A.N. [i dr.]. Analiz priznakov deshifirovaniya taksacionnyh pokazatelej lesov s ispol'zovaniem veroyatnostnyh metodov. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*, 2018, iss. 20, no. 2(82), pp. 85–90. (In Russ.)

Malinnikov V.A., Bartalev S.S. Vozmozhnosti regional'noj ekologicheskoy ocenki lesov po dannym sputnikovyh nablyudenij. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Geodeziya i aerofotos"emka*, 2006, no. 6, pp. 3–18. (In Russ.)

Melnikov V.V., Melnikov V.K. Upravlenie ohotnich'im hozyajstvom ili ohotoj. *Sovremennyye problemy prirodopol'zovaniya, ohotovedeniya i zverovodstva*, 2007, no. 1

Myshlyakov S.G. Osobennosti deshifirovaniya landshaftov po multispektral'nym kosmicheskim snimkam dlya sozdaniya karty elementov sredy obitaniya ohotnich'ih resursov. *Geomatika*, 2013, no. 1, pp. 53–62. (In Russ.)

Ostapchuk A.M. Normativno – pravovaya baza deyatelnosti ohotpol'zovatelej v SSSR, RSFSR, RF. *Mezhdunarodnyj zhurnal teorii i nauchnoj praktiki*, 2019, iss. 2, no. 2, pp. 53–67. (In Russ.)

Pettorelli N., Pelletier F., von Hardenberg A., Festa-Bianchet M., Cote S.D. Early onset of vegetation growth versus rapid green-up: impacts on juvenile mountain ungulates. *Ecology*, 2007, 88, pp. 381–390.

Radeloff V.C., Pidgeon A.M., Hostert P. Habitat and population modelling of roe deer using an interactive geographic information system. *Ecological Modelling*, 1999, 114(2-3), pp. 287–304.

Samsonov E.V., Samsonova A.M., Berlin N.G., Simbirceva Yu.V. Vyделение taksonomicheskikh edinic pri inventarizacii ohotnich'ego ugod'ya. *Agroforsajt*, 2017, no. 5(11), p. 3. (In Russ.)

Shihov A.N., Gerasimov A.P., Ponomarchuk A.I., Perminova E.S. i dr. Tematicheskoe deshifirovanie i interpretaciya kosmicheskikh snimkov srednego i vysokogo prostranstvennogo razresheniya: ucheb. posobie; Permskij gosudarstvennyj nacional'nyj issledovatel'skij universitet. Perm', 2020. 191 p. (In Russ.)

Shihov A.N., Gerasimov A.P., Ponomarchuk A.I., Perminova E.S. Tematicheskoe deshifirovanie i interpretaciya kosmicheskikh snimkov srednego i vysokogo prostranstvennogo razresheniya: uchebnoe posobie; Permskij gosudarstvennyj nacional'nyj issledovatel'skij universitet. Elektronnnye dannye. Perm', 2020. 191 p. (In Russ.)

Smirnov S.I. Vnutrihozyajstvennoe i territorial'noe ohotustrojstvo: sovremennye problemy i perspektivy razvitiya. *Ohotnich'e hozyajstvo i racional'noe prirodopol'zovanie v usloviyah sovremennoj global'noj transformacii* (Chteniya pamyati A.A. Silant'eva): materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Sankt-Peterburg, 06 oktyabrya 2022 goda. SPb.: SPbGLTU, 2022. (In Russ.)

Suchant R., Baritz R., Braunisch V. Wildlife habitat analysis: a multidimensional habitat management model. *J. Nat. Conserv.* 2003, 10, pp. 253–268.

Suhih V.I. Ajerokosmicheskie metody v lesnom hozyajstve i landshaftnom stroitel'stve. Joshkar-Ola: MarGTU, 2005. 392 p. (In Russ.)

Timothy G. Whiteside, Guy S. Boggs, Stefan W. Maier. Comparing object-based and pixel-based classifications for mapping savannas. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2011, vol. 13, iss. 6, pp. 884–893.

Ukrainskij P.A., Terekhin E.A., Pavlyuk Ya.V. Fragmentaciya lesov verhnej chasti bassejna reki Vorskla s konca XVIII veka. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*, 2017, no. 1, pp. 82–91. (In Russ.)

Usova I.P. Ocenka fragmentacii lesov s ispol'zovaniem landshaftnyh indeksov (na primere vostochno-beloruskoj landshaftnoj provincii). *Aktual'nye problemy geobotaniki*: mater. III Vserossijskoj shkoly-konferencii. II chast'. Petrozavodsk: KarNC RAN, 2007, pp. 250–253. (In Russ.)

Vinober A.V. Ohotovedenie i ohotnich'e hozyajstvo: v poiskah identichnosti, sinhronizacii i proliferacii idej (k 70 letiyu fakul'teta ohotovedeniya (1950–2020 gg.)). «Siberia Land Congress» *Biosphere and Agriculture Economies Support and Development Fund*, 2019, no. 6(18), pp. 5–17. (In Russ.)

Xin Pan, Ce Zhang, Jun Xu, Jian Zhao. Simplified object-based deep neural network for very high resolution remote sensing image classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, vol. 181, pp. 218–237. URL: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.09.014>.



Yang, He & Ma, Ben & Du, Qian. Decision fusion for supervised and unsupervised hyperspectral image classification. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2009, 4. IV-948. 10.1109/IGARSS.2009.5417535.

Zenkin G.Yu. Ispol'zovanie kart Google Maps v zadache identifikacii toчек na sputnikovyh izobrazheniyah srednego prostranstvennogo razresheniya. *I-methods*, 2012, no. 1.

*Материал поступил в редакцию 07.11.2023*

---

**Лукашик Е.Е., Алексеев А.С.** Геоинформационное картирование и типологическая классификация охотничьих угодий на основе данных дистанционного зондирования земли // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 250. С. 23–45. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.23-45

Данные дистанционного зондирования Земли и геоинформационные системы в настоящий момент являются неотъемлемой частью изучения ландшафтов и мониторинга их состояния. Охотничье хозяйство основывается на охотничьих ресурсах и элементах среды их обитания, которыми и являются природные и антропогенные ландшафты. В ряде нормативных документов Российской Федерации, отражающих современные требования к ведению и направлению развития охотничьего хозяйства, отмечено, что наиболее действенным является инвентаризация современного состояния среды обитания охотничьих животных на единой методологической основе, в том числе при осуществлении мониторинга с использованием и анализом данных дистанционного зондирования поверхности Земли и аэрофотосъемки охотничьих ландшафтов. Задачи данного исследования заключались в формировании методологического подхода к типологической классификации элементов среды обитания охотничьих ресурсов на основе применения алгоритма автоматизированной классификации спутниковых снимков и геоинформационной обработки получаемых результатов с учетом данных государственного лесного реестра. Объектом исследования служило охотничье хозяйство НП «Охотничье хозяйство «Ольгино» участок №2 на территории Маловишерского района Новгородской области общей площадью 7627,0 га. В качестве исходных материалов использовались спутниковые снимки с ИСЗ Sentinel-2A L2A, а также планы лесных насаждений и данные государственного лесного реестра, получаемые через средства реализации запросов программного комплекса WinPLP. Программными средствами обработки данных являлись ГИС QGIS, плагин автоматизированной классификации QGIS dzetsaka: Classification tool с алгоритмом классификации по модели смеси Гауссовских распределений Gaussian Mixture Model (GMM), а также ГИС MapInfo Pro 17.0. Контроль и уточнение результатов обработки материалов спутниковой съемки и

автоматизированной классификации осуществлялись на основе данных государственного лесного реестра и лесоустроительных картографических материалов. В результате была сформирована карта-схема исследуемого охотничьего хозяйства и таблица по распределению площадей по элементам среды обитания охотничьих ресурсов в соответствии с современными нормативными требованиями. Предложенный подход может применяться не только для проведения типологической оценки охотничьих угодий, но и в качестве инструмента ландшафтного анализа в практике оперативного и ретроспективного мониторинга природных и антропогенно-измененных территорий, в том числе на землях особо охраняемых природных территориях, сельскохозяйственных землях и землях лесного фонда.

**Ключевые слова:** геоинформационные системы, дистанционное зондирование Земли, геоинформационное картографирование, охотничье хозяйство, охотничьи ресурсы.

**Lukashik E.E., Alekseev A.S.** Geoinformation mapping and classification of hunting grounds based on remote sensing data. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 250, pp. 23–45 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.23-45

Remote sensing data and geographic information systems are now an integral part of landscape research and monitoring. Hunting management is based on information about hunting resources and elements of their habitats, i.e. the natural and anthropogenic landscapes. The number of regulative documents of the Russian Federation reflecting modern requirements for the conduct and development of hunting industry, noted that an inventory of the current state of the hunting environment on a unified methodological basis, including monitoring using and analysis of remote sensing and aerial photography of hunting landscapes, is the most effective. The objective of this study was to form the methodological approach to the typological classification of elements of the habitat hunting resources on the basis of the application of an algorithm for the automated classification of satellite images and the geographic information processing of obtaining results from the State Forest Register. The test area of the study was the hunting farm of NP «Hunting farm «Olgin» plot 2 on the territory of the Malovishersky district of the Novgorod region with a total area of 7627.0 hectares. Satellite imagery from the Sentinel-2A L2A HSE, as well as forest inventory and management plans and State Forest Registry data from the WinPLP software complex, were used as source materials. The software included the QGIS dzetsaka automated classification plugin of the QGIS i.e. the Classification tool with a classification algorithm based on the Gaussian Mixture Model (GMM) and the MapInfo Pro 17.0 GIS. The results of the processing of the satellite imagery were monitored and refined on the basis of data from the State Forest Register and forest inventory and management plan. As a result, a schematic

map of the surveyed hunting farm and a table of the distribution of areas by elements of the habitat hunting resources in accordance with modern regulatory requirements were formed. The proposed approach can be used not only for typological assessment of hunting grounds, but also as a tool for landscape analysis in the practice of operational and retrospective monitoring of natural and anthropogenic-modified territories, including on specially protected natural areas, agricultural lands and forest lands.

**Keywords:** geographic information systems, remote sensing of the Earth, geoinformation mapping, hunting, hunting resources.

---

**ЛУКАШИК Евгений Евгеньевич** – заведующий лабораторией геоинформационных систем Новгородского государственного университета имени Ярослава Мудрого, аспирант кафедры лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, SPIN-код: 4424-8576, ORCID: 0000-0002-3414-9407.

173017, ул. Советской Армии, д. 7, г. Великий Новгород, Россия. E-mail: lukashik-proekt@yandex.ru

**LUKASHIK Evgeny E.** – Head of Laboratory of Geographic Information Systems of Yaroslav Mudry Novgorod State University, postgraduate student of the Department of Forest Inventory, Management and GIS, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 4424-8576, ORCID: 0000-0002-3414-9407.

173017. Soviet Army str. 7. Veliky Novgorod. Russia. E-mail: lukashik-proekt@yandex.ru

**АЛЕКСЕЕВ Александр Сергеевич** – профессор, заведующий кафедрой лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор географических наук, ResearcherID: F-6891-2010, ORCID: 0000-0001-8795-2888, AuthorID: 150999.

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

**ALEKSEEV Aleksandr S.** – DSc (Geography), Professor, Head of the Department of Forest Inventory, Management and GIS, St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0000-0001-8795-2888, SPIN-code: 8115-9103, ORCID: 0000-0001-8795-2888, AuthorID: 150999.

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

Л.В. Ветчинникова, А.В. Жигунов, К.А. Гудкова, О.А. Савельев

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ НАСАЖДЕНИЙ КАРЕЛЬСКОЙ БЕРЕЗЫ В ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

*Введение.* Одним из наиболее ценных и уникальных представителей аборигенной лесной дендрофлоры Северо-Запада России считается карельская береза *Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti. Интерес к ней обусловлен прежде всего необычностью строения древесины, проводящие элементы которой направлены не строго вертикально, а под разными углами, что приводит к образованию в ней извилистой линии годичных колец, появлению «узорчатости» и оригинальной цветовой гаммы, напоминающей по рисунку мрамор. Именно вследствие этого сердцевина древесины карельской березы на поперечном спиле имеет форму многолучевой звезды (вероятно, поэтому такой «узор» карельской березы финны часто называют «цветком»). Узорчатая текстура, в свою очередь, приводит к изменению физико-химических свойств древесины, повышая ее плотность (от 670 до 840 кг/м<sup>3</sup>) и твердость (от 3,5 до 5,0 – по Бринеллю) [Евдокимов, 1989; Пылаев, Пылаева, 2018]. Первые сведения о березе, которая «внутренностью походит на мрамор», находим в описаниях лесного знателя форстмейстера Фердинанда Фокеля, который в первой половине 18-го века по приглашению Екатерины I обследовал местные леса северо-запада России [Редько, 1990; Ветчинникова и др., 2013]. Однако целенаправленное изучение карельской березы в Ленинградской области, как и в других регионах России, началось почти 200 лет спустя, когда в 1930-е годы сотрудники кафедры ботаники и дендрологии Ленинградской лесотехнической академии им. С.М. Кирова (ЛТА) (ныне – Санкт-Петербургский лесотехнический университет им. С.М. Кирова – СПбГЛТУ) обнаружили ее отдельные деревья в Рошинском районе [Соколов, 1950] и на территории Сланцевского лесхоза [Толстомятенко, 1967]. Низкая численность карельской березы послужила также предпосылкой для создания ее искусственных насаждений. Наиболее ранние ее лесные культуры здесь созданы на территории Охтинского учебно-опытного лесхоза (Всеволожский район) в 1949 и 1957 гг. [Редько и др., 1991] по инициативе Н.О. Соколова, который считается первооткрывателем карельской березы в России. Позднее, в 1970 г., организованы посадки на территории постоянного учебно-производственного питомника Лисинского

лесного колледжа (Тосненский район), в 1970–1971 гг. заложена лесосеменная плантация (ЛСП) на территории Гатчинского лесхоза, а в 1978–1979 гг. – Тихвинского лесхоза. Однако позднее из-за отсутствия необходимой информации о родительских (исходных) деревьях насаждение в Гатчинском лесхозе переведено из категории ЛСП в ПЛСУ (постоянный лесосеменной участок). Сейчас они входят в состав объектов лесосеменной базы Ленинградской области [Гусев и др., 1982; Редько и др., 1991]. Кроме того, 19 деревьев карельской березы сохранились на территории дендропарка самого СПбГЛТУ. Следует сказать, что значительный вклад в изучение карельской березы на территории Ленинградской области внесли Н.О. Соколов [1950, 1970], а затем А.П. Евдокимов [1989]. Однако в последние десятилетия исследования по карельской березе здесь фактически не проводились [Жигунов, Фетисова, 2023], отсутствует и оценка современного состояния этих объектов, которые имеют значительный интерес, причем не только научный, но и практический.

Учитывая это, целью настоящего исследования явилось изучение роста и формового разнообразия карельской березы в наиболее крупных искусственных насаждениях, созданных в разные годы на территории Ленинградской области, а также оценка их современного состояния.

*Объекты и методы исследований.* Объектом исследований служили искусственно созданные насаждения карельской березы *Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti, расположенные на территории Охтинской части Учебно-опытного лесничества (4-й квартал (кв.) Жерновского участкового лесничества) (далее насаждение «Охта»), на территории постоянного учебно-производственного питомника Лисинского лесного колледжа (96-й кв. Шапкинское участкового лесничества) (далее насаждение «Шапки»), а также ПЛСУ, расположенной на Гатчинской ЛСП (далее участок «Гатчина») (12 кв., выдел 4–5 Таицкого участкового лесничества) и Тихвинская ЛСП (244 кв. Шомушского участкового лесничества), созданные в разные годы в Ленинградской области (табл. 1). Существует и несколько других мест компактного произрастания карельской березы (за исключением ботанических садов и парковых посадок), которые располагаются в Сланцевском, Тосненском и Приозерском районах. К сожалению, информация об этих насаждениях частично или полностью утрачена, отсутствуют также и сведения об их состоянии, поэтому они не были включены в число объектов исследований. Вне зоны нашего внимания остались также бывшие испытательные культуры карельской березы, созданные в 1973 г. на площади 8,8 га в Гатчинском лесхозе. Исходным материалом для них послужили семена, заготовленные с деревьев, произрастающих в бо-

танических заказниках Республики Карелия. Однако в силу высокой густоты посадки и отсутствия необходимых уходов к настоящему времени это насаждение находится в неудовлетворительном состоянии, а единичные деревья карельской березы (не имеющие какой-либо идентификации) встречаются в основном по периметру участка.

На данный момент также не удалось найти информацию о конкретных местах произрастания карельской березы в природных условиях Ленинградской области, а также ее сохранности в Рошинском и Сланцевском районах, где ее находили еще в середине XX века [Соколов, 1950; Толсто-пятенко, 1967].

Таблица 1

**Характеристика наиболее крупных насаждений карельской березы, созданных на территории Ленинградской области**  
[по: Редько и др., 1991; Жигунов, Фетисова, 2023 с изменениями]

**Characteristics of the largest plantations of Curly birch established in Leningrad Oblast**  
[according to: Redko et al., 1991; Zhigunov, Fetisova, 2023 with changes]

Объект исследований	Год создания	Площадь, га	Схема посадки, м	Год исследований, 2022 г.	
				Возраст, лет	Количество растений, шт.
Насаждение «Охта»	1949	1,26	2,0 × 0,7	73	23
	1957	0,33	1,5 × 1,0	65	85
Насаждение «Шапки»	1970	0,28	1,0 × 1,0	52	144
Участок «Гатчина»	1971	3,0	2,0 × 6,0	51	1198
Тихвинская ЛСП					1004
«Тихвин-1»	1978	1,5	5,0 × 5,0	44	462
«Тихвин-2»	1979	3,0	5,0 × 5,0	43	542

Насаждение «Охта» представлено двумя участками, один из которых заложен в 1949 г. на площади 1,26 га, другой – в 1957 г., 0,33 га, соответственно. При создании первого участка под посадку использовали бывшее картофельное поле, почва которого была дерново-слабоподзолистой суглинистой модермулевой на ленточных глинах [Редько и др., 1991]. Напашку борозд производили конным плугом с одновременной высадкой 2-летних сеянцев карельской березы (всего 1780 шт.) с размещением посадочных мест 2,0 × 0,7 м (табл. 1). В междурядьях высаживали люпин многолетний. Другой участок создан 6-летними саженцами карельской березы по схеме 1,5 × 1,0 м на пологом южном склоне возле реки

Жерновки, где почва слабоподзолистая модергумусная суглинистая на моренных суглинках. Семена, по сведениям очевидцев, в обоих случаях имели карельское происхождение. К моменту проведения исследований возраст насаждений составил 73 и 65 лет (первый и второй участки, соответственно) (табл. 1).

Насаждение «Шапки» площадью 0,28 га создано осенью 1970 г. на территории питомника в виде двурядной посадки в условиях камового рельефа. Почвенный покров представлен поверхностно подзолистыми иллювиально-железистыми почвами на флювиогляциальных песках. Посадку осуществляли 2-летними сеянцами по схеме 1,0 × 1,0 м. К настоящему времени возраст насаждения достиг 52 лет (табл. 1).

Для создания участка «Гатчина» площадью 3,0 га в качестве посадочного материала использовали однолетние сеянцы, выращенные в закрытом грунте в условиях Шапкинского базисного питомника и Гатчинской лесосеменной станции, а также 2-летние саженцы, выращенные в открытом грунте в питомнике Некрасовского лесничества Приозерского мехлесхоза [Гусев и др., 1982]. Почвы участка дерново-карбонатные свежие суглинистые. Посадку растений (высотой 0,6–1,0 м) осуществляли осенью 1970 г. и весной 1971 г. под лопату с размещением в шахматном порядке 2,0 × 6,0 м (табл. 1) по 3–4 шт. в одно посадочное место с учетом, что позднее будут удалены те из них, у которых не проявятся косвенные признаки в виде выпуклостей на поверхности ствола, свидетельствующие о наличии узорчатой текстуры в древесине. Дополнительно одноразово вносили торфоминерально-аммиачные удобрения. По результатам обследования в 2022 г. на Гатчинской ПЛСУ было учтено 1198 деревьев карельской березы [Жигунов, Фетисова, 2023].

На Тихвинской ЛСП карельская береза также представлена на двух участках, которые плотно прилегают друг к другу, но различаются по году создания и качеству посадочного материала. Так, в 1978 г. на площади 1,5 га были высажены 4-летние сеянцы карельской березы с закрытой корневой системой (в торфогоршках), а спустя год, в 1979 г., на площади 3,0 га – 2-летние сеянцы с открытой корневой системой, выращенные в теплицах Тихвинского питомника. Почвенный покров территории представлен слабо- и среднеподзолистыми суглинистыми почвами на моренах. Посадку проводили по одному растению в одно посадочное место по схеме 5,0 × 5,0 м. К настоящему времени возраст насаждений составил 44 и 43 года, соответственно (табл. 1).

Добавим, что предварительный статистический анализ не выявил значимых различий по высоте между деревьями на разных участках в насаждении «Охта» и на участке «Гатчина», поэтому в дальнейшем каждый из

них мы рассматривали как единый объект без разделения на участки. Наоборот, достоверные различия обнаружены между участками, созданными на территории Тихвинской ЛСП, вследствие чего их анализировали раздельно, а для удобства изложения условно обозначили как «Тихвин-1» и «Тихвин-2», соответственно.

В ходе полевых работ проводили морфометрические измерения (высота и диаметр ствола) у каждого дерева в насаждениях «Охта» и «Шапки», а на участке «Гатчина» и Тихвинской ЛСП – в каждом пятом ряду. При этом определяли форму роста: высоко-, короткоствольная или кустообразная [Соколов, 1950; Ветчинникова, Титов, 2023]. К высокоствольной относили деревья с хорошо выраженным стволом и высоко приподнятой кроной на уровне от 1,5–2,0 м и выше; к короткоствольной – те деревья, у которых стволовая часть была до 1,5 м, выше которой располагаются несколько мощно развитых скелетных ветвей, формирующих общую крону; к кустообразной относили деревья с укороченным – от 10,0 см до 1,0 м, но явно выраженным стволом, несущим раскидистую крону.

Высоту деревьев определяли с помощью высотомера Suunto PM-5/1520 РС, а диаметр ствола – мерной вилкой с двух сторон дерева на высоте 1,3 м (у деревьев карельской березы с высоко- и короткоствольной формой роста) или у основания ствола на уровне шейки корня (у деревьев с кустообразной формой роста). Для оценки изменчивости показателей использовали коэффициент вариации ( $C$ , %) и шкалу уровней изменчивости, предложенную ранее для древесных растений [Мамаев, 1973], согласно которой  $C < 7\%$  – очень низкий уровень изменчивости,  $C = 8–12\%$  – низкий,  $C = 13–20\%$  – средний,  $C = 21–30\%$  – повышенный,  $C = 31–40\%$  – высокий и  $C > 40\%$  – очень высокий.

Для создания стерильной культуры тканей *in vitro* использовали апикальную (верхушечную) меристему вегетативных почек ауксисбластов (однолетние удлинённые побеги). Посадочный материал, полученный на основе клонального микроразмножения, гарантированно сохраняет признаки, свойственные исходным деревьям [Ветчинникова и др., 2013; Ветчинникова, Титов, 2022]. Полученная культура тканей стала частью коллекции клонов *in vitro* [Коллекция..., 2023], создаваемой нами в Институте леса Карельского научного центра РАН.

Статистическая обработка данных осуществлялась в пакете R «stats» (version 4.4.0) [R Core Team, 2020]. Для проверки нормальности распределения данных использовался критерий Шапиро-Уилка. Для сравнения средних значений между группами использовался t-тест Стьюдента для независимых выборок. Для многократных сравнений средних значений между группами применялся дисперсионный анализ (ANOVA) с последующей оценкой различий с помощью теста Тьюки HSD (honestly significant



difference). Визуализация данных и построение графиков осуществлялись с помощью библиотеки ggplot2 [Wickham, 2016]. Все обсуждаемые различия были значимы при  $p < 0,05$ .

*Результаты исследования.* Исследования показали, что к настоящему времени в насаждениях карельской березы, искусственно созданных на территории Ленинградской области, преобладают деревья с явно выраженными косвенными признаками наличия узорчатой древесины, однако их сохранность на разных участках существенно различается. Например, в насаждении «Охта» в возрасте 34 лет признаки карельской березы отмечали у 65% от общего числа деревьев – на первом участке и у 52% – на втором [Редько и др., 1991], к возрасту 73 лет из них сохранилось лишь 6%, причем суммарно на обоих участках. По всей вероятности, это обусловлено высокой плотностью посадки и низкой конкурентоспособностью карельской березы относительно других сопутствующих быстрорастущих лиственных древесных пород, сформировавших данное насаждение в течение 73 лет со времени его создания. Об этом свидетельствует и тот факт, что большинство из сохранившихся деревьев (88%) карельской березы по форме роста оказались высокоствольными (рис. 1а). Их высота в среднем составила 19,1 м, варьируя от 2,5 до 32,0 м (табл. 2), что соответствовало высокому коэффициенту вариации (39,6%). Значительные различия здесь зафиксированы и по диаметру ствола, где его значения (на высоте 1,3 м) колебались от 8,0 до 45,0 см, а коэффициент вариации достиг 38,9%, что отразилось и на статистических показателях (рис. 2).

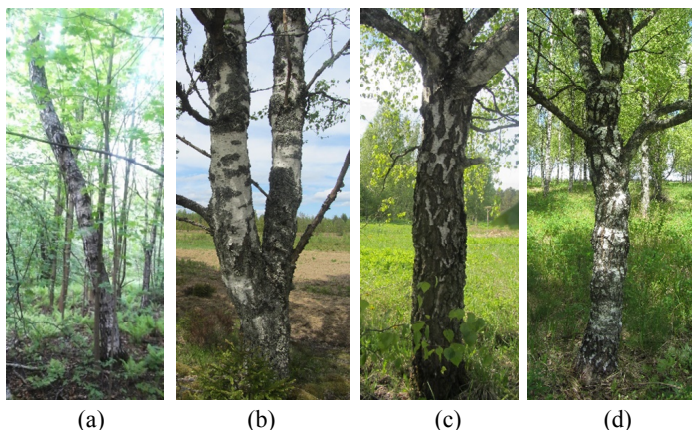


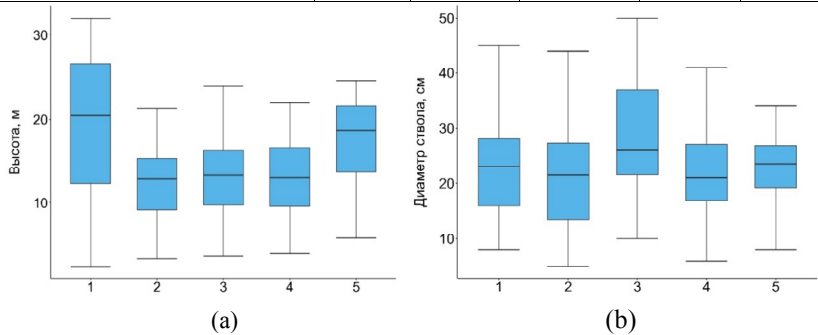
Рис. 1. Деревья карельской березы в Ленинградской области в насаждениях: «Охта» – (а); «Шапки» – (б); участок «Гатчина» – (с); Тихвинская ЛСП – (д)

*Fig. 1. Curly birch trees in Leningrad Oblast plantations: «Okhta» – (a); «Shapki» – (b); «Gatchina» – (c); Tikhvin Forest Seed Orchards – (d)*

Таблица 2

**Ростовые показатели деревьев карельской березы, произрастающих  
в наиболее крупных насаждениях, созданных  
на территории Ленинградской области**  
**Growth indicators of Curly birch trees in the largest plantations established  
in Leningrad Oblast**

Показатель	Насаждение		Участок «Гатчина»	Тихвинская ЛСП	
	«Охта»	«Шапки»		«Тих- вин-1»	«Тих- вин-2»
Высота					
Число деревьев, шт.	77	144	151	85	85
Средние значения, $M \pm m$ , м	19,1 $\pm$ 0,9	12,3 $\pm$ 4,21	13,2 $\pm$ 4,6	13,1 $\pm$ 4,6	17,3 $\pm$ 5,1
Размах изменчивости, м	2,5–32,0	3,4–21,3	3,7–24,0	4,0–22,0	5,8–24,6
Коэффициент вариации (C), %	39,6	34,3	35,1	35,2	29,6
Диаметр ствола (на высоте =1,3 м)					
Число деревьев, шт	95	67	51	59	58
Средние значения, $M \pm m$ , см	24,0 $\pm$ 1,1	21,3 $\pm$ 9,6	28,0 $\pm$ 10,1	21,5 $\pm$ 7,4	22,8 $\pm$ 5,7
Размах изменчивости, см	8,0–45,0	5,0–44,0	10,0–50,0	6,0–41,0	8,0–34,5
Коэффициент вариации (C), %	38,9	45,3	36,1	34,4	25,0



*Рис. 2. Размах изменчивости по высоте (а) и диаметру ствола (б) деревьев карельской березы, произрастающих на территории Ленинградской области, где 1 – насаждение «Охта»; 2 – насаждение «Шапки»; 3 – участок «Гатчина»; 4 – участок «Тихвин-1»; 5 – участок «Тихвин-2»*

*Fig. 2. Range of variability in height (a) and trunk diameter (b) of Curly birch trees in Leningrad Oblast, where 1 – «Okhta»; 2 – «Shapki»; 3 – Gatchina; 4 – Tikhvin-1; 5 – Tikhvin-2*

Основные ресурсы карельской березы в Ленинградской области к началу 21-го века сосредоточены на участке «Гатчина» и Тихвинской ЛСП (около 2 тыс. деревьев) (рис. 1, с–d; табл. 1), а также в окрестностях пос. Шапки Тосненского района (около 140 деревьев). Возможно этому, наряду с другими причинами, способствовала схема посадки деревьев, которая оказалась оптимальной для их роста и развития. Вместе с тем сравнительный анализ ростовых показателей деревьев карельской березы, произрастающих в разновозрастных насаждениях, выявил определенные различия между ними. Так, на Тихвинской ЛСП к возрасту 43–44 лет преобладали деревья высокоствольной формы роста (около 70%) (табл. 3), но по средним значениям их высота оказалась в 1,3 раза (или на 4 м) выше (а коэффициент вариации – ниже) на втором участке («Тихвин-2») по сравнению с первым («Тихвин-1») (рис. 2, а).

Таблица 3

**Количество деревьев карельской березы с определенной формой роста в наиболее крупных насаждениях, созданных на территории Ленинградской области, в % от числа деревьев**

**Number of Curly birch trees with specific growth forms in the largest plantations established in Leningrad Oblast, as a % of the total number of trees**

Объект исследований	Форма роста		
	Высокоствольная	Короткоствольная	Кустообразная
Насаждение «Охта»	88,0	12,0	0,0
Насаждение «Шапки»	42,4	13,2	44,4
Участок «Гатчина»	34,6	39,9	25,5
Тихвинская ЛСП			
«Тихвин-1»	71,8	18,8	9,4
«Тихвин-2»	69,4	21,2	9,4

Интересно, что на участке «Тихвин-2» около 35% деревьев имели высоту от 11,7 до 19,8 м, а почти 38% – от 20,3 до 24,6 м. На другом участке «Тихвин-1» более 90% деревьев по высоте не превышали 20 м, из которых 34% были ниже 10,7 м (табл. 2). Можно предположить, что при формировании второго участка дополнительно проводилась сортировка и отбор бо-

лее крупных саженцев при посадке, как это принято в практике лесного хозяйства. Не исключено, что обнаруженные различия между участками обусловлены не только качеством посадочного материала, но и его происхождением. К примеру, при выращивании посадочного материала при создании участка «Тихвин-1» использовали семенной материал, полученный от деревьев короткоствольной и кустообразной форм роста, а «Тихвин-2» – высокоствольной. Добавим, что для изготовления шпона (строганого или лущеного), как правило, используют деревья высоко- и короткоствольной формы роста, а для изготовления небольших по размеру сувениров (включая бижутерию) предпочитают кустообразную форму, у которой при характерном ей замедленном линейном росте (в высоту) обычно происходит формирование более насыщенного и «утонченного» рисунка в древесине. Следует учитывать и тот факт, что благодаря своим уникальным свойствам древесина карельской березы высоко ценится на мировом рынке и продается в отличие от других древесных пород в килограммах, а не в кубических метрах. В Финляндии в середине 60-х годов XX века 1 кг узорчатой древесины в сыром виде приравнялся к стоимости 1 кг сахарного песка [Vesterinen, 1966], что дороже любого другого дерева, известного на Севере. По оценке немецких специалистов карельская береза принадлежит к самым дорогим облицовочным шпонам вообще и является наиболее ценным по качеству шпоном березовых [Scholz, 1963]. В начале 21-го столетия стоимость 1 кг сырой древесины составляла от 3 до 5 евро и выше в зависимости от степени насыщенности рисунка [Hupunen et al., 2010] и рыночной конъюнктуры. Древесина карельской березы очень тяжелая, поэтому ствол одного дерева, например, массой 250 кг может оцениваться в 1 тыс. евро при стоимости 4 евро за 1 кг.

При целевом выращивании древесины важным показателем является диаметр ствола, который, например, при производстве строганого шпона, должен быть не менее 16 см. На Тихвинской ЛСП на обоих участках преобладают деревья, имеющие диаметр ствола (на высоте 1,3 м) от 20 до 34 см (54 и 65% на участках «Тихвин-1» и «Тихвин-2», соответственно), при этом на первом участке у трех деревьев он достиг даже 35–41 см (рис. 1,d; табл. 2). Добавим, что у части деревьев наибольший диаметр, измеренный у основания ствола на уровне шейки корня, достиг 43–44 см.

В насаждении «Шапки» и на участке «Гатчина» к возрасту 50 лет высота деревьев в среднем не превышала 13,2 м, но варьировала, соответственно, от 3,4 до 21,3 м и от 3,7 до 24,0 м (рис. 1,b, c; табл. 2). При этом в обоих насаждениях более чем у 40% деревьев эти значения были близкими

к средним, что хорошо заметно на рис. 2,а. По форме роста в насаждении «Шапки» преобладают деревья, имеющие высокоствольную (42,4%) и кустообразную (44,4%) форму роста, а на участке «Гатчина» – все формы роста представлены почти в равной пропорции (табл. 3). Широкая амплитуда отмечена в отношении диаметра ствола (на высоте 1,3 м). Однако в среднем его величина оказалась ниже у деревьев, произрастающих в насаждении «Шапки» (21,3 см), особенно по сравнению с участком «Гатчина», где диаметр ствола составил в среднем 28 см (табл. 2; рис. 2,б). Более того, на участке «Гатчина» диаметр основания ствола на уровне шейки корня у 56% деревьев превысил 35 см, а у 23% – 45 см. Максимальные значения по данному показателю здесь достигли 62–65 см. Заметим, что в природных условиях Беларуси, на территории которой сосредоточены наибольшие в мире запасы карельской березы, к возрасту 29 лет высота деревьев карельской березы колебалась от 7,2 до 12,2 м, диаметр ствола – от 16 до 21 см [Сидор и др., 2016].

Необходимо отметить особую трудоемкость в обнаружении карельской березы как в природных условиях, так и в искусственно созданных насаждениях. Основным показателем, косвенно свидетельствующим об образовании узорчатой древесины, до сих пор считалось наличие утолщений или выпуклостей на поверхности ствола. Однако далеко не всегда величина и количество выпуклостей соответствуют степени выраженности рисунка в текстуре древесины. Существует и другая крайность, когда внешние признаки практически отсутствуют, а на поперечном спиле можно увидеть насыщенную текстуру. Более того образование узорчатой древесины у карельской березы проявляется внешне не сразу: ее косвенные признаки становятся визуально различимыми чаще всего только на 8–10-й год развития растений, а спустя 30–40 лет может наблюдаться обратный процесс «сглаживания» или «заплывания» ранее выпуклой поверхности ствола, поскольку с возрастом скорость линейного (в высоту) роста деревьев снижается, а радиальный (по диаметру) продолжается [Ветчинникова и др., 2023]. Этот процесс сопровождается не только изменением характера поверхности ствола, но и текстуры древесины: насыщенность ее рисунка, как правило, уменьшается. Новые возможности в этом направлении открывают недавно полученные нами результаты молекулярно-генетических исследований, благодаря которым удалось вывести маркер «гена узорчатости» [Gubaev et al., 2024], позволяющий проводить прямую диагностику карельской березы независимо от возраста растений.

В период исследований нами попутно отобран растительный материал (вегетативные почки) и получено вегетативное потомство (путем клонального микроразмножения) пяти генотипов карельской березы, три из которых представляют Тихвинскую ЛСП, одно – насаждение «Гатчина» и одно – насаждение «Шапки» (рис. 3). Полученные растения генотипированы с использованием семи микросателлитных маркеров, что позволило составить их «ДНК-паспорта».

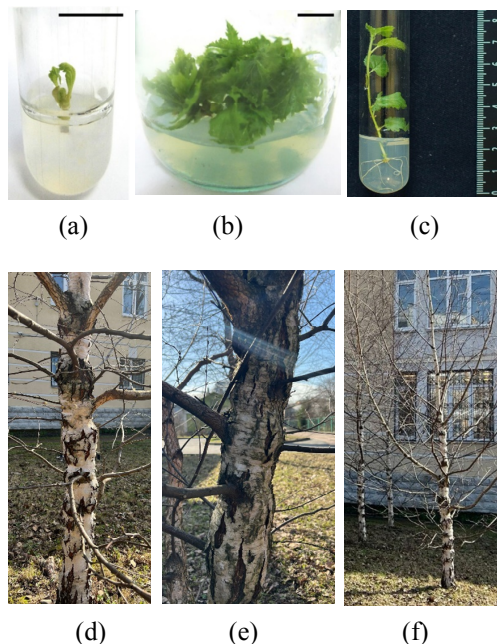


Рис. 3. Начальный этап инициации морфогенеза апикальной меристемы вегетативных почек (а), мультипликация побегов (b), их укоренение (c) в условиях культуры тканей *in vitro* и спустя 10 лет после посадки на территории ботанического сада Ботанического института им. В.Л. Комарова (d–f), г. Санкт-Петербург

Fig. 3. Initial stage of morphogenesis initiation of apical meristems of vegetative buds (a), shoot multiplication (b), rooting (c) *in vitro* tissue culture conditions, and after 10 years of planting in the botanical garden of the Komarov Botanical Institute (d–f), St. Petersburg

Опыт показывает, что на основе клонального микроразмножения можно вырастить посадочный материал карельской березы с закрытой корне-

вой системой высотой 0,8–1,0 м и более (в зависимости от генотипа) за один вегетационный период. Такой результат достигается за счет того, что индукция микропобегов и их укоренение непосредственно в культуре тканей проводятся в зимне-весенний период (февраль-март), а перенос полученных растений-регенерантов в нестерильные условия (*ex vitro*) осуществляются с началом вегетации (апрель-май) [Ветчинникова, Серебрякова, 2021]. В 2014 г. 5 растений карельской березы, полученных нами таким образом на базе лаборатории лесных биотехнологий в Институте леса Карельского научного центра РАН, были высажены, например, на территории ботанического сада в год 300-летия Ботанического института им. В.Л. Комарова (г. Санкт-Петербург) (рис. 3,d–f) [Гельтман, 2015]. Не вызывает сомнений, что использование современных биотехнологий (прежде всего клонального микроразмножения) и новых возможностей, которые дают молекулярно-генетические методы (например, генотипирование и маркер «гена узорчатости»), является важной предпосылкой для расширенного воспроизводства карельской березы с гарантированным сохранением в потомстве высокоценной узорчатой древесины.

*Выводы.* 1. Исследования показали, что к первой четверти XXI века на территории Ленинградской области сохранилось несколько разновозрастных насаждений карельской березы. Наиболее крупными из них являются ПЛСУ, расположенная на Гатчинской ЛСП, и Тихвинская ЛСП, где суммарно произрастает более 2 тыс. деревьев с характерными внешними признаками наличия узорчатой древесины. Меньшими по площади и численности оказались насаждения «Охта» и «Шапки», но, являясь составной частью учебно-производственной базы, они также представляют интерес, поскольку имеют некоторые сведения об истории их создания и начальных этапах роста и развития деревьев.

2. Полученные результаты позволили обнаружить как общие черты, так и определенные различия по ростовым показателям и формовому разнообразию изученных деревьев карельской березы. В частности, наибольшие средние значения по высоте зафиксированы у деревьев, расположенных в насаждении «Охта» и на Тихвинской ЛСП (участок «Тихвин-2») (19,1 и 17,3 м соответственно), а по диаметру ствола – на участке «Гатчина» (в среднем 28 см на высоте 1,3 м и до 62 см – у основания ствола на уровне корневой шейки).

3. Деревья карельской березы высокоствольной формы роста преобладают в насаждении «Охта» (88%) и на Тихвинской ЛСП (около 70%), при-

мерно поровну представлена высокоствольная и кустообразная формы роста карельской березы в «Шапках» (42,4 и 44,4%, соответственно) и все формы почти в равном соотношении – на участке «Гатчина» (34,6; 39,9 и 25,5% – высоко-, короткоствольная и кустообразная, соответственно).

4. Различия по ростовым показателям и формовому разнообразию, выявленные между разновозрастными насаждениями карельской березы, созданными на территории Ленинградской области, обусловлены прежде всего разной продолжительностью их формирования, генетическими особенностями исходных деревьев, конкурентными взаимоотношениями, которые сложились в первые годы развития растений, а также разными почвенными условиями места их произрастания.

5. Создание искусственных насаждений плантационного типа является наиболее перспективным способом воспроизводства карельской березы поскольку при таком решении можно предусмотреть и снизить отрицательные последствия ее конкурентных отношений с другими сопутствующими древесными породами путем проведения регулярных агротехнических, а затем и лесоводственных уходов, что позволяет к возрасту рубки, например при семенном размножении получить насаждение, где более 80% деревьев будут иметь признаки узорчатой древесины, а при вегетативном, полученном путем клонального микроразмножения, – 100%.

6. Накопленный к настоящему времени опыт выращивания карельской березы в Ленинградской области показывает, что при соответствующих мерах ухода она вполне способна расти и развиваться, давая хороший прирост и высокоценную узорчатую древесину в достаточно широком диапазоне почвенных условий – от песчаных до суглинистых. А применение новых подходов, таких как клональное микроразмножение *in vitro* и использование маркера «гена узорчатости», может обеспечить существенное расширение реализации этих возможностей. Хороший пример выращивания карельской березы в Ленинградской области представляет собой Тихвинская ЛСП. В дальнейшем она может использоваться не только для решения практических, но и различных научных задач.

7. Оценивая общее состояние насаждений карельской березы, расположенных на территории Ленинградской области, как хорошее, следует иметь ввиду, что несмотря на их искусственное происхождение, они требуют принятия срочных мер по их сохранности и дальнейшему использованию. Для этого в ближайшее время целесообразно провести селекционную оценку деревьев с использованием маркера «гена узорчатости» и отбор наилучших из них для генотипирования и размножения путем



клонирования *in vitro*. Следует также разработать принципы рубки деревьев для создания сырьевой базы высокоценной узорчатой древесины, поскольку изученные насаждения не только достигли возраста рубки, но и уже превысили его, следствием чего может стать появление в древесине сердцевинной гнили и, соответственно, снижения ее качества. Вполне очевидно, что решение этих вопросов является важной государственной задачей. Сейчас, когда первоначальный интерес к искусственно созданным материалам, используемым в быту, заметно снизился, это делает продукцию из карельской березы еще более востребованной.

*Сведения о финансировании исследования.* Исследование выполнено за счет средств Российского научного фонда (проект № 22-16-00096).

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

### Библиографический список

Ветчинникова Л.В., Серебрякова О.С. Способ ускоренного выращивания посадочного материала древесных растений сем. *Betulaceae* на основе клонирования *in vitro*. Патент РФ А01Н 5/00. Дата регистрации 27.09.2021. Оpubл. 27.09.2021. Бюл. № 27.

Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф. Карельская береза: загадки остаются // Успехи современной биологии. 2023. Т. 143, № 1. С. 91–104. URL: <https://doi.org/10.31857/S0042132423010118>

Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф. Клональное микроразмножение редких представителей рода *Betula* L. : учеб. пособие. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2022. 51 с.

Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф., Костина Е.Э., Жигунов А.В. Сибсовое потомство карельской березы на Заонежской лесосеменной плантации // ИВУЗ. Лесной журнал. 2023. № 5. С. 9–26. URL: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-9-26>

Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф., Кузнецова Т.Ю. Карельская береза: биологические особенности, динамика ресурсов и воспроизводство. Петрозаводск: КарНЦ 2013. 312 с. URL: <http://elibrary.krc.karelia.ru/235/>

Гельтман Д.В. Юбилейные мероприятия, посвящённые 300-летию Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН // Историко-биологические исследования. 2015. Т. 7. № 1. С. 111–112.

Гусев С.П., Евдокимов А.П., Исаков Л.Г. Лесная селекция: методические указания по учебной практике для студентов лесохозяйственного факультета. Л.: ЛТА, 1982. 43 с.

Евдокимов А.П. Биология и культура карельской березы. Л.: Изд-во ЛГУ, 1989. 222 с.

Жигунов А.В., Фетисова А.А. Лесосеменная база карельской березы в Ленинградской области // Леса России: политика, промышленность, наука, образо-

вание: матер. VIII Всерос. науч.-технич. конференции 24–26 мая 2023 г. / под. ред. А.А. Добровольского. СПб.: СПбГЛТУ, 2023. С. 243–246.

Коллекция *in vitro* клонов редких видов сем. *Betulaceae*. URL: <http://www.ckr-rf.ru/usu/465691/>

Мамаев С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений. М., 1973. 284 с.

Пылаев А.Я., Пылаева Т.Л. Архитектурно-дизайнерские материалы и изделия. Ч. I. Основы архитектурного материаловедения. Ростов-на-Дону; Таганрог: Южный Федеральный университет, 2018. С. 99.

Редько Г.И. Лесной знатель Ф. Г. Фокель в России // ИВУЗ. Лесной журнал. 1990. № 5. С. 129–131.

Редько Г.И., Брановицкий М.Л., Гусев С.П. Лесные культуры в Охтинском учебно-опытном лесхозе: учебное пособие для прохождения учебной и производственной практик студентами специальности 31.12. Л.: ЛТА, 1991. 76 с.

Сидор А.И., Ковалевич А.И., Луферова Н.С., Ревяко И.Д., Мальцева Л.В., Фомин Е.А. Карелка: Что имеем ... // Лесное и охотничье хозяйство. 2016. № 11. С. 18–23.

Соколов Н.О. Карельская береза. Петрозаводск: Гос. изд. Карело-Финской ССР, 1950. 116 с.

Соколов Н.О. Отбор и выращивание березы карельской в Ленинградской области с использованием самосева // Лесная генетика, селекция и семеноводство. Петрозаводск, 1970. С. 277–281.

Толстомятенко А.И. Отличительные признаки березы карельской (*Betula verrucosa* Ehrh. f. *Soc.*) в лесах Ленинградской области // Науч. тр. Лесотехн. акад. Л.: ЛТА, 1967. С. 138–139.

Gubaev R., Karzhaev D., Grigoreva E., Lytkin K., Safronycheva E., Volkov V., Nesterchuk V., Vetchinnikova L., Zhigunov A., Potokina E. Dissection of figured wood trait in Curly birch (*Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti) using high-throughput genotyping // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. 10.1038/s41598-024-55404-y.

Hynynen J., Niemistö P., Viherä-Aarnio A. et al. Silviculture of birch (*Betula pendula* Roth and *Betula pubescens* Ehrh.) in Northern Europe // Forestry. 2010. Vol. 83, no. 1. P. 103–119.

R Core Team. R: a Language and environment for statistical computing. Version 4.0.1 ed. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2020. URL: <https://www.r-project.org/>

Scholz E. Die rationelle Bewirtschaftung der Birke // Sozialistische Forstwirtschaft. 1963. Bd. 13. No 12. P. 362–367.

Vesterinen E. Onko visapuulla tulevaisuutta? // Metsät. Aikak. 1966. Vol. 83, no. 8. P. 334–335.

Wickham H. GGPlot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer. 2016. Verlag, New York. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4_9)

## References

Collection of *in vitro* clones of rare species of the Betulaceae family. URL: <http://www.ckp-rf.ru/usu/465691/>

Evdokimov A.P. *Biologiya i kul'tura karel'skoj berezy* [Biology and culture of Curly birch]. L.: Izd-vo LGU, 1989. 222 p. (In Russ.)

Geltman D.V. Yubilejny'e meropriyatiya, posvyashhyonny'e 300-letiyu Botanicheskogo instituta im. V.L. Komarova RAN [Anniversary celebrations dedicated to the 300 years of the V.L. Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences]. *Istoriko-biologicheskie issledovaniya*, 2015, vol. 7, no. 1, pp. 111–112. (In Russ.)

Gubaev R., Karzhaev D., Grigoreva E., Lytkin K., Safronycheva E., Volkov V., Nesterchuk V., Vetchinnikova L., Zhigunov A., Potokina E. Dissection of figured wood trait in Curly birch (*Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti) using high-throughput genotyping. *Scientific Reports*, 2024, vol. 14. 10.1038/s41598-024-55404-y.

Gusev S.P., Evdokimov A.P., Isakov L.G. Lesnaya selekciya: metodicheskie ukazaniya po uchebnoj praktike dlya studentov lesokhozyajstvennogo fakul'teta [Forest Breeding: Methodological Guidelines for Practical Training for Students of the Forestry Faculty]. L.: LTA, 1982. 43 p. (In Russ.)

Hynynen J., Niemistö P., Viherä-Aarnio A. et al. Silviculture of birch (*Betula pendula* Roth and *Betula pubescens* Ehrh.) in Northern Europe. *Forestry*, 2010, vol. 83, no 1, pp. 103–119.

Mamaev S.A. Formy' vnutrividovoj izmenchivosti drevesny'kh ras-tenij [Forms of Intraspecific Variability of Woody Plants]. M., 1973. 284 p. (In Russ.)

Py'laev A.Ya., Py'laeva T.L. Arkhitekturno-dizajnerskie materialy' i izdeliya. Ch. I. Osnovy' arkhitekturnogo materialovedeniya [Architectural and Design Materials and Products. Part I. Basics of Architectural Materials Science]. Rostov-na-Donu; Taganrog: Yuzhny'j Federal'ny'j universitet, 2018. 99 p. (In Russ.)

R Core Team. R: a Language and environment for statistical computing. Version 4.0.1 ed. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2020. URL: <https://www.r-project.org/>

Red'ko G.I. Lesnoj znatel' F. G. Fokel' v Rossii [Forest Expert F.G. Fokel in Russia]. *IVUZ. Lesnoj zhurnal*. 1990, no 5, pp. 129–131. (In Russ.)

Red'ko G.I., Branoviczkij M.L., Gusev S.P. Lesny'e kul'tury' v Okh-tinskom uchebno-opyt'nom leskhoze: uchebnoe posobie dlya prokhozhdeniya uchebnoj i proizvodstvennoj praktik studentami speczial'nosti 31.12. [Forest Cultures in the Okhtinsky Educational and Experimental Forestry: A Textbook for Practical Training for Students of Specialty 31.12.]. L.: LTA, 1991. 76 p. (In Russ.)

Scholz E. Die rationelle Bewirtschaftung der Birke. *Sozialistische Forstwirtschaft*, 1963, bd. 13, no 12, pp. 362–367.

Sidor A.I., Kovalevich A.I., Luferova N.S., Revuako I.D., Maltseva L.V., Fomin E.A. Karelka: Chto imeem ... [Curly Birch: What do We Have.. Forestry and Hunting]. *Lesnoe i okhotnich'e khozyaj-stvo*, 2016, no 11, pp. 18–23. (In Russ.)

Sokolov N.O. Karel'skaya bereza [Curly birch]. Petrozavodsk: Gos. izd. Karelo-Finskoy SSR, 1950. 116 p. (In Russ.)

Sokolov N.O. Otkor i vy'rashhivanie berezy` karel'skoj v Lenin-gradskoj oblasti s ispol'zovaniem samoseva [Selection and Cultivation of Curly birch in the Leningrad Oblast Using Self-Sowing]. *Lesnaya genetika, selekciya i semenovodstvo*. Petrozavodsk, 1970, pp. 277–281. (In Russ.)

Tolstopyatenko A.I. Otlichitel'ny'e priznaki berezy` karel'skoj (*Betula verrucosa* Ehrh. F. Soc.) v lesakh Leningradskoj oblasti [Distinctive Features of Curly birch (*Betula verrucosa* Ehrh. F. Soc.) in the Forests of the Leningrad Oblast]. *Nauch. tr. Lesotekhn. akad. L.: LTA*, 1967, pp. 138–139. (In Russ.)

Vesterinen E. Onko visapuulla tulevaisuutta? *Metsät. Aikak*, 1966, vol. 83, no 8, pp. 334–335.

Vetchinnikova L.V., Serebryakova O.S. Sposob uskorenogo vy`ra-shhivaniya posadochnogo materiala drevesny`kh rastenij sem. Betulaceae na osnove klonirovaniya in vitro [Method for accelerated cultivation of planting material of woody plants of Betulaceae family based on in vitro cloning]. Patent RF A01H 5/00. Data registracii 27.09.2021. Opublikovano 27.09.2021. Byul. # 27. (In Russ.)

Vetchinnikova L.V., Titov A.F. Curly birch: Some Secrets Remain. *Biology Bulletin Reviews*, 2023, vol. 13, no. 2, pp. 162–174. URL: <https://doi.org/10.1134/S207908642302010X>

Vetchinnikova L.V., Titov A.F. Klonal'noe mikrorazmnozhenie redkikh predstavitelej roda *Betula* L. (uchebnoe posobie) [Clonal Micropropagation of Rare Representatives of the Genus *Betula* L. (textbook)]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2022, 51 p. (In Russ.)

Vetchinnikova L.V., Titov A.F., Kostina E.E., Zhigunov A.V. Sibs Progeny of Curly Birch at the Zaonezhye Forest Seed Orchard. *UVUZ. Lesnoy Zhurnal*, 2023, no. 5, pp. 9–26. URL: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-9-26> (In Russ.)

Vetchinnikova L.V., Titov A.F., Kuznetsova, T.Yu. Curly birch : Biological Characteristics, Resource Dynamics and Reproduction. Petrozavodsk: KarRC Publ., 2013. 312 p. URL: <http://elibrary.krc.karelia.ru/235/> (In Russ.)

Wickham H. GGPlot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer. 2016. Verlag, New York. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4_9)

Zhigunov A.V., Fetisova A.A. Lesosemennaya baza karel'skoj berezy` v Leningradskoj oblasti [Forest Seed Base of Curly birch in the Leningrad Oblast]. *Lesa Rossii: politika, promy'shennost', nauka, obrazovanie: materialy` VIII Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferenczii, 24–26 maya 2023 g. / pod. red. A.A. Dobrovol'skogo*. SPb.: SPbGLTU. 2023, pp. 243–246. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 09.08.2024

**Ветчинникова Л.В., Жигунов А.В., Гудкова К.А., Савельев О.А.**  
Современное состояние насаждений карельской березы в Ленинградской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 250. С. 46–66. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.46-66

Представлены результаты изучения роста и формового разнообразия, а также оценка современного состояния насаждений карельской березы *Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti, созданных в разные годы на территории Ленинградской области. Объектами исследований явились наиболее крупные из них – «Охта», «Шапки», постоянный лесосеменной участок (ПЛСУ), расположенный на Гатчинской лесосеменной плантации (ЛСП) и Тихвинская ЛСП, названия которых созвучны с их географическим расположением. Показано, что в насаждении «Охта», начало которому положено в 1949 г. и продолжено в 1957 г., к настоящему времени сохранилось не более 6% (от числа посаженных деревьев) карельской березы. Предположительно это обусловлено высокой плотностью посадки и низкой конкурентоспособностью карельской березы относительно других сопутствующих быстрорастущих лиственных древесных пород. В других изученных насаждениях, созданных преимущественно в 1970-е годы, сохранность карельской березы оказалась существенно выше. Установлено, что наибольшие средние значения высоты зафиксированы у деревьев, произрастающих в насаждении «Охта» и на территории Тихвинской ЛСП (участок «Тихвин-2») (19,1 и 17,3 м соответственно), а по диаметру ствола – на участке «Гатчина» (в среднем 28 см на высоте 1,3 м и до 62 см – у основания на уровне корневой шейки). Отмечено также, что в насаждении «Охта» преобладают деревья высокоствольной формы роста (88%), в «Шапках» – высокоствольной (42,4%) и кустообразной (44,4%), на обоих участках Тихвинской ЛСП – примерно поровну представлена высоко- (около 70%) и короткоствольная формы роста (около 20%), а на участке «Гатчина» – все формы почти в равном соотношении (34,6; 39,9 и 25,5% – высоко-, короткоствольная и кустообразная, соответственно). Выявленные особенности насаждений карельской березы, созданных в разные годы на территории Ленинградской области, обусловлены прежде всего разной продолжительностью их формирования, генетическими особенностями исходных деревьев, конкурентными взаимоотношениями, которые сложились в первые годы развития растений, а также разными почвенными условиями места их произрастания. Показано, что к первой четверти 21-го века основные ресурсы карельской березы (более 2 тыс. деревьев) располагаются преимущественно в насаждении «Гатчина» и на территории Тихвинской ЛСП и находятся в хорошем состоянии. Накопленный к настоящему времени опыт

выращивания карельской березы в Ленинградской области показывает, что при соответствующих мерах ухода она вполне способна расти и развиваться, давая хороший прирост и высокоценную узорчатую древесину в достаточно широком диапазоне почвенных условий – от песчаных до суглинистых. Сделан вывод, что создание искусственных насаждений плантационного типа является наиболее перспективным способом воспроизводства карельской березы. В дальнейшем они могут использоваться как для решения научных задач, так и практического использования.

**Ключевые слова:** карельская береза, *Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti, семенное потомство, узорчатая древесина, ресурсы, рост, развитие, Ленинградская область.

**Vetchinnikova L.V., Zhigunov A.V., Gudkova K.A., Savel'ev O.A.** Current State of Curly birch Plantations in Leningrad Oblast. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoi Akademii*, 2024, iss. 250, pp. 46–66 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.46-66

This study presents the results of research on the growth, morphological diversity, and current condition of Curly birch (*Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti) plantations established in various years in Leningrad Oblast. The research focused on the largest plantations: «Okhta», «Shapki», Gatchina Seed Production Area (SPA), and Tikhvin Forest Seed Orchard (FSO), named after their respective geographic locations. It was shown that in the «Okhta» plantation, established in 1949 and expanded in 1957, less than 6% of the originally planted Curly birch trees have survived to the present day. This decline is presumably due to high planting density and the low competitive ability of Curly birch compared to other fast-growing deciduous species. In other plantations, primarily established in the 1970s, the survival rate of Curly birch was significantly higher. The highest average tree heights were recorded in the «Okhta» plantation and Tikhvin FSO-2 (19.1 m and 17.3 m, respectively), while the largest trunk diameters were found in the Gatchina SPA (averaging 28 cm at 1.3 m height and up to 62 cm at the base near the root collar). It was also noted that in the «Okhta» plantation, tall-stemmed growth forms predominated (88%), while in «Shapki», both high-stemmed (42.4%) and shrub-like forms (44.4%) were prevalent. In both Tikhvin FSO sites, high-stemmed (about 70%) and short-stemmed forms (about 20%) were roughly equally represented, whereas in the Gatchina SPA, all forms were almost equally distributed (34.6%, 39.9%, and 25.5% for high-stemmed, short-stemmed, and shrub-like forms, respectively). The observed characteristics of Curly birch plantations established in different years in Leningrad Oblast are primarily influenced by the duration of plantation establishment, the genetic traits of the original trees, competitive interactions during the early years of growth, and varying soil conditions at the plantation sites. It was demonstrated that by the first quarter of the 21st century, the

primary Curly birch resources (more than 2,000 trees) are concentrated mainly in the Gatchina SPA and Tikhvin FSO and are in good condition. The accumulated experience in cultivating Curly birch in Leningrad Oblast indicates that with appropriate care measures, it is quite capable of growing and thriving, producing good growth and valuable figured wood in a wide range of soil conditions, from sandy to loamy soils. The study concludes that the creation of artificial plantation-type stands is the most promising method for reproducing Curly birch. In the future, these plantations may be used both for scientific research and practical applications.

**Key words:** Curly birch, *Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti, seed progeny, figured wood, resources, growth, development, Leningrad Oblast

---

**ВЕТЧИННИКОВА Лидия Васильевна** – главный научный сотрудник лаборатории лесных биотехнологий Института леса ФИЦ «Карельский научный центр Российской академии наук», доцент (РАН), доктор биологических наук. SPIN-код: 7683-6378. ResearcherID: J-5665-2018, ORCID: 0000-0003-2091-905X.

185910, ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Россия. E-mail: vetchin@krc.karelia.ru

**VETCHINNIKOVA Lidya V.** – DSc (Biology), Assistant Professor (RAS), Chief Researcher in the Laboratory for Forest Biotechnology Forest Research Institute KarRC RAS. SPIN-code: 7683-6378, ResearcherID: J-5665-2018, ORCID: 0000-0003-2091-905X.

185910. Pushkinskaya str. 11 Petrozavodsk. Karelia. Russia. E-mail: vetchin@krc.karelia.ru

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

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

**ZHIGUNOV 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

**ГУДКОВА Ксения Александровна** – стажёр-исследователь лаборатории лесных биотехнологий Института леса Карельского научного центра РАН. SPIN-код: 7808-9472. ORCID:0009-0008-2589-000X

185910, ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Россия. E-mail: gudkova@krc.karelia.ru

**GUDKOVA Ksenia A.** – Research Intern in the Laboratory for Forest Biotechnology Forest Research Institute KarRC RAS. SPIN-code: 7808-9472. ORCID: 0009-0008-2589-000X

185910. Pushkinskaya str. 11 Petrozavodsk. Karelia. Russia. E-mail: gudkova@krc.karelia.ru

**САВЕЛЬЕВ Олег Анатольевич** – начальник отдела лесного семеноводства и селекции Ленинградского государственного областного казенного учреждения «Управление лесами Ленинградской области», кандидат сельскохозяйственных наук.

191015, ул. Шпалерная, д. 52, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: oleg.save2011@yandex.ru

**SAVEL'EV Oleg A.** – PhD (Agriculture), Head of Forest Seed Production and Selection Department of the Leningrad State Regional Institution «Forest Management of the Leningrad Region».

191015. Shpalernaya str. 52. St. Petersburg. Russia. E-mail: oleg.save2011@yandex.ru



А.А. Шишкина, Н.Н. Карпун

**ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ ОЧАГОВ КОРНЕВОЙ ГУБКИ  
В ГЕОГРАФИЧЕСКИХ КУЛЬТУРАХ СОСНЫ  
СЕРЕБРЯНОБОРСКОГО ОПЫТНОГО ЛЕСНИЧЕСТВА**

*Введение.* Корневая губка (*Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref., Basidiomycota, Bondarzewiaceae) считается одним из наиболее опасных патогенов, вызывающих гибель сосновых насаждений [Негруцкий, 1973; Алексеев, 1974; Asiegbu et al., 2005; La Porta et al., 2008; Kovalchuk et al., 2022]. Возникновение и распространение очагов корневой губки в зависимости от комплекса различных факторов приводит или к медленно развивающемуся усыханию древостоев, или к их быстрому распаду [Кобец, 2001; Garbelotto, Gonthier, 2013]. Значительный экономический ущерб от патогена связан не только с повышением доли погибших деревьев, но и увеличением их подверженности ветровалу, снижением качества древесины, косвенными потерями, вызванными уменьшением прироста [Gori et al., 2013].

Многолетние наблюдения за состоянием сосновых древостоев на территории Серебряноборского опытного лесничества Института лесоведения ИЛАН РАН (Московская область) установили преобладание в них ослабленных и сильно ослабленных деревьев. В качестве основной причины отпада в культурах было определено поражение их корневой губкой [Рысин и др., 2001].

Географические культуры сосны обыкновенной Серебряноборского опытного лесничества были созданы в 1948–1950 гг. под руководством профессора Л.Ф. Правдина на участке, вышедшем из-под сельскохозяйственного пользования. Почвенные условия однородные. Семена сосны были получены из 34 районов бывшего СССР: от Мурманска до Кавказа и от Риги до Улан-Удэ, число повторностей опыта 1–3. В 1978 и 1981 гг. в культурах были проведены санитарные рубки в основном по причине снеголома [Серебряноборское опытное лесничество, 2010; Мерзленко и др., 2017].

По результатам многолетних исследований коллектива ученых Института лесоведения, по лесоводственному эффекту были выявлены существенные различия между климатипами [Мерзленко и др., 2014; 2017; Глазунов и др., 2015, 2016; Мельник и др., 2017]. Лучшие показатели по сохранности, средней высоте, диаметру и запасу древесины показали кли-

матипы сосны из Полесья, Ярославской области, Удмуртии и Саратовской области. Неудовлетворительными были признаны древостои из семенного материала Костромской, Вологодской и Воронежской областей [Мерзленко и др., 2017; Полякова и др., 2019].

В 2014–2015 гг. на этих участках была проведена комплексная оценка фитопатологического состояния климатипов сосны. Результаты исследований показали, что лучшим состоянием характеризуются сосны из Латвии, Беларуси, Карелии, а также некоторые климатипы происхождением из ближних к месту опытных культур регионов (Калужская и Рязанская области). Пораженными корневой губкой в сильной степени были климатипы из Бурятии, Татарстана, Свердловской и Вологодской областей [Шишкина, Колганихина, 2016].

Цель настоящего исследования – анализ динамики развития очагов усыхания в географических культурах сосны Серебряноборского опытного лесничества (Московская область) за период 2014–2023 гг. и оценка влияния метеорологических факторов на ослабление сосны и ее восприимчивость к корневой губке.

*Материалы и методика исследования.* Исследования проводили в период 2014–2023 гг. При оценке состояния климатипов и их пораженности корневой губкой использовали общепринятые методы лесопатологического обследования насаждений [Методы мониторинга ..., 2004]. Работы вели на постоянных пробных площадях (далее – ПП), заложенных ранее сотрудниками Института лесоведения РАН. Учеты выполняли в 2014–2015 гг. на 41 ПП и в 2022–2023 гг. – на 15 ПП, характеризующихся по данным первого учета разным состоянием и степенью поражения корневой губкой.

Климатипы сравнивали по трем показателям, характеризующим их санитарное и фитопатологическое состояние: средневзвешенная категория состояния (СКС), пораженность культур корневой губкой (ПКГ), %, суммарная доля условно здоровых деревьев первой и второй категорий состояния (С1,2), %. Оценка успешности климатипов проводили в соответствии с модифицированной методикой определения целесообразности внедрения климатипов по лесоводственным характеристикам [Мерзленко, 1995]. Данные принципы определения успешности климатипов применяли в предыдущих исследованиях на этом объекте [Шишкина, Колганихина, 2016]. Методика расчетов состояла из следующих этапов:

1) расчет абсолютной успешности климатипа,  $U$ :

$$U = X_p - X_m,$$

где  $X_p$  – среднеарифметический показатель по каждому климатипу;  $X_m$  – среднеарифметический показатель генеральной совокупности.

2) расчет в долях стандартного отклонения относительной успешности испытываемого климатипа,  $Q$ :

$$Q = \frac{U}{\sigma},$$

где  $U$  – абсолютная успешность климатипа по конкретному показателю;  $\sigma$  – стандартное отклонение по всей выборке опыта;

3) получение обобщенного показателя успешности климатипа,  $\varphi$ :

$$\varphi = \frac{Q_{\text{СКС}} + Q_{\text{ПКГ}} + Q_{\text{С1,2}}}{3},$$

где  $Q_{\text{СКС}}$  – относительная успешность климатипа по СКС;  $Q_{\text{ПКГ}}$  – относительная успешность климатипа по ПКГ;  $Q_{\text{С1,2}}$  – относительная успешность климатипа по С1,2.

Успешность климатипов оценивали по следующим градациям: успешные, с удовлетворительным состоянием и неблагоприятные. При этом к успешным были отнесены все климатипы, у которых значение обобщенного показателя успешности ( $\varphi$ ) менее  $-0,5$ , к неблагоприятным – более  $+0,5$ . Показатель успешности, приближенный к нулю, означал среднее значение данного показателя по всей выборке.

Влияние метеорологических факторов изучали по дендрохронологическим образцам (кернам), отобраным у четырех климатипов, в том числе местного, с разной степенью поражения корневой губкой. У каждого климатипа отбирали по 20–22 керна, учитывая представленность деревьев разных категорий состояния на ПП. При анализе данных учитывали расположение деревьев в очагах усыхания (очаг, границы очага, межочаговое пространство). В качестве параметра отклика сосны на климатические изменения были приняты индексы радиального прироста, которые рассчитывались путем деления ширины годичного кольца текущего года к средней ширине годичного кольца за последние пять лет. Для анализа влияния погодных данных использовали архив погоды на сайте [www.gr5.ru](http://www.gr5.ru) [Архив погоды, 2023]. Установление зависимостей между величиной индекса прироста и метеорологических переменных осуществляли методами корреляционного анализа. В качестве основных параметров были выбраны: количество осадков и среднемесячная температура по месяцам вегетационного периода, показатель влагообеспеченности вегетационного периода – гидротермический коэффициент Г.Т. Селянинова (ГТК).

*Результаты исследования.* По данным оценки современного состояния географических культур установлено, что в последние годы в них продолжались активные процессы усыхания сосны от корневой губки (рис. 1).

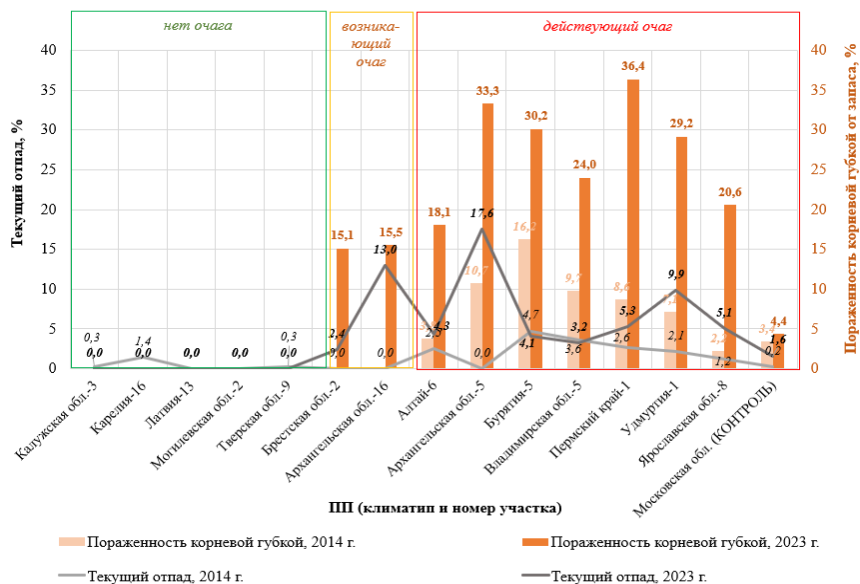


Рис. 1. Динамика текущего отпада и доли пораженных корневой губкой деревьев сосны в географических культурах Серебряноборского опытного лесничества, 2014–2023 гг.

Fig. 1. Dynamics of trees dieback and the proportion of trees infected by annosum root rot in Scots pine provenances of Serebryanoborskoe Experimental Forestry, 2014–2023

До 2014 г. на обследованных участках от поражения этим патогеном погибло 40 деревьев, к 2015 г. – 57 деревьев. В 2017 г. древостои были частично пройдены выборочной санитарной рубкой, но это мероприятие было проведено не в полном объеме и не повлияло на прекращение роста очагов, так как были удалены единичные сухостойные деревья. В настоящее время общее число деревьев, погибших или усыхающих от корневой губки, составляет 201 шт. (16,5% от всех деревьев на повторно обследованных ПП). Доля пораженных деревьев на участках с действующими очагами увеличилась в 2–9 раз. Общая площадь куртин усыхания возросла более чем в 2,5 раза (вместо 0,10 га достигла 0,26 га). Таким образом, заметно прогрессирующее поражение культур за период наблюдений.

На двух из семи ПП, характеризовавшихся ранее отсутствием очагов корневой губки, возникли группы усыхающих деревьев, пораженных этим патогеном. Они приурочены к более старым куртинам усыхания на примыкающих ПП, что свидетельствует о распространении инфекции от соседних зараженных деревьев.

По данным учетов в 2022–2023 гг. отмечено усыхание более половины деревьев, имевших при учете в 2014–2015 гг. категорию состояния «сильно ослабленные» (рис. 2). Из ослабленных деревьев погибло каждое пятое дерево, из здоровых – каждое десятое.

В 2014–2015 гг. отмечалось усыхание деревьев преимущественно низших классов Крафта (в среднем 5-го) с диаметрами, меньше среднего диаметра всех деревьев на ПП (рис. 3). В последние годы наблюдается гибель деревьев средних классов Крафта (в основном 3-го). При первом учете не было выявлено ни одного пораженного дерева 1-го класса Крафта, однако в настоящий момент доля лидирующих деревьев, оказавшихся в очагах усыхания и погибших от заболевания, заметно возросла. Средний диаметр деревьев, пораженных корневой губкой, увеличился, и на некоторых участках достиг среднего значения диаметра всех деревьев на ПП.

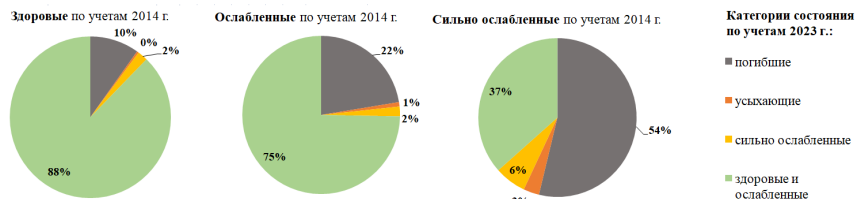


Рис. 2. Динамика состояния деревьев сосны в географических культурах Серебряноборского опытного лесничества в период с 2014 по 2023 гг.

Fig. 2. Dynamics of tree condition in Scots pine provenances of Serebryanoborskoe Experimental Forestry, 2014–2023

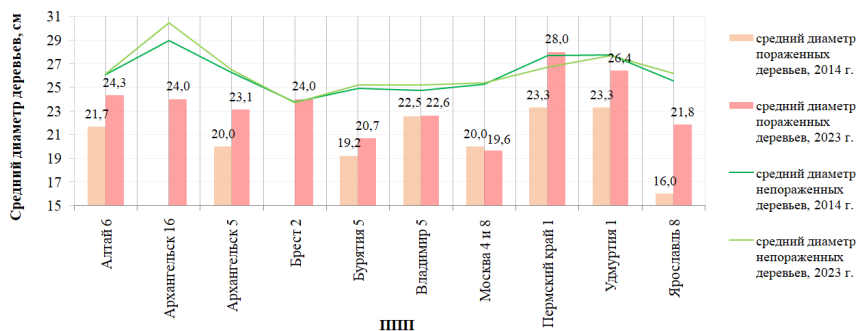


Рис. 3. Средний диаметр пораженных и непораженных корневой губкой деревьев по учетам 2014 и 2023 гг. Московская обл., Серебряноборское опытное лесничество

Fig. 3. Mean diameter of trees affected by annosum root rot and sustainable trees (2014–2023). Moscow region, Serebryanoborskoe Experimental forestry

На примере фрагмента ПП Алтай-6 (культуры происхождения из Алтайского края) приведена динамика роста куртин усыхания за период исследования (рис. 4). Анализ пространственного расположения очагов усыхания показал, что иногда один очаг поражения охватывает два и более участка с разными климатипами (рис. 5). При этом в ряде случаев куртины пораженных деревьев примыкают к участкам с климатипами, не имеющими к настоящему времени признаков поражения корневой губкой. Роль климатипа в формировании устойчивости подтверждают и однородные почвенные условия, которые в целом благоприятны для развития корневой губки. Ранее участки использовались как сельхозугодья, поэтому для них характерно наличие в почвах плужной подошвы, являющейся водоупором. Такие условия способствуют образованию у сосны поверхностных боковых корней, наиболее подверженных заражению, а также значительному колебанию увлажненности почвы в верхних горизонтах при дефиците и избытке осадков [Негруцкий, 1973].

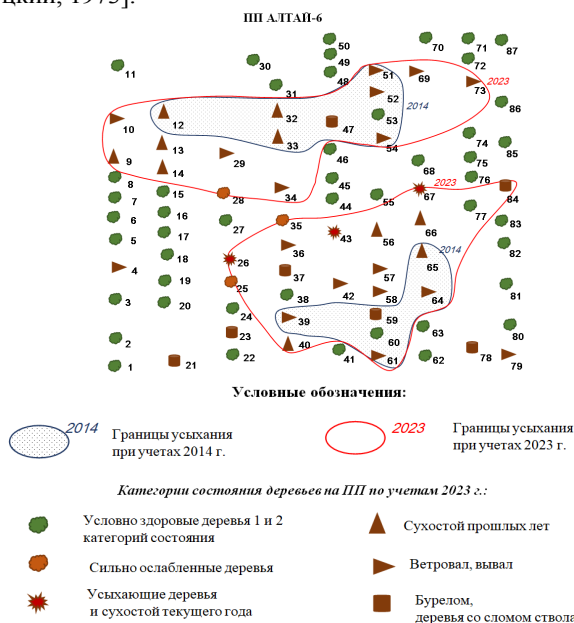


Рис. 4. Динамика усыхания деревьев сосны на постоянной пробной площади в географических культурах Серебряноборского опытного лесничества на примере климатипа сосны из Алтайского края. 2014–2023 гг.

Fig. 4. Dynamics of trees mortality on the trial plot in Scots pine provenances of Serebryanoborskoe Experimental Forestry, 2014–2023

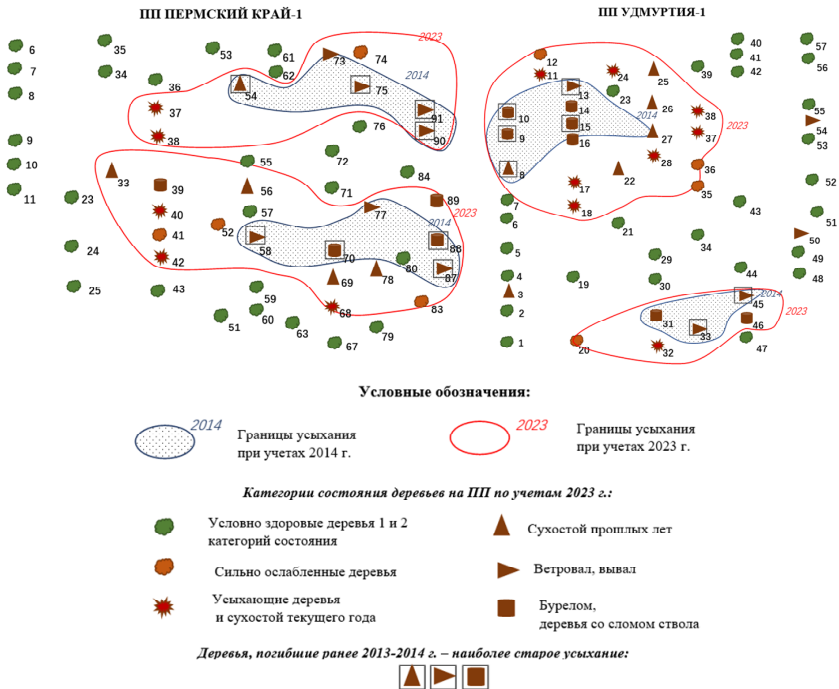


Рис. 5. Прилегающие постоянные пробные площади с общим очагом усыхания. Серебряноборское опытное лесничество, 2014–2023 гг.

Fig. 5. Adjacent trial plots with a common rot disease pocket. Serebryanoborskoe Experimental Forestry, 2014–2023

В связи с тем, что исследование проводили в географических культурах, представляет интерес выяснить, как повлияли произошедшие изменения на успешность климатипов, оцененную ранее по материалам учетов 2014–2015 гг. Установлено, что почти у половины климатипов оценка показателя успешности ухудшилась. Климатипы из Ярославской, Тверской областей, Алтайского края и Брестской области Беларуси перешли из группы «успешные» в группу «удовлетворительного состояния» со средними показателями успешности (рис. 6). Связано это с ростом очагов корневой гнили (ПП Ярославская область, Алтайский край, Брестская область) или частичным повреждением участков буреломом (ПП Тверская область). Из удовлетворительной группы в неблагоприятную перешли климатипы из Архан-

гельской области, Удмуртии и Пермского края также в связи с распространением очагов корневой губки. Улучшилось значение показателя успешности у всех климатипов, не подвергшихся до настоящего времени заражению корневой губкой, при этом они были оценены как успешные и при предыдущем исследовании. Климатипы, с отмеченными ранее крупными очагами усыхания, остались в группе «неблагополучные». У контрольного климатипа местного происхождения оценка улучшилась, но также как и ранее осталась удовлетворительной.

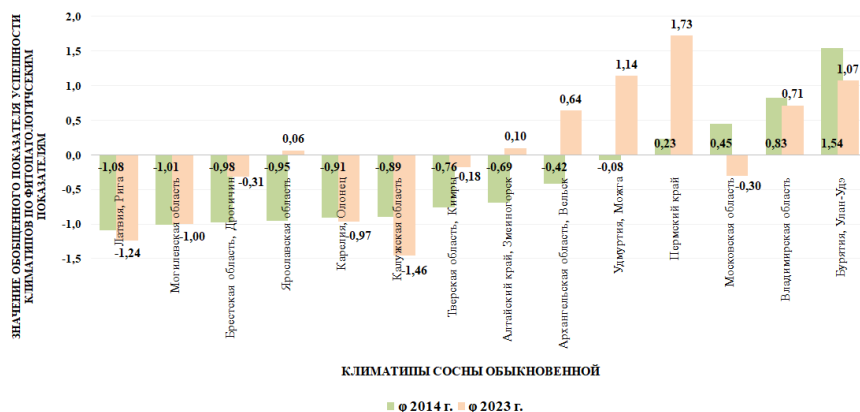


Рис. 6. Динамика успешности климатипов сосны в географических культурах Серебряноборского опытного лесничества за период 2014–2023 гг.

Fig. 6. Dynamics of Scots pine provenances success in Serebryanoborskoe Experimental Forestry, 2014–2023

Для выяснения причин активного роста очагов корневой губки был проведен анализ условий, способствующих ослаблению сосны, на основе динамики радиального прироста по годам. Для деревьев в очагах усыхания характерно резкое снижение приростов (рис. 7). Устойчивый спад прироста у зараженных деревьев начинается в среднем за четыре года до их гибели. Это объясняется отмиранием корней, пораженных гнилью, и снижением способности деревьев поглощать воду и питательные вещества [Gori et al., 2013]. Увеличение прироста отмечено у экземпляров, произрастающих в отдалении от очагов, а также по их границам, что, по-видимому, связано с освобождением пространства для их роста вследствие гибели соседних деревьев.



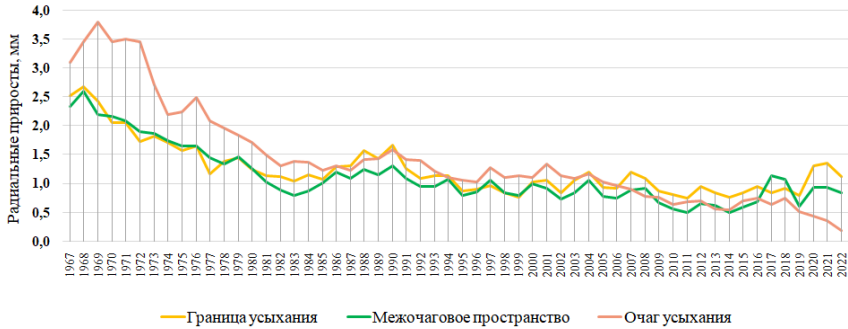


Рис. 7. Динамика радиального прироста у деревьев сосны в зависимости от расположения относительно очагов усыхания в географических культурах Сербряноборского опытного лесничества за период 1967–2022 гг.

Fig. 7. Dynamics of pine trees radial growth depending on trees location relative to disease pockets in Scots pine provenances of Serebryanoborskoe Experimental Forestry, 1967–2022

Установлено, что в большей степени на величину прироста влияет влагообеспеченность вегетационного периода. За период роста исследуемых культур наиболее засушливые условия сложились в вегетационный период 1967, 1992, 1995, 2002, 2010, 2011, 2014 гг. В эти годы наблюдается дружный спад приростов сосны у всех исследуемых климатических типов (рис. 8). Между значениями ГТК и средними индексами прироста выявлена связь умеренной силы: у разных климатических типов коэффициент корреляции (далее –  $r$ ) с уровнем значимости 0,01 составляет от 0,37 (Брестская область) до 0,51 (Алтайский край). За последние 10 лет эта зависимость усилилась:  $r$  варьирует от 0,49 (Брестская область) до 0,62 (Бурятия).

Известно, что сосна обыкновенная обладает значительной приспособленностью к резким изменениям погодных условий [Правдин, 1964]. Однако по некоторым наблюдениям, после засухи отмечается резкое снижение прироста и ослабление насаждений, повышение интенсивности усыхания сосновых культур от корневой губки [Синадский, 1983; Сингаллин, 2017]. Полученные нами данные подтверждают этот вывод. В большей степени отклик прироста на засуху прослеживается у сосны происхождением из Бурятии, характеризующейся к тому же сильной степенью поражения корневой губкой.

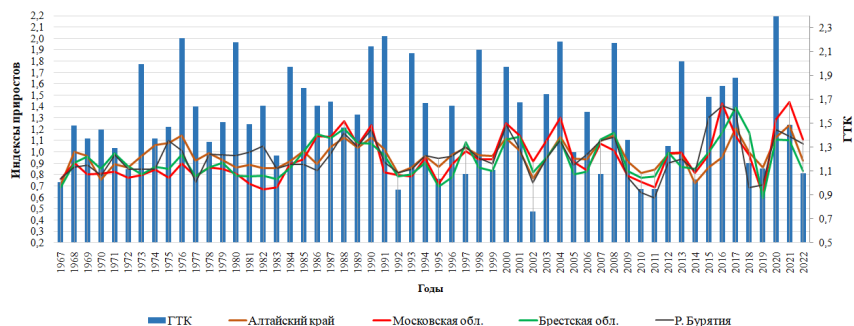


Рис. 8. Динамика индексов приростов деревьев сосны в географических культурах Серебряноборского опытного лесничества в связи с изменением значений ГТК по годам на примере разных климатипов сосны за период 1967–2022 гг.

Fig. 8. Dynamics of pine trees growth indices in Scots pine provenances of Serebryanoborskoe Experimental Forestry in connection with changes in moisture availability during the growing season, 1967–2022

Из различных метеопараметров наибольшее влияние на величину индекса прироста оказывают осадки в течение вегетационного периода:  $r$  с уровнем значимости 0,01 составляет от 0,37 (Брестский климатип) до 0,47 (Бурятский климатип). По месяцам вегетационного периода наибольшая связь отмечена между величиной индекса прироста и количеством осадков за июль ( $r$  с уровнем значимости 0,05 равен от 0,27 до 0,44), причем за последние 20 лет степень влияния количества осадков в июле на величину радиального прироста заметно усилилась ( $r$  с уровнем значимости 0,01 достигает от 0,46 до 0,55). Не выявлено связи между среднегодовой температурой воздуха и величиной индексов прироста. В большинстве случаев взаимосвязь этих показателей слабая и обратная.

**Выводы.** В последние годы в географических культурах Серебряноборского опытного лесничества темпы усыхания сосны от корневой губки заметно возросли. Климатипы из Тверской, Калужской областей, Карелии, Латвии и Могилевской области Белоруссии продолжают сохранять устойчивость к этому патогену.

Анализ пространственного расположения куртин усыхания показал, что один очаг поражения может как охватывать два и более участка с разными климатипами, так и прерываться на границе двух климатипов. Роль климатипа в формировании устойчивости подтверждают и однородные почвенные условия местопрорастания.

Наибольшее влияние на величину индекса радиального прироста деревьев оказывают осадки, выпадающие в течение вегетационного периода, и в целом его влагообеспеченность. За период с 2014 по 2023 гг. усилилась степень воздействия климатических факторов на величину радиального прироста деревьев, что свидетельствует о снижении их устойчивости. Значительные колебания ГТК по годам, наиболее вероятно, способствовали ослаблению культур и росту очагов усыхания, вызванного корневой губкой.

Установлена разная степень снижения прироста климатипами в ответ на недостаточность влагообеспеченности вегетационного периода, что может также являться одним из механизмов устойчивости.

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

### Библиографический список

Алексеев И.А. Научные основы лесохозяйственных мер борьбы с корневой губкой в лесах Полесья и лесостепи УССР: автореф. дисс. ... д. с.-х. наук. Л., 1974. 35 с.

Архив погоды в Москве (ВДНХ) // Расписание Погоды. 2023. URL: [https://tr5.ru/Архив\\_погоды\\_в\\_Москве\\_\(ВДНХ\)](https://tr5.ru/Архив_погоды_в_Москве_(ВДНХ)) (дата доступа: 23.11.2023).

Глазунов Ю.Б., Мельник П.Г., Мерзленко М.Д. Рост саратовского климатипа сосны обыкновенной в условиях Подмоскovie // Аграрный научный журнал. 2016. № 9. С. 9–14.

Глазунов Ю.Б., Мерзленко М.Д., Мельник П.Г. Сравнительные особенности роста карельского климатипа сосны обыкновенной в условиях Подмоскovie // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2015. № 4. С. 67–72.

Кобец Е.В. Рекомендации по защите хвойных пород от корневой губки в лесах европейской части России. Пушкино: ВНИИЛМ. 2001. 16 с.

Мельник П.Г., Глазунов Ю.Б., Мерзленко М.Д. Рост и производительность архангельского климатипа сосны обыкновенной в условиях Подмоскovie // ИВУЗ. Лесной журнал. 2017. № 1[355]. С. 9–20.

Мерзленко М.Д., Глазунов Ю.Б., Мельник П.Г. Результаты выращивания провенциенций сосны обыкновенной в географических посадках Серебряноборского опытного лесничества // Лесоведение. 2017. № 3. С. 176–182.

Мерзленко М.Д., Глазунов Ю.Б., Мельник П.Г. Успешность роста алтайского климатипа сосны в условиях Подмоскovie // Вестник Алтайского государственного аграрного университета, 2014. № 10 [120]. С. 59–65.

Методы мониторинга вредителей и болезней леса: справочник Болезни и вредители в лесах России / под общ. ред. В.К. Тузова. М.: ВНИИЛМ, 2004. Т. III. 200 с.

Негруцкий С.Ф. Корневая губка. М.: Агропромиздат. 1973. 199 с.

Полякова Г.А., Мерзленко М.Д., Глазунов Ю.Б., Коженкова А.А., Колганихина Г.Б., Мельник П.Г. Серебряноборское опытное лесничество – основная база биогеоэкологических работ Института лесоведения РАН в средней полосе России // Лесохозяйственная информация. № 4. 2019. С. 67–78.

Правдин Л.Ф. Сосна обыкновенная. Изменчивость, внутривидовая систематика и селекция. М.: Наука. 1964. 192 с.

Рысин Л.П., Полякова Г.А., Савельева Л.И. и др. Леса Москвы. Опыт организации мониторинга. М.: Ин-т лесоведения РАН. 2001. 148 с.

Серебряноборское опытное лесничество: 65 лет лесного мониторинга. М.: Тов.-во науч. изд. КМК, 2010. 260 с.

Синадский Ю.В. Сосна. Ее вредители и болезни. М.: Наука. 1983. 344 с.

Сингатуллин И.К. Состояние основных древостоев Республики Татарстан после засухи 2010 года // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2017. № 3[27]. С. 95–101.

Шишкина А.А., Колганихина Г.Б. Фитопатологическая оценка успешности географических культур сосны обыкновенной в Серебряноборском опытном лесничестве // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2016. № 3. С. 22–38.

Asiegbu F.O. Adomas A., Stenlid J. Conifer root and butt rot caused by *Heterobasidion annosum* [Fr.] Bref. s.l. // Molecular plant pathology. 2005. № 6 [4]. P. 395–409.

Garbelotto M., Gonthier P. Biology, Epidemiology, and Control of *Heterobasidion* Species Worldwide // Annual Review of Phytopathology. Vol. 51. 2013. P. 39–59.

Gori Y., Cherubini P., Camin F., La Porta N. Fungal root pathogen [*Heterobasidion parviporum*] increases drought stress in Norway spruce stand at low elevation in the Alps // European Journal of Forest Research. 2013. 132[4]. P. 607–619.

Kovalchuk A., Wen Z., Sun H., Asiegbu F. *Heterobasidion annosum* s.l.: Biology, genomics, and pathogenicity factors // Forest Microbiology. 2022. P. 345–359.

La Porta N., Capretti P., Thomsen I.M. et al. Forest pathogens with higher damage potential due to climate change in Europe // Canadian Journal of Plant Pathology, 2008. 30(2). P. 177–195.

## References

Alekseev I.A. Nauchnye osnovy lesokhozyajstvennyh mer borby s kornevoj gubkoj v lesah Polesya i lesostepi USSR: avtoref. diss. ... d. s.-h. n. L., 1974. 35 p. (In Russ.)

Arhiv pogody v Moskve (VDNH). *Raspisanie Pogody*, 2004. URL: [https://rp5.ru/Arhiv\\_pogody\\_v\\_Moskve\\_\(VDNH\)](https://rp5.ru/Arhiv_pogody_v_Moskve_(VDNH)) (accessed November 23, 2023). (In Russ.)

Asiegbu F.O. Adomas A., Stenlid J. Conifer root and butt rot caused by *Heterobasidion annosum* [Fr.] Bref. s.l. *Molecular plant pathology*, 2005, no. 6 [4], pp. 395–409.

Garbelotto M., Gonthier P. Biology, Epidemiology, and Control of *Heterobasidion* Species Worldwide. *Annual Review of Phytopathology*, 2013, vol. 51, pp. 39–59.

Glazunov Yu.B., Melnik P.G., Merzlenko M.D. Rost saratovskogo klimatipa sosny obyknovennoj v usloviyah Podmoskovya. *Agrarnyj nauchnyj zhurnal*, 2016, no. 9, pp. 9–14. (In Russ.)

Glazunov Yu.B., Merzlenko M.D., Melnik P.G. Sravnitelnye osobennosti rosta karelskogo klimatipa sosny obyknovennoj v usloviyah Podmoskovya. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 4, pp. 67–72. (In Russ.)

Gori Y., Cherubini P., Camin F., La Porta N. Fungal root pathogen [*Heterobasidion parviporum*] increases drought stress in Norway spruce stand at low elevation in the Alps. *European Journal of Forest Research*, 2013, 132[4], pp. 607–619.

Kobec E.V. Rekomendacii po zashite hvoynyh porod ot kornevoj gubki v lesah evropejskoj chasti Rossii. Pushkino: VNIILM. 2001. 16 p. (In Russ.)

Kovalchuk A., Wen Z., Sun H., Asiegbu F. *Heterobasidion annosum* s.l.: Biology, genomics, and pathogenicity factors. *Forest Microbiology*, 2022, pp. 345–359.

La Porta N., Capretti P., Thomsen I.M. et al. Forest pathogens with higher damage potential due to climate change in Europe. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 2008, 30(2), pp. 177–195.

Melnik P.G., Glazunov Yu.B., Merzlenko M.D. Rost i proizvoditelnost arhangelskogo klimatipa sosny obyknovennoj v usloviyah Podmoskovya // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. IVUZ. Lesnoj zhurnal*, 2017, no. 1[355], pp. 9–20. (In Russ.)

Merzlenko M.D., Glazunov Yu.B., Melnik P.G. Rezultaty vyrashivaniya proveniencij sosny obyknovennoj v geograficheskikh posadkah Sereb-ryanoborskogo opytnogo lesnichestva. *Lesovedenie*, 2017, no. 3, pp. 176–182. (In Russ.)

Merzlenko M.D., Glazunov Yu.B., Melnik P.G. Uspeshnost rosta al-tajskogo klimatipa sosny v usloviyah Podmoskovya. *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2014, no. 10 [120], pp. 59–65. (In Russ.)

Metody monitoringa vreditelej i boleznej lesa: spravochnik Bolezni i vrediteli v lesah Rossii / pod obsh. red. V.K. Tuzova. M.: VNIILM, 2004, vol. III. 200 p. (In Russ.)

Negruckij S.F. Kornevaya gubka. M.: Agropromizdat. 1973. 199 p. (In Russ.)

Polyakova G.A., Merzlenko M.D., Glazunov Yu.B., Kozhenkova A.A., Kolganihina G.B., Melnik P.G. Serebryanoborskoe opytnoe lesnichestvo – os-novnaya baza biogeocenologicheskikh rabot Instituta lesovedeniya RAN v srednej polose Rossii. *Lesohozyajstvennaya informaciya*, 2019, no. 4, pp. 67–78. (In Russ.)

Pravdin L.F. Sosna obyknovennaya. Izmenchivost, vnutrividovaya sistematika i selekciya. M.: Nauka. 1964. 192 p. (In Russ.)

Rysin L.P., Polyakova G.A., Saveleva L.I. et al. Lesa Moskvy. Opyt organizacii monitoringa. M.: In-t lesovedeniya RAN. 2001. 148 p. (In Russ.)

Serebryanoborskoe opytnoe lesnichestvo: 65 let lesnogo monitoringa. M.: Tov.-vo nauch. izd. KMK, 2010. 260 p. (In Russ.)

Shishkina A.A., Kolganihina G.B. Fitopatologicheskaya ocenka us-peshnosti geograficheskikh kultur sosny obyknovennoj v Serebryanobor-skom opytnom lesnichestve. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo hozyajstva*, 2016, no. 3, pp. 22–38. (In Russ.)

*Sinadskij Yu. V. Sosna. Ee vrediteli i bolezni. M.: Nauka. 1983. 344 p. (In Russ.)*

*Singatullin I.K. Sostoyanie osnovnyh drevostoev Respubliki Tatarstan posle zasuhi 2010 goda. Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, 2017, no. 3[27], pp. 95–101.*

*Материал поступил в редакцию 10.01.2024*

---

**Шишкина А.А., Карпун Н.Н.** Динамика развития очагов корневой губки в географических культурах сосны Серебряноборского опытного лесничества // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 250. С. 67–82. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.67-82

Проанализирована динамика развития очагов корневой губки в географических культурах сосны обыкновенной 4-го класса возраста Серебряноборского опытного лесничества Института лесоведения РАН (Московская область). Установлено, что за период с 2014 по 2023 гг. темпы усыхания культур сосны от корневой губки многократно возросли, возникли новые куртины с пораженными деревьями. Патологический процесс в культурах начался при естественной дифференциации деревьев, и корневой губкой заражались в основном отстающие в росте экземпляры, затем поражение охватило более крупные деревья. Анализ пространственного расположения куртин усыхания показал, что один очаг поражения может охватывать два и более участка с разными климатипами, что позволяет предположить приуроченность очагов в том числе и к почвенным условиям местопроизрастания. Однако некоторые климатипы, несмотря на соседство с пораженными участками, сохранили устойчивость к корневой губке. Это климатипы из Тверской, Калужской областей, Карелии, Латвии и Могилевской области Беларуси. На этих постоянных пробных площадях следует продолжать наблюдения за состоянием насаждений. Методом дендрохронологического анализа установлено, что наибольшее влияние на величину индекса радиального прироста деревьев оказывают осадки, выпадающие в течение вегетационного периода, и в целом его влагообеспеченность. После засухи отмечается резкое снижение прироста у всех сосен, но в большей степени отклик прироста на дефицит осадков прослеживается у климатипов с более высоким уровнем поражения корневой губкой. В период с 2014 по 2023 гг. степень воздействия климатических факторов на величину радиального прироста деревьев усилилась, что способствовало их ослаблению и росту очагов усыхания, вызванного корневой губкой.

**Ключевые слова:** климатипы сосны, *Pinus sylvestris*, Московская область, *Heterobasidion annosum*, динамика усыхания, дендрохронология, метеорологические факторы, влияние засухи.

**Shishkina A.A., Karpun N.N.** Dynamics and development of annosum root rot in Scots pine provenances in Serebryanoborsky experimental forestry. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 250, pp. 67–82 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.67-82

The dynamics of annosum root rot development in Scots pine provenances of the 4th age-class in Serebryanoborskoe Experimental Forestry of Institute of Forest Science Russian Academy of Science (Moscow region) is analyzed. It is determined that for the period from 2014 to 2023 the rate of trees dieback caused by annosum root rot on the trial plots has increased many times, new pockets with affected trees have appeared. The pathological process began at the same time with the natural differentiation of trees, and the annosum root rot infected mainly suppressed pines, then the dieback spread to larger trees. An analysis of the spatial arrangement of disease pockets showed that one disease center could spread over two or more trial plots with different pine provenances, which suggests association of disease pockets with tree growth conditions including edaphic ones. However, some provenances, despite their proximity to the affected plots, retained resistance to the root rot. These are provenances from the Tver, Kaluga regions, Karelia, Latvia and the Mogilev region of Belarus. On these trial plots, monitoring of the condition of the plantings should be continued. Using the method of dendrochronological analysis, it was established that the greatest influence on the value of the radial growth index of trees is exerted by precipitation falling during the growing season and, in general, by the moisture availability during the growing season. After a drought, a sharp decrease in growth is observed in all climatypes, but a greater response of growth to precipitation deficit is observed in climatypes with a higher level of root rot damage. During 2014-2023 the degree of influence of climatic factors on the magnitude of the radial growth of trees increased, which contributed to their weakening and increase the rate of trees dieback caused by annosum root rot.

**Keywords:** pine provenances, *Pinus sylvestris*, Moscow region, *Heterobasidion annosum*, trees dieback dynamics, dendrochronology, meteorological factors, influence of drought.

---

**ШИШКИНА Анастасия Александровна** – соискатель Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 7851-1821. ORCID: 0009-0004-0378-512X.

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

**SHISHKINA Anastasia A.** – aspirant, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 7851-1821. ORCID: 0009-0004-0378-512X.

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

**КАРПУН Наталья Николаевна** – профессор кафедры защиты леса, древесиноведения и охотоведения Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор биологических наук, доцент. SPIN-код: 7293-8389. ORCID: 0000-0002-7696-3618. Web of Science: U-1502-2019. Scopus: 56955491500.

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

**KARPUN Natalia N.** – DSc (Biological), Docent, Professor of the Department of Forest Protection, Timber Science and Hunting, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 7293-8389. ORCID 0000-0002-7696-3618. Web of Science: U-1502-2019. Scopus: 56955491500.

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



**И.А. Панин, С.В. Залесов, Ю.А. Аржанников**

## **РЕСУРСЫ ЯГОДНЫХ РАСТЕНИЙ НА ПОЛИГОНАХ ДОБЫЧИ ЗОЛОТА И ПЛАТИНЫ**

*Введение.* Отрасль заготовки дикорастущих пищевых и лекарственных растений в настоящее время является развивающейся как в России, так и за рубежом [Морозов, 2015; Бандерич, 2016; Рыжкова, 2017; Фридман, 2017; Грязькин и др., 2020; Tahvanainen и др., 2019]. Лесные ягоды применяются в пищевой промышленности для изготовления кондитерских и хлебобулочных изделий, напитков, соков, джемов, ароматических и вкусовых добавок [Годовалов и др., 2018; Zorzi и др., 2020]. Лесные ягоды обладают выраженными лекарственными свойствами, что определяет их востребованность и в качестве лекарственного растительного сырья [Jay и др., 1998; Белова и др., 2018; Годовалов и др., 2018].

Одной из главных проблем отрасли заготовок дикоросов является недостаток справочных материалов, необходимых для эффективного планирования и организации работы предприятий, заготавливающих лесные ягоды [Смирнов, Шевелев, 2016; Грязькин и др., 2020]. Сведения о запасах дикорастущих ягод мозаичны и неполны. В отдельных странах существуют целые системы стационарных объектов по наблюдению за фенологией и урожайностью дикорастущих ягод [Nestby и др., 2008]. В России актуальные ресурсоведческие исследования охватывают только отдельные регионы. Достаточно много публикаций по изучению запасов лесных ягод северо-запада России [Грязькин и др., 2020], некоторых районов Сибири и дальнего востока [Смирнова, Шевелев, 2016]. В Свердловской области запасы дикорастущих ягодников изучались только в отдельных лесничествах [Запаранюк, 1984]. Нами ранее проведён ряд исследований ресурсов дикорастущих пищевых и лекарственных растений на северо-западе Свердловской области [Панин, Залесов, 2016].

В отечественной и в зарубежной литературе не обнаружено исследований дикорастущих ягодников на полигонах добычи полезных ископаемых промывным способом. Отдельные сведения можно почерпнуть из работ, исследующих восстановление растительности на полигонах [Низкий, 2009; Яборов, 2011; Петров, 2018]. Согласно им, ягодные растения, по меньшей мере, присутствуют в живом напочвенном покрове (ЖНП) уже в начале процесса восстановления растительного покрова.

Отметим, что добыча золота и платины промывным способом была достаточно распространена в XX веке и применяется по настоящее время

[Лешков, 1971; Баранов и др., 2014]. В ходе разработок полезных ископаемых в Свердловской области нарушено около 2,7% территорий. Большая часть – следствие разработок полезных ископаемых в долинах рек при помощи драг и гидромониторов [Старицына, Беличев, 2018]. Важно отметить, что технология добычи промывным способом не приводит к загрязнению окружающей среды, сопровождается созданием сети качественных дорог, обеспечивая транспортную доступность территории, что делает их потенциально пригодными для заготовок лесных ягод.

*Материалы и методика исследования.* Целью исследования является определение биологических запасов дикорастущих ягодных растений ЖНП на полигонах добычи золота и платины промывными технологиями в условиях северо-запада Свердловской области. В качестве рабочей гипотезы мы предположили, что ягодные растения присутствуют в ЖНП, их запасы могут изменяться в лесовосстановительном процессе, отличаться на полигонах различного происхождения, а также зависеть от наличия либо отсутствия работ по рекультивации.

В ходе исследования было заложено 19 ПП., из них 7 расположены на полигонах добычи золота и платины при помощи гидромониторов. Нерекультивированных полигонов данного происхождения в районе исследования нами обнаружено не было. 12 ПП заложены на отвалах после добычи золота и платины с помощью драги. Из них на 6 ПП была проведена рекультивация в виде выравнивания поверхности и посадки лесных культур сосны, на других 6 ПП рекультивация не проводилась. Для определения давности возникновения отвалов и рекультивации использовались акты и материалы лесоустройства Карпинского лесничества.

Закладка ПП проводилась по общепринятым в лесной таксации методикам [Бунькова и др., 2020]. Внутри определялся видовой состав растений ЖНП, их проективное покрытие и надземная фитомасса в абсолютно сухом состоянии. Урожайность ягодных видов ЖНП определялась по стандартным методикам [Панин, Белов, 2022]. Определение всех показателей производилось на учётных площадках, размещаемых равномерно по ходовым линиям. Учёт урожайности проводился ежегодно в период с 2019 по 2022 гг. Все расчеты и обработка данных проводилась с помощью программы Microsoft Excel 2010. Проведён корреляционный анализ [Зайцев, 1984].

*Результаты исследования.* Согласно данным табл. 1, давность возникновения полигонов после работы гидромонитора варьирует в диапазоне от 10 до 55 лет. После работы драг 12–45 лет. Давность рекультивации дражных отвалов составляет 10–40 лет. Более старые полигоны труднодоступны. Драга в районе исследования была остановлена и демонтирована в 2006 г., а в 2009 г. была полностью прекращена разработка золота и платины.

Таблица 1

**Характеристика ПП**  
**Characteristics of sample plots**

№ ПП	Координаты	Давность полигона, лет		Состав древостоя
		возникновение	рекультивации	
Полигоны гидравлики				
2	59.512081, 59.143649	10	7	—
1	59.510598, 59.148373	11	9	—
10	59.505054, 59.132090	11	10	—
9	59.501832, 59.144840	15	10	—
4	59.501832, 59.144840	18	15	—
3	59.512558, 59.154445	50	45	5С1КЗБ1Ос
11	59.496065, 59.156159	55	50	8С1К1Е+Б,П
Дражные полигоны				
5	59.502457, 59.184009	12	10	—
16	59.500091, 59.178914	30	30	10С+Б
18	59.492113, 59.200516	43	30	10С+Б
17	59.510568, 59.167751	45	35	10Б
12	59.457369, 58.958950	45	40	8С2Б+Е,К
19	59.517127, 59.243860	45	40	8С2Б
15	59.501831, 59.226193	12	Нет	—
6	59.518262, 59.247278	15	Нет	—
7	59.508469, 59.165117	16	Нет	—
8	59.498751, 59.224642	16	Нет	—
14	59.453314, 58.953286	25	Нет	7С2Б1Е+П
13	59.494835, 58.895166	40	Нет	9С1Е+Ос

Появление сомкнутого древостоя фиксируется через 25–30 лет с момента появления отвалов. Относительная полнота насаждений существенно варьирует в диапазоне от 0,6 до 0,9. Большие показатели относительной полноты характерны для дражных полигонов. Древостой преимущественно сосновый представлен смесью выживших культур и самосева. Также в составе древостоя присутствует кедр, ель, пихта, берёза, осина, ивы и ольха серая.

Всего в ЖНП изучаемых насаждений было зафиксировано 5 видов ягодных растений: черника обыкновенная *Vaccinium myrtillus* L., голубика обыкновенная *Vaccinium uliginosum* L., брусника обыкновенная *Vaccinium*

*vitis-idaea* L., земляника лесная *Fragaria vesca* L. и костяника каменистая *Rubus saxatilis* L. Показатели их проективного покрытия и урожайности представлены в табл. 2.

Таблица 2

### Проективное покрытие и урожайность ягодных растений ЖНП

#### Progressive coating and yields of berry plants of field layer cover

№ ПП	Давность, лет		Проективное покрытие, %						Урожайность, кг/га				
	Возникновение полигона	Рекультивация полигона	Черника обыкновенная <i>Vaccinium myrtillus</i> L.	Брусника обыкновенная <i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.	Голубика обыкновенная <i>Vaccinium uliginosum</i> L.	Земляника лесная <i>Fragaria vesca</i> L.	Костяника обыкновенная <i>Rubus saxatilis</i> L.	Черника обыкновенная <i>Vaccinium myrtillus</i> L.	Брусника обыкновенная <i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.	Голубика обыкновенная <i>Vaccinium uliginosum</i> L.	Земляника лесная <i>Fragaria vesca</i> L.	Костяника обыкновенная <i>Rubus saxatilis</i> L.	
Полигоны после работы гидромонитора													
2	10	7	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
1	11	9	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
10	11	10	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
9	15	10	–	–	–	2,7	9,8	–	–	–	0,7	3,2	
4	18	15	–	–	3,2	0,6	–	–	–	2,4	0,0	–	
3	50	45	–	27,0	–	–	10,2	–	11,4	–	–	0,0	
11	55	50	0,8	35,1	4,0	–	15,7	0	27,2	1,6	–	0,9	
Дражные полигоны													
5	12	10	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
16	30	30	9,8	6,4	–	3,0	–	0,0	1,1	–	0,2	–	
18	43	30	–	3,0	–	0,4	–	–	0	–	0	–	
17	45	35	–	1,3	0,1	4,4	2,0	–	0	0	0,4	0,5	
12	45	40	2,9	11,4	–	–	–	0	7,4	–	–	–	
19	45	40	–	3,0	–	1,5	–	–	0,0	–	0	–	
15	12	Нет	–	–	–	3,6	–	–	–	–	0,2	–	
6	15	Нет	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
7	16	Нет	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
8	16	Нет	–	–	–	3,8	–	–	–	–	0,4	–	
14	25	Нет	–	–	–	–	0,4	–	–	–	–	0	
13	40	Нет	7,1	4,0	–	–	–	1,6	0,6	–	–	–	

В условиях ПП 2, 1, 10, 5, 6 и 7, т. е. в течение первых 7–16 лет после начала восстановления растительности, ягодные растения в ЖНП отсутствуют. Первыми появляются травянистые ягодные виды, такие как земляника лесная и костяника каменистая. Представлены они незначительно. В условиях дражных полигонов проективное покрытие земляники и костяники составляет 0,4–17,7% и среднегодовой урожайностью не более 1,1 кг/га. На полигонах после работы гидромониторов наблюдается аналогичная картина. Исключением является ПП 9, в условиях которой присутствует земляника и костяника, при проективном покрытии 12,5% и среднегодовой урожайностью 3,9 кг/га.

Был проведён корреляционный анализ между давностью начала возникновения либо рекультивации на полигонах добычи драг металлов (x) и совокупной надземной фитомассой ягодных растений ЖНП в абсолютно сухом состоянии (y). Анализ проводился отдельно для ПП размещённых на полигонах после работы гидромониторов и драг (рис. 1 и 2).

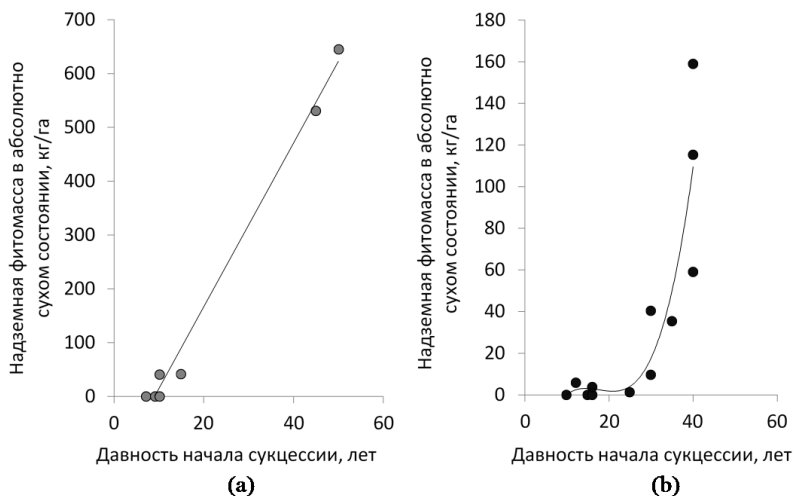


Рис. 1. График зависимости надземной фитомассы ягодных растений ЖНП в абсолютно сухом состоянии от давности рекультивации полигона добычи полезных ископаемых: а – с использованием гидромонитора; б – после драг

Fig. 1. Dependency graph of above-ground phytomass of berry plants of field layer cover in absolutely dry state on state of prescription of recultivation of mining site: а – using a hydraulic monitor; б – after drag

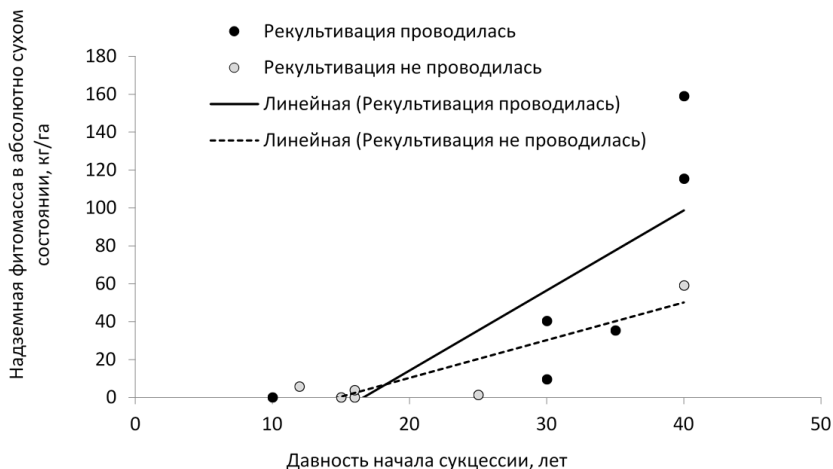


Рис. 2. Графики зависимости надземной фитомассы ягодных растений ЖНП в абсолютно сухом состоянии от давности начала восстановления растительности дражного полигона при проведении и при отсутствии рекультивации

Fig. 2. Dependency graph of above-ground phytomass of berry plants of field layer cover in absolutely dry state on prescription of beginning of succession of dredge landfill during and in the absence of revegetation

В условиях полигонов после работы гидромониторов коэффициент корреляции Пирсона ( $r_{xy}$ ) между изучаемыми признаками составляет 0,99, что свидетельствует о высокой тесноте связи. Анализ поля корреляции показал, что зависимость линейная, корреляционная, имеет постоянный знак. Её уравнение имеет вид:

$$y = 15,12 \cdot x - 137,25; R^2 = 0,99. \quad (1)$$

Для дражных полигонов коэффициент корреляции Пирсона ( $r_{xy}$ ) немного ниже и составляет 0,78, однако теснота связи остаётся высокой. Зависимость нелинейная, корреляционная, знак переменный, описывается уравнением параболы третьего порядка, которое имеет вид:

$$y = 0,01 \cdot x^3 - 0,55 \cdot x^2 + 9,4 \cdot x - 49,0; R^2 = 0,8. \quad (2)$$

Корреляционный анализ зависимости надземной фитомассы ягодных растений ЖНП от давности начала восстановления растительного покрова рекультивированных и нереккультивированных дражных полигонов в отдельности (рис. 2) показал, что тесная корреляционная связь между при-

знаками сохраняется, так как значение коэффициента корреляции Пирсона ( $r_{xy}$ ) составляет 0,74 и 0,89 соответственно. В обоих случаях уравнение линейное, положительное. Для рекультивированных полигонов данная зависимость описывается уравнением:

$$y = 4,2 \cdot x - 70,2; R^2 = 0,55. \quad (3)$$

Уравнение зависимости надземной фитомассы ягодных растений от давности возникновения нерекультивированного дражного полигона имеет вид:

$$y = 1,9 \cdot x - 29,4; R^2 = 0,79. \quad (4)$$

*Обсуждение.* Брусничники старых гидравлических полигонов с надземной фитомассой 477,5–559,2 кг/га в абсолютно сухом состоянии продуцируют ежегодно 11,4–27,2 кг/га плодов. Эксплуатационная привлекательность дикорастущих ягодников достаточно субъективна и в настоящее время не существует общепринятых критериев отнесения тех или иных ягодных площадей к категории промысловых. Исходя из лесоустроительных нормативов по таксации недревесной продукции леса, данные брусничники можно определить как обильные [Черкасов, 1990]. Основывать оценку можно на сопоставлении урожайности ягодника с данными исследований других регионов. Так для территории Мурманской области урожайность брусничников в среднем около 30 кг/га [Исаева, Зануздаева, 2019]. В то же время урожайность эксплуатационно-привлекательных зарослей Кировской области может достигать 264 кг/га [Кислицына и др., 2021]. В целом, для района исследования мы относили к категории эксплуатационных ягодники, при их среднегодовой урожайности 18–35 кг/га [Панин, Залесов, 2016]. Таким образом, рассматриваемые брусничники на зарастающих полигонах обладают не самыми большими запасами лесных ягод, однако вполне обосновано могут рассматриваться в качестве пригодных для коммерческих заготовок, особенно в условиях района исследования.

Другие ягодные виды в ЖНП имеют спорадическое, либо редкое распространение, не образуя густых зарослей. Следовательно, их не следует рассматривать в качестве объекта коммерческих заготовок. Тем не менее, само наличие данных видов не исключает возможности формирования отдельных продуктивных зарослей. Их обнаружение возможно только при подробном ресурсоведческом обследовании территории.

Установлена прямая корреляционная зависимость между давностью начала восстановления растительности и фитомассой ягодных растений ЖНП. Для рекультивированных полигонов за начало восстановления рас-

тельности нами был принят год рекультивации, поскольку выравнивание поверхности подразумевает повторное уничтожение большей части либо всей сформированной растительности. В ходе восстановления растительного покрова наблюдается увеличение запасов ягодных растений. Первые 15–16 лет в ЖНП отсутствуют плодоносящие виды, затем появляются травянистые ягодные растения – земляника лесная и костяника каменистая. Ягодные кустарнички зафиксированы спустя 18–30 лет. Их надземная фитомасса постепенно увеличивается и достигает максимальных значений уже под пологом сомкнувшегося древостоя через 40–45 лет.

Важно отметить, что динамика увеличения фитомассы ягодных растений на рекультивированных дражных отвалах значительно выше, чем на отвалах, где рекультивационных мероприятий проведено не было. Об этом наглядно свидетельствуют данные рис. 3. Спустя 40 лет после начала рекультивации фитомасса ягодных видов в ЖНП в 2–3 раза выше. Скорее всего, различие связано со скоростью накопления почвенного субстрата. У невыровненных отвалов сохраняют уклон, в результате чего органические, глинистые и песчаные элементы эффективно аккумулируются только в понижениях. С остальных участков происходит активное вымывание. Из-за этого развитие ЖНП идёт медленнее и на меньшей площади и для таких отвалов характерны меньшие запасы ягодных растений [Пугачев, Тихмев, 2007].

Большая фитомасса ягодных растений полигонов после работы гидромониторов по сравнению с дражными также связана с лучшими почвенными условиями. Сама технология промыва гидромонитором перемешивает крупные фракции породы с песком и глиной, что значительно ускоряет почвообразование.

*Заключение.* Таким образом, наша первоначальная гипотеза была подтверждена. Всего в ЖНП было зафиксировано 5 видов ягодных растений. Определены показатели их надземной фитомассы в абсолютно сухом состоянии, проективное покрытие и среднегодовая урожайность в период с 10 до 55 лет. На поздних этапах зарастания полигонов после использования гидромониторов формируются пригодные для коммерческого сбора брусничники. Установлено, что существует прямая зависимость между надземной фитомассой ягодных растений ЖНП и давностью начала восстановления растительности. В условиях рекультивированных дражных полигонов эксплуатационные ягодники не сформировались, однако если установленная тенденция продолжится, то через некоторое время можно



ожидать формирование дикорастущих ягодников и на них. Низкие темпы увеличения фитомассы дикорастущих ягод на нерекультивированных дражных полигонах наглядно свидетельствуют о важности проведения рекультивационных мероприятий после открытых разработок драг металлов для восстановления недревесных пищевых ресурсов. Полученные сведения могут быть использованы для организации и планирования работы предприятий-заготовителей дикорастущих ягод, а также при таксации недревесных ресурсов в насаждениях, сформированных на отвалах добычи драг металлов промывными технологиями.

*Вклад авторов.* Панин И.А. – планирование эксперимента, сбор полевых материалов, написание текста статьи, камеральная обработка данных; Залесов С.В. – планирование эксперимента, руководство, написание текста статьи; Аржанников Ю.А. – сбор полевых материалов, камеральная обработка данных.

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

### Библиографический список

Бандерич В.Б. Недревесная продукция (НП) лесохозяйственных земель как составляющая ресурсного потенциала // Проблемы и перспективы экономики и управления. 2016. № 2(6). С. 173–179.

Баранов А.Н., Гусева Е.А., Комова Е.М. Исследование коррозионной стойкости сталей, применяемых для изготовления дражного оборудования для добычи золота // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 1(21). С. 102–106

Белова Е.А., Гуляев А.Е., Коваленко Л.В., Шульгау З.Т. Полифенольные компоненты северных дикорастущих ягод, антиоксидантный и противовоспалительный потенциал их экстрактов // Вестник СурГУ. Медицина. 2018. № 1(35). С. 75–84.

Бунькова Н.П., Залесов С.В., Залесова Е.С. Основы фитомониторинга. Издание 3-е, дополненное и переработанное Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский государственный лесотехнический университет. 2020. 90 с.

Годовалов Г.А., Залесов С.В., Коростелёв А.С. Недревесная продукция леса 4-е изд., перераб. и доп. изд-во. Юрайт. 2018. 351 с.

Грязькин А.В., Корчагов С.А., Грибов С.Е. Потенциальные ресурсы лесных ягод в Вологодской области // The Scientific Heritage. 2020. № 45. С. 20–24.

Егошина Т.Л. Недревесные растительные ресурсы. НИА Природа. 2005. 83 с.

Зайцев Г.Н. Математическая статистика в экспериментальной ботанике. М.: Наука. 1998. 424 с.

Запаранюк А.Е. Повышение урожайности дикорастущих ягодников путём применения минеральных удобрений: дисс. 1984. 229 с.

Исаева Л.Г., Зануздаева Н.В. Разнообразие и урожайность ягодных дикорастущих растений Лапландского заповедника // Заповедники: биологическое и ландшафтное разнообразие, охрана и управление : матер. IX Всерос. науч.-практич. конференции, Симферополь, 09–11 октября 2019 года. 2019. С. 240–244.

Кислицына А.В., Егошина Т.Л., Гудовских Ю.В. Ресурсный потенциал и динамика изменчивости ценопопуляционных параметров брусники в южнотаёжных лесах Кировской области // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2021. № 4 (52). С. 42–53.

Лешиков В.Г. Современная техника и технология дражных работ: моногр. 1971. 288 с.

Морозов О.В. Современное состояние побочного пользования лесом // Лесное хозяйство. 2015. С. 75–78.

Низкий С.Е. Самовосстановление фитоценоза на участках золотодобычи // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2009. № 7 (57). С. 36–40.

Панин И.А., Белов Л.А. Определение ресурсов дикорастущих пищевых и лекарственных растений: учеб. пособие. УГЛТУ, 2022. 87 с.

Панин И.А., Залесов С.В. Ресурсы ягодных растений ельника нагорного типа леса на склонах северной и южной экспозиций горы Косьювинский // Аграрный научный журнал. 2016. № 8. С. 43–47.

Петров А.А. Восстановление почвенного покрова посттехногенных ландшафтов, сформированных при разработке месторождений золота северо-востока Якутии // Проблемы региональной экологии. 2018. № 5. С. 120–122.

Пугачев А.А., Тихменев Е.А. Восстановление горнопромышленных ландшафтов Крайнего Северо-Востока России // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2007. № 2. С. 72–82.

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

Смирнова И.Г., Шевелев С.Л. Особенности формирования популяций брусники в кедровых насаждениях Хакасии // Хвойные бореальной зоны. 2016. № 1. С. 72–75.

Старицына И.А., Беличев А.А. Анализ использования нарушенных земель Свердловской области // Аграрный вестник Урала. 2018. № 4 (171). С. 31–36.

Усков В.С. Особенности и возможности роста региональной экономики территорий Европейского Севера России // Социальное пространство. 2016. № 5(7). С. 1–11.

Уфимцев В.И., Стрельникова Т.О., Куприянов О.А. (2018) Структура живого напочвенного покрова в сосняках на участках рекультивации Кузбасса // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2018. № 44. С. 36–58.

Фридман А.М. Закупки дикорастущих даров природы – важная социально-экономическая миссия потребительской кооперации страны // *Фундаментальные и прикладные исследования кооперативного сектора экономики*. 2017. № 4. С. 31–37.

Яборов В.Т. Самозаращение техногенных отвалов Уруша-ольдойского золотороссыпного узла в Приамурье // *Лесной журнал*. 2011. № 5. С. 41–46.

Jay P.P., Thomas M., Samuel P.S., Baby J. Medicinal plants Agricultural University. 1998. 210 с.

Nestby R., Martinussen I., Nes A. Potential of the European Wild Blueberry (*Vaccinium myrtillus* L.) for cultivation and industrial exploitation in Norway // *Acta horticulture*. 2008. No. 810. С. 211–215.

Tahvanainen V., Miina J., Kurttila M. Climatic and Economic Factors Affecting the Annual Supply of Wild Edible // *Mushrooms and Berries in Finland Forests*. 2019. No. 10(5). URL: <https://doi.org/10.3390/f10050385>

Zorzi M., Gai F., Medana C., Aigotti R., Morello S., Peiretti P.G. Bioactive Compounds and Antioxidant Capacity of Small Berries // *Foods*. 2020. No. 9 (623). URL: <https://doi.org/10.3390/foods9050623>

## References

Banderich V.B. Non-wood products (NP) of forestry lands as a component of resource potential. *Problems and prospects of economics and management*, 2016, no. 2(6), pp. 173–179. (In Russ.)

Baranov A.N., Guseva E.A., Komova E.M. Investigation of corrosion resistance of steels used for the manufacture of draught equipment for gold mining. *The system. Methods. Technologies*, 2014, no. 1(21), pp. 102–106. (In Russ.)

Belova E.A., Gulyaev A.E., Kovalenko L.V., Shulgau Z.T. Polyphenolic components of northern wild berries, antioxidant and anti-inflammatory potential of their extracts. *Bulletin of SurGU. Medicine*, 2018, no. 1(35), pp. 75–84. (In Russ.)

Bunkova N.P., Zalesov S.V., Zalesova E.S. Fundamentals of phytomonitoring. 3rd edition, supplemented and revised by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Ural State Forestry University. 2020. 90 p. (In Russ.)

Egoshina T.L. Non-wood plant resources. 2005, 83 p. (In Russ.)

Friedman A.M. Purchases of wild gifts of nature – an important socio-economic mission of the consumer cooperation of the country. *Fundamental and applied research of the cooperative sector of the economy*, 2017, no. 4, pp. 31–37. (In Russ.)

Godovalov G.A., Zalesov S.V., Korostelev A.S. Non-wood forest production 4th ed., reprint. and an additional edition. Yurayt, 2018. 351 p. (In Russ.)

Gryazkin A.V., Korchagov S.A., Gribov S.E. Potential resources of wild berries in the Vologda Oblast. *The Scientific Heritage*, 2020, no. 45, pp. 20–24. (In Russ.)

Isaeva L.G., Zanzudayeva N.V. Diversity and productivity of wild berry plants of the Lapland Reserve. *Nature reserves: Biological and landscape diversity, protection*

*and management* : materials of the IX All-Russian Scientific and Practical Conference, Simferopol, October 09–11, 2019, pp. 240–244. (In Russ.)

Jay P.P., Thomas M., Samuel P.S., Baby J. Medicinal plants. Agricultural University. 1998. 210 p.

Kislitsyna A.V., Egoshina T.L., Gudovskikh Yu.V. Resource potential and dynamics of variability of the cenopopulation parameters of cranberries in the southern taiga forests of the Kirov region. *Bulletin of the Volga State Technological University. Series : Forest. Ecology. Nature-use*, 2021, no. 4 (52), pp. 42–53. (In Russ.)

Leshkov V.G. Modern technique and technology of draining works. Monography. 1971. 288 p. (In Russ.)

Low S.E. Self-healing of phytocenosis in areas of gold-bycha. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*, 2009, no. 7 (57), pp. 36–40. (In Russ.)

Morozov O.V. The current state of secondary use of the forest. *Forestry*, 2015, pp. 75–78. (In Russ.)

Nestby R., Martinussen I., Nes A. Potential of the European Wild Blueberry (*Vaccinium myrtillus* L.) for cultivation and industrial exploitation in Norway. *Acta horticulture*, 2008, no. 810, pp. 211–215.

Panin I.A., Belov L.A. Determination of resources of wild food and medicinal plants: textbook. UGLTU. 2022. 87 p. (In Russ.)

Panin I.A., Zalesov S.V. Resources of berry plants of the spruce forest of the upland forest type on the slopes of the northern and southern expositions of the Kosvinsky mountain. *Agrarian Scientific Journal*, 2016, no. 8, pp. 43–47. (In Russ.)

Petrov A.A. Restoration of the soil cover of post-technological landscapes formed during the development of gold deposits in the North-East of Yakutia. *Problems of regional ecology*, 2018, no. 5, pp. 120–122. (In Russ.)

Pugachev A.A., Tikhmenev E.A. Restoration of mining landscapes of the Extreme North-East of Russia. *Bulletin of the North-Eastern Scientific Center of the FEB RAS*, 2007, no. 2, pp. 72–82. (In Russ.)

Ryzhkova S.M. On the formation of clusters of wild plants at the regional level. *Bulletin of the Belgorod University of Cooperation, Economics and Law*, 2017, no. 4(65), pp. 216–231. (In Russ.)

Smirnova I.G., Shevelev S.L. Features of the formation of cranberry populations in cedar plantations of Khakassia. *Coniferous boreal zones*, 2016, no. 1, pp. 72–75. (In Russ.)

Staritsyna I.A., Belichev A.A. Analysis of the use of disturbed lands of the Sverdlovsk region. *Agrarian Bulletin of the Urals*, 2018, no. 4 (171), pp. 31–36. (In Russ.)

Tahvanainen V., Miina J., Kurttila M. Climatic and Economic Factors Affecting the Annual Supply of Wild Edible. *Mushrooms and Berries in Finland Forests*, 2019, no. 10(5). URL: <https://doi.org/10.3390/fl10050385>

Ufimtsev V.I., Strelnikova T.O., Kupriyanov O.A. Structure of living ground cover in pine forests in the areas of Kuzbass reclamation. *Bulletin of Tomsk State University. Biology*, 2018, no. 44, pp. 36–58. (In Russ.)

Uskov V.S. Features and opportunities for the growth of the regional economy of the territories of the European North of Russia. *Social Space*, 2016, no. 5(7), pp. 1–11. (In Russ.)

Yabor V.T. Self-healing of technogenic dumps of the Urusha-Oldoysky gold-scattering node in the Amur region. *Lesnoy zhurnal*, 2011, no. 5, pp. 41–46. (In Russ.)

Zaitsev G.N. Mathematical statistics in experimental botany. M.: The science, 1984. 424 p. (In Russ.)

Zaparanyuk A.E. Increasing the yield of wild berries by using mineral fertilizers: diss. 1984, 229 p. (In Russ.)

Zorzi M., Gai F., Medana C., Aigotti R., Morello S., Peiretti P.G. Bioactive Compounds and Antioxidant Capacity of Small Berries. *Foods*, 2020, no 9 (623) URL: <https://doi.org/10.3390/foods9050623>

Материал поступил в редакцию 10.11.2023

---

**Панин И.А., Залесов С.В., Аржанников Ю.А.** Формирование ягодных ресурсов живого напочвенного покрова на полигонах добычи золота и платины промывными технологиями // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 250. С. 83–97. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.83-97

В работе представлены результаты изучения ягодных ресурсов живого напочвенного покрова на полигонах добычи золота и платины промывным способом, с применением драг и гидромониторов на территории северо-западной части Свердловской области Российской Федерации. В основу положен метод пробных площадей, которые закладывались на полигонах различной давности возникновения, от 10 до 55 лет. Всего было заложено 19 объектов. Из них на рекультивированных полигонах после работы гидромонитора заложено 7 пробных площадей. После работы драг заложено 6 пробных площадей на рекультивированных полигонах и 6 на нереккультивированных. Определялась надземная фитомасса ягодных растений живого напочвенного покрова в абсолютно сухом состоянии, их проективное покрытие и среднегодовая урожайность за 2019–2021 гг. Ягодные растения представлены 5 видами: черникой *Vaccinium myrtillus* L., голубикой *Vaccinium uliginosum* L., брусничкой *Vaccinium vitis-idaea* L., земляничкой *Fragaria vesca* L. и костяничкой *Rubus saxatilis* L. С увеличением давности возникновения полигона или проводимой рекультивации, запасы ягодных растений в живом напочвенном покрове увеличиваются. Проведён корреляционный анализ, в ходе которого установлена тесная положительная связь надземной фитомассы ягодных растений живого напочвенного покрова в абсолютно сухом состоянии и годов начала восстановления растительности (возникновение полигона, либо его рекультивация). Выведены корреляционные уравнения, позволяющие прогнозировать изменения запасов ягодных растений по мере восстановления

растительного покрова. Спустя 45–50 лет после рекультивации на месте добычи золота и платины промывом гидромонитором формируются высокопродуктивные ягодники. Их среднегодовая урожайность 10,6–36,3 кг/га, при проективном покрытии 37,2–55,6% и надземной фитомассой 530,6–645,2 кг/га в абсолютно сухом состоянии. На месте дражных полигонов спустя 10–45 лет после возникновения полигонов ягодники не сформировались. Проектное покрытие ягодных видов живого напочвенного покрова на них не превышает 25,7 кг/га. Среднегодовой урожай плодов составляет только 0,4–7,4 кг/га, при надземной фитомассе в абсолютно сухом состоянии до 159,0 кг/га. Процесс формирования ягодников на рекультивированных дражных полигонах протекает значительно быстрее, чем при отсутствии рекультивационных работ.

Ключевые слова: черника, брусника, ягоды, полигоны добычи золота и платины, первичная сукцессия, отвалы, восстановление растительности.

**Panin I.A., Zalesov S.V., Arzhannikov Yu.A.** Formation of berry living resources of field layer cover on gold and platinum polygons by washing technologies. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2024, iss. 250, pp. 83–97 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.83-97

The work deals with the results of studying the berry living resources of field layers cover on the gold and platinum polygons by a washing method, using the drags and hydromonitors on the territory of the Sverdlovsk Region north-west part, Russian Federation. It is based on the trial plot methods where laid on at landfills of various ages from 10 to 55 years. In total 19 objects were laid out. Of there 7 tests where laid out at reclamation landfills after the operation of the hydromonitor. After the drag's work six trial plots were laid out on rellamated landfills and six – on reclaimed ones. The above-ground phytomass of berry plants of the field layers cover were taken for determining in absolutely dry state, as well it was determined there progressive coating and annual yields for 2019–2021. Berry plants were represented by five species: bilberry (blueberry) *Vaccinium myrtillus* L., bluebery *Vaccinium uliginosum* L., cowberry *Vaccinium vitis-idaea* L., strawberry *Fragaria vesca* L. and drumple *Rubus saxatilis* L. By increasing the age of the landfills establishment or ongoing reclamation, the reserves of berry plants living on the soil cover will increase. A correlation analysis has been carried out during which a close positive relationship at the above-ground phytomass of berry plants of living soil-cover in an absolutely dry state and the year of the succession (the occurrence of a polygon, or its reclamation). Corrections equations are derived at allow predictions changes the stocks of berry plants. The plants populations restored 45–50 years after reclamation at the site of both gold and platinum-mining highly productive berry beds are formed by washing with a hydromonitors. Their average annual yield is 10,6–36,6 kg/ha, with projective coverage 37,2–55,6% and the above ground phytomass 530,6–645,2 kg/ha in absolutely dry state. At the site of the dredge polygons after 10–45 years of the primary succession of the soil cover, the berry beds are not formed. The projective cover of berry species on the field layer cover on them

does not exceed 25,7 kg/ha the average annual fruit-yields is only 0,4–7,4 kg/ha and with the above-ground phytomass in on absolutely dry state-up to 159,0 kg/ha. The process of forming berry beds on reclaimed dredge-landfills proceeds much faster than in the absence of reclamation work.

**Keywords:** blueberry, cowberry, berries, polygons of gold and platinum, primary succession, dumps.

---

**ПАНИН Игорь Александрович** – доцент Уральского государственного лесотехнического университета, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 7599-8125. ORCID: 0000-0002-7798-3442.

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

**PANIN Igor A.** – PhD (Agricultural), Assistant Professor, Ural State Forestry Engineering University. SPIN-code: 7599-8125. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7798-3442>.

620100. Siberian tract str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: paninia@m.usfeu.ru

**ЗАЛЕСОВ Сергей Вениаминович** – профессор, заведующий кафедрой Лесоводства Уральского государственного лесотехнического университета, профессор, доктор сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 8652-3165. ORCID: 0000-0003-3779-410X.

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

**ZALESOV Sergey V.** – DSc (Agricultural), Head of the Forestry Department, Ural State Forestry Engineering University, Professor. SPIN- code: 7599-8125. ORCID: 0000-0003-3779-410X.

620100. Siberian tract str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: zalesovsv@m.usfeu.ru

**АРЖАННИКОВ Юрий Алексеевич** – аспирант Уральского государственного лесотехнического университета. SPIN-код: 9466-1886. ORCID: 0000-0003-4345-6879.

620100, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: Wolf1997@mail.ru

**ARZHANNIKOV Yuri A.** – PhD Student, Ural State Forestry Engineering University. SPIN-code: 9466-1886. ORCID: 0000-0003-4345-6879.

620100. Siberian tract str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: Wolf1997@mail.ru

**Е.Н. Наквасина, И.В. Цветков, А.В. Давыдов, А.О. Корсакова**

**ТРАНСФОРМАЦИЯ СОСНЯКА КУСТАРНИЧКОВО-СФАГНОВОГО  
ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ОСУШЕНИИ  
В СЕВЕРНОМ ЛЕСНОМ РАЙОНЕ**

*Введение.* В лесном фонде Архангельской области процент заболоченности лесов составляет 54%, в том числе 31% заболоченных лесов и 24% болот. В подзоне северной тайги они представлены сосняками сфагновых типов леса, с пушицево-сфагновыми и кустарничково-сфагновыми ассоциациями [Тараканов, 2004, 2005; Соколов, Бахтин, 2006]. Характерная особенность таких лесов – их разновозрастность и низкополнотность: бонитет не выше V, сомкнутость древостоев – 0,2–0,3.

Такие леса по классификации, принятой в современном лесоводстве, относят к непроточному экологическому ряду, к сфагновой хозяйственной группе типов леса, к IV группе эффективности лесосошения, и не рекомендуют включать в гидромелиоративный фонд [Тараканов, 2004, 2005; Соколов, Бахтин, 2006; Пахучий, Пахучая, 2017] из-за отсутствия их лесоводственной эффективности. Однако в ряде случаев подобные осушительные мелиорации сосняков сфагновых могли дать хорошую реакцию древостоев [Орлов, Кошельков 1971; Пахучая, 2017].

В Архангельской области основные работы по осушению лесных насаждений проводились во второй половине – конце XX века. И несмотря на практически полное прекращение работ в настоящее время, принятая Стратегия развития АЗРФ будет требовать проведения осушительных мероприятий в связи с развитием транспортной инфраструктуры и строительством, в зону которых будут поступать и низкобонитетные сфагновые леса, распространенные на Арктических и приарктических территориях. Цель осушения в этом случае может не нести лесоводственный аспект относительно повышения продуктивности лесов, на первый фланг выходят проблемы регулирования факторов среды и развития лесоболотных комплексов после осушения [Пономарева и др., 2021]. При проведении осушения заболоченных земель меняется состояние всех компонентов экосистем [Пахучий, Пахучая, 2017; Пахучая, 2017], что требует их комплексного изучения. Осушаемые леса также требуют и отдельных



подходов в технологиях их освоения и ведения хозяйства [Тараканов и др., 2019].

Спрогнозировать характер изменений лесоболотных комплексов сфагновой группы можно, изучив участки с проведенной осушительной мелиорацией разного возраста и разных технологий осушения. Наиболее ценными в этом отношении являются в том числе и объекты довоенного обустройства, проводимые часто ручным способом для различных целей. Таких участков в АЗРФ не так много, и они приобретают особую значимость и научный интерес.

Наши исследования посвящены изучению влияния длительного (более 80 лет) осушения, проведенного в сосняке кустарничково-сфагновом в северном лесном районе (Архангельская область), на состояние нижних ярусов биогеоценоза: естественное возобновление, живой напочвенный покров и свойства торфяной почвы.

*Материалы и методика исследований.* Объектом исследования являются осушаемые и неосушаемые насаждения Исакогорского участкового лесничества Архангельского лесничества (северотаежный лесной район). Предметом исследования является редкостойный сосняк кустарничково-сфагновый (вероятно, «сосна по болоту»), в котором в 1940 году на площади 3 га была проведена осушительная мелиорация частой сетью малоуглубленных каналов. Расстояние между осушителями около 30 м, всего заложено 9 регулирующих каналов, выведенных в собирательный канал. Обстоятельства и место проведения мелиоративных работ позволяют предположить, что целью осушения была подготовка участка для заготовки торфа. Почва – болотная верховая торфяная на средних торфах (торфяная олиготрофная). Работы предположительно проводились под руководством работников опытно-производственного хозяйства «Зеленец» Архангельской опытной мелиоративной станции (АОМС). К сожалению, никаких документов, позволяющих точно определить исполнителя и цель проведения работ, не имеется, но известно, что участвовал в закладке объекта и проводил первые исследования насаждений после осушения И.С. Мелехов (устное сообщение А.М. Тараканова).

Данный объект стал предметом научного интереса сотрудников АИЛиЛХ (ныне СевНИИЛХ) с 1970 года, когда в осушаемом средневозрастном сосново-березовом насаждении были заложены постоянные пробные площади. Проводились периодические обследования насаждений с целью изучения влияния гидромелиорации на почвенно-грунтовые условия,

древостой и остальные элементы насаждения. В насаждении была создана система колодцев, позволяющих отслеживать уровень грунтовых вод. По данным на 2002 год уровень почвенно-грунтовых вод весной колебался в пределах 25–33 см, а в среднем за вегетационный период 35–41 см.

Позднее, данный объект был включен в программу исследований о повышении продуктивности лесов при проведении рубок ухода. В 1976 году на части участка были проведены рубки ухода – прочистки с целью регулирования густоты насаждения и улучшения условий роста деревьев главной породы. В процессе ухода вырубались в основном деревья березы, а также больные и поврежденные деревья сосны. Для оценки лесоводственной эффективности рубок ухода в 1990 году была заложена отдельная пробная площадь.

При обследовании (2022 г.) размер пробных площадей составлял 80×20 метров, на осушаемых участках длинная сторона пробной площади ориентирована вдоль собирателей. Подготовленные вручную регулирующие и собирательные каналы, не смотря на некоторое зарастание (глубина около 0,5 и 0,8 м соответственно), продолжают выполнять водорегулирующую роль, и в весеннее и осеннее время заполнены водой.

Контрольная проба была заложена на неосушаемом участке, вблизи, но за пределами объекта осушения, и представляет из себя редкий сосняк кустарничкового–сфагновый (рис. 1). Уровень грунтовых вод в сохранившемся мелиоративном колодце высокий, почвенно-грунтовые воды находятся близко к поверхности почвы.

Изучение древостоя, естественного возобновления, живого напочвенного покрова и почв проводили по общепринятым методикам. Естественное возобновление под пологом древостоя изучали на 5 площадках размером 2×5 метра, заложенных на каждой пробной площади. Подрост подразделяли на категории по жизнеспособности и по высоте (мелкий, средний, крупный). Учитывали также породный состав, высоту и характер распространения подлеска.

Для изучения напочвенного покрова на пробных площадях закладывали по 10 учетных площадок размером 1×1 м, на которых учитывали видовой состав травяно–кустарничкового и мохово- лишайникового ярусов и относительное проективное покрытие видов. Рассчитывали коэффициент встречаемости; для оценки сходства флористического состава на пробных площадях – индекс Жаккара.

После проведения рекогносцировочных опробований, для изучения влияния осушительной мелиорации на морфолого-генетические свойства

почв заложили 2 полнопрофильных почвенных разреза (глубиной до 1,2 м) в осушаемом и неосушаемом насаждениях. Делали описание горизонтов почвенного профиля, устанавливали глубину залегания минерального горизонта, проводили диагностику и систематику почв.

При изучении физических и агрохимических почвенных свойств отдавали предпочтение верхней 50-сантиметровой толще, в первую очередь отзывающейся на снижение уровня грунтовых вод [Пономарева, 2022].

Отбирали образцы лесной подстилки с помощью рамки шаблона размером 10×10 см, в количестве 10 штук на пробную площадь, а также образцы торфа с помощью металлического цилиндра с режущими краями (бура) (или в случае слабого разложения торфа вырезая ножом прямоугольный образец учтенного размера) в количестве 10 шт. с толщи 0–20 см и 20–40 см.

В камеральных условиях по общепринятым в почвоведении методам [Наквасина, Любова, 2016] определили плотность сложения и влажность лесной подстилки и торфа, плотность твердой фазы (истинную плотность торфа) пикнометрическим способом, рассчитали скважность и скважность аэрации. Используя цилиндры с сетчатым дном, определили влагонасыщение торфа через 2 ч и 48 ч и после оттока влаги через 3–5 ч после окончания эксперимента, что соответствовало полной влагоемкости [Мисников и др., 2015]. Степень разложенности торфа – по плотности сложения [Оценка пригодности..., 1984]. Зольность торфа определяли согласно ГОСТ 11306-2013, кислотность – потенциометрически с помощью pH-метра «Эксперт».

Все эксперименты по водно-физическим свойствам проводили не менее, чем в двух повторностях. Статистическую обработку данных выполняли в специализированной программе Statistica.

*Результаты и обсуждение.* В настоящее время на осушаемой площади сформировалось сосново-березовое насаждение (рис. 2), произрастающее на торфяных почвах (глубина залегания торфа 180 – 200 см). Уровень стояния грунтовых вод более 35 см, что соответствует норме осушения, составляющей для региона 24–28 см [Тараканов, 2004].

Характеристика древостоев на изученных пробных площадях представлена в табл. 1. Из приведённых в таблице данных видно, что средний возраст деревьев на всех обследованных участках сопоставим, и относится к 4 классу возраста. Сосна на осушаемом и неосушаемом участках имеет колебания по возрасту от 45(60) до 82 лет, что подтверждает наличие сосны на момент осушения заболоченного участка.



Рис. 1. Неосушаемый сосняк кустарничково-сфагновый. Фото 2022 г.

Fig. 1. Undrinkable pine shrub-sphagnum. Photo 2022



Рис. 2. Осушаемый сосняк черничный (влажный). Фото 2022 г.

Fig. 2. Drained blueberry pine (wet). Photo 2022

Таблица 1

Характеристика древостоев на исследованных пробных площадях

Characteristics of stands on the studied sample areas

Состав	Порода	Средний возраст, лет	Класс бони- тета	Средние		Сумма площадей сечений на 1 га, м <sup>2</sup>	Относи- тельная полнота	Запас на 1 га, м <sup>3</sup>	Класс товар вар- ности
				диаметр, см	высота, м				
Неосушаемая пробная площадь (Контроль)									
10С+ Б ед. Е	С	63	Va	7,0	7,1	11,62	0,60	63	2
Осушаемая пробная площадь									
6С4Б	С	67	II	23,5	20,7	15,47	0,40	149	1
	Б	–		12,3	14,0	11,38	0,50	97	3
Итого						26,85	0,90	246	
Осушаемая пробная площадь с рубками ухода									
8С2Б	С	67	II	23,6	21,6	18,63	0,50	201	2
	Б	–		13,1	16,5	12,79	0,50	57	4
Итого							1,00	258	

На осушаемой площади почвенно–грунтовые условия положительно повлияли на общую продуктивность лесных насаждений: древостой характеризуется высокой продуктивностью (класс бонитета II), тогда как на неосушаемой пробной площади – Va. Значительные различия и по запасу древесины стволов. Запас древостоя на пробных площадях осушаемого участка в 4 раза превышает запас древостоя в контроле. После проведения рубок ухода в 1976 году запас естественным образом уменьшился, в сравнении с древостоем без рубок ухода, но к моменту обследования таксационные показатели и соответственно запас почти сравнялись. Это говорит о высокой энергии роста деревьев на осушаемом участке с проведенными рубками ухода.

В длительно осушаемом сосняке кустарничково-сфагновом подрост отсутствует, подлесок представлен рябиной 1200 шт./га. Проведение рубок ухода способствовало поселению под пологом древостоя редкой березы (200 шт./га), возможно порослевой после рубки, но не сосны; в подлеске также встречается редкая рябина (до 200 шт./га). В неосушаемом сосняке сосна с диаметром на высоте груди менее 6 см представлена в значительном количестве (5800 шт./га), однако по возрасту вряд ли ее можно считать подростом: высокий уровень грунтовых вод и нарушения в водно-воздушном режиме снижают рост деревьев и приводят к сильной изменчивости по возрастному составу древостоя.

Неудовлетворительное естественное возобновление на заболоченных землях с толстым сфагновым очесом отмечалось и ранее и считалось связанным с зависанием всходов в рыхлом поверхностном слое [Бабилов, Пахучий, 2014]. При этом сфагновые мхи в летний период из-за пересыхания прекращают свою жизнедеятельность и не поглощают воду из торфяной залежи [Davis et al., 2019; Пономарева и др., 2021]. Однако в Республике Коми на Тимане [Пахучая, 2017] в сфагновой группе объектов осушения отмечалось достаточно успешное возобновление сосны.

Изменение водно-воздушного режима почв при осушении, дополненное закономерным изменением светового режима и поступлением инсоляции в результате прореживания древесного полога при рубках ухода, вызвало значительные вариации в напочвенном покрове (табл. 2). Скудное флористическое богатство, характерное для верховых болот [Юрковская, 2012], при осушении снизилось и претерпело качественные трансформации.

Таблица 2

**Среднее проективное покрытие и встречаемость  
видов живого напочвенного покрова в сосняках**

**Average projective cover Average projective cover and occurrence  
of live ground cover species in pine forests and occurrence  
of live ground cover species in pine forests**

Вид	Неосушаемый		Осушаемый		Осушаемый с рубками ухода	
	ПП, %	В, %	ПП, %	В, %	ПП, %	В, %
Травяно-кустарничковый ярус						
Черника обыкновенная <i>Vaccinium myrtillus</i> L.	–	–	42	100	47	100
Брусника обыкновенная <i>V. vitis-idaea</i> L.	<1	10	12	100	28	100
Луговик дернистый <i>Deschampsia cespitosa</i> (L.) Beauv.	17	100	7	90	5	90
Плаун болотный <i>Lycopodiella inundata</i> (L.) Holub.			<1	20	–	–
Ожика волосистая <i>Luzula pilosa</i> (L.) Willd			<1	20	–	–
Вереск обыкновенный <i>Calluna vulgaris</i> (L.) Hull	13	100	–	–	–	–
Морошка обыкновенная <i>Rubus chamaemorus</i> L.		100	–	–	–	–
Кассандра болотная <i>Chamaedaphne calyculata</i> (L.) Moench	2,5	90	–	–	<1	20
Водяника чёрная <i>Empetrum nigrum</i> L.	6	70	–	–	–	–
Багульник болотный <i>Ledum palustre</i> L.	9	100	–	–	3	70
Голубика обыкновенная <i>V. uliginosum</i> L.	9	70	–	–	2	50
Клюква болотная <i>Oxycoccus palustris</i> Pers.	1	90	–	–	–	–

Окончание табл. 2

Вид	Неосушаемый		Осушаемый		Осушаемый с рубками ухода	
	ПП, %	В, %	ПП, %	В, %	ПП, %	В, %
Мохово-лишайниковый ярус						
Дикранум метловидный <i>Dicranum scoparium</i> Hedv.	–	–	19	80	26	100
Плеврозиум Шребера <i>Pleurozium Schreberi</i> (Brid.) Mitt.	–	–	12	90	40	100
Гилокомиум блестящий <i>Hylocomium splendens</i> (Hedw.) Schimp.	–	–	3	20	1	20
Политрихум обыкновенный <i>Polytrichum commune</i> Hedv.	12	40	15	90	<1	10
Сфагнум sp. <i>Sphagnum</i>	89,5	100	1,5	10	7	20

Примечание: ПП – проективное покрытие, В – встречаемость.

В живом напочвенном покрове произошли изменения как в травяно-кустарничковом (ТКЯ), так и в мохово-лишайниковом ярусе (МЛЯ). Снизилась численность видов, изменился их эколого-ценотический состав (табл. 3). При длительном осушении сохранились в ТКЯ две группы растений – мезофиты и гигрофиты, полностью исчезли ксерофитные виды. Доля мезофитов увеличилась в 2 раза. Преобладающими видами становятся черника и брусника, которые в ценофлоре неосушенного насаждения практически не встречались. В мохово-лишайниковом ярусе сохраняется тенденции, присущие травяно-кустарничковому ярусу, экологические ниши захватывают виды-мезофиты, происходит почти полная замена сфагнового покрова на покров зеленых мхов (плеурозиума Шребери, дикранума метловидного, гилокомиума блестящего), доля которых составляет 34–67% на площадях без рубок ухода и с рубками ухода соответственно. Сезонное заболачивание в осенний и весенний периоды провоцирует сохранение в составе ценофлоры политрихума обыкновенного и синузий сфагнума. Обращает внимание наличие мертвопокровных парцелл, особенно в осушаемом сосняке, где рубки ухода не проводились. Их формированию способствует большая доля участия березы в составе насаждения (4 единицы), опавшая листва формирует плотный слой, мешающий поселению мхов и растений травяно-кустарничкового яруса.

Таблица 3

**Представленность растений различных экологических групп  
по отношению к увлажнению, %**

**The representation of plants of various ecological groups  
in relation to moisture, %**

Экологическая группа	Неосушаемая	Осушаемая	Осушаемая с рубками ухода
Травяно-кустарничковый ярус			
Мезофиты	45	80	67
Гигрофиты	33	20	33
Ксерофиты	22	—	—
Мохово-лишайниковый ярус			
Мезофиты	50	80	80
Гигрофиты	50	20	20
Ксерофиты	—	—	—

В то же время снижение доли березы в составе древесного полога привело к поселению достаточно крупных гигрофитных вегетативноподвижных видов, таких как кассандра, багульник, голубика.

Отмечается низкое сходство между осушаемым и неосушаемым насаждениями. Индекс Жаккара составляет 0,153–0,233, что указывает на низкую сходимость данных. Несколько выравнивают различия по биоразнообразию рубки ухода, проводимые на фоне осушения (индекс Жаккара повышается до 0,276), и показывают некоторое различие с осушаемым насаждением, где рубки ухода не проводились.

В результате, мы можем констатировать, что через 80 лет после осушения в насаждениях произошло изменение типа леса, обусловленное устойчивым поддержанием сниженного уровня грунтовых вод, соответствующего норме осушения. Тип леса кустарничково-сфагновый, отмеченный ранее и соответствующий контрольному насаждению, изменился на черничный (влажный). Поселение соответствующей ему свиты зеленых мхов, привело к образованию лесной подстилки, характерной для этого типа леса, и несомненно, отразилось на свойствах верхних горизонтов торфяной почвы.



В неосушаемом сосняке кустарничково-сфагновом поверхность торфа покрыта слаборазложившимся сфагновым очесом, способным набирать и удерживать влагу в значительных объемах (влажность составляет 930%), препятствуя поверхностному дыханию почвы. Физические свойства торфяной залежи неосушаемого сосняка соответствуют аналогам верховых болот региона [Тараканов, 2004; Пахучий, Пахучая, 2017].

В осушаемом сосняке черничном сформировалась типичная для этого леса подстилка средней степени разложения, состоящая из нескольких слоев. В осенний дождливый период влажность ее значительно ниже, чем в неосушаемом лесу и составила 259%. Такая подстилка в сухой период года обеспечивает аэрируемость верхних горизонтов и доступ кислорода для прохождения микробиологических процессов в толще торфа выше уровня грунтовых вод.

В результате длительного осушения сосняка кустарничково-сфагнового, сформированного на торфяной почве, верхние ее слои прошли трансформацию, изменили физические и агрохимические свойства (табл. 4). Именно водно-воздушный режим на торфяной залежи является регулятором микроклиматических характеристик, обеспечивающий процессы разложения в болотных экосистемах [Davis et al., 2019], а свойства торфяной залежи обеспечивают интенсивность стока и водоотдачи.

Степень разложенности торфяной залежи в верхней толще увеличилась в 2 раза: с 18–27% в неосушаемом сосняке до 41–45% в осушаемом. Усиление метаболических процессов привело, прежде всего к изменению физических свойств торфа, с которыми связан питательный режим почв. Возросла в 1,5–2 раза плотность сложения торфа, что привело к снижению общей пористости на 9%. Эти различия достоверны на 5%-м уровне значимости ( $t_{\text{факт}} = 2,82\text{--}21,45$ ).

Снижение пористости на торфяных почвах может быть благоприятно для баланса воды и воздуха в течение вегетационного периода. И прежде всего, отразилось на состоянии показателя скважность аэрации. В осенний период, когда проводились исследования, в неосушаемом сосняке в толще торфа до глубины 40 см практически все поры были заполнены водой, содержание кислорода в почве снижалось до критического для роста растений: в этом случае в почве может оставаться защемленный воздух. В то же время в осушаемом сосняке пористость аэрации составляла 6–13%, что вполне достаточно в осенне-зимний период для роста корней. Корни деревьев, как правило, хорошо функционируют при содержании кислорода в почве более 10% [Kozłowski, 1985] и прекращают рост, когда воздушное пространство уменьшается до 2% [Osman, 2013].

Таблица 4

**Физические и агрохимические свойства верхних горизонтов почвы  
в неосушаемом и осушаемом сосняках**

**Physical and agrochemical properties of the upper soil horizons  
in non-drained and drained pine forests**

Показатель	Толща 0 – 20 см	Толща 20 – 40 см
<b>Неосушаемый сосняк кустарничково-сфагновый</b>		
Влажность, %	1066,1 ± 32,16	802,7 ± 40,18
Степень разложения, %	18	27
Плотность сложения, г/см <sup>3</sup>	0,09 ± 0,01	0,13 ± 0,01
Скважность общая, %	92,0 ± 0,47	87,3 ± 0,71
Скважность аэрации, %	2,19 ± 3,51	-
Влагоемкость, 2 ч/48 ч	117,7/119,6	121,8/125,4
Зольность, %	5,8 ± 0,25	2,9 ± 0,12
pH вод	3,3	3,0
pH <sub>сол</sub>	4,1	4,6
<b>Осушаемый сосняк черничный (влажный)</b>		
Влажность, %	389,9 ± 8,18*	462,4 ± 16,44*
Степень разложения, %	45	41
Плотность сложения, г/см <sup>3</sup>	0,18 ± 0,01*	0,17 ± 0,01*
Скважность общая, %	83,1 ± 0,65*	84,0 ± 0,53*
Скважность аэрации, %	13,56 ± 3,07*	6,51 ± 1,41
Влагоемкость, 2 ч/48 ч	131,2/134,2	129,3/131,4
Зольность, %	4,6 ± 0,20	1,7 ± 0,07
pH вод	3,2	4,3
pH <sub>сол</sub>	3,2	5,9

*Примечание:* \* отмечены различия, достоверные на 5%-м уровне значимости (при  $t_{\text{табл}} = 2,306$ ).

Снижение общего количества пор в осушаемых торфах привело к повышению и влагоемкости (водонасыщению). Поступающая в торф вода от осадков/снеготаяния или диффузирующая с нижних влагоносных слоев быстрее и в большем количестве содержится в верхней толще почвы, не давая торфу пересыхать в летнее время и поддерживая водно-воздушный режим.

Несмотря на увеличение степени разложения торфа и изменения метаболических процессов в осушаемом сосняке, различия в зольности торфа не существенны, и скорее связаны с окружающими участком эффектами аэрогенной минерализации (близость железной и автомобильной дорог, действующий песчаный карьер). В торфах Архангельской области на удаленных местообитаниях зольность торфа может достигать и 9% [Скрипниченко и др., 2020].

Длительное осушение привело к изменениям реакции среды (см табл. 4), однако эти изменения неоднозначны по слоям торфа. В верхней 20-сантиметровой толще кислотность повысилась (рН 3,2) в сравнении с неосушенной пробой (рН 4,1), тогда как в толще 20–40 см при осушении наблюдается понижение кислотности (рН 5,9). Подобные трансформации могут быть связаны с изменением пула растительности и поступающего опада, а также с формированием водно-воздушного режима, обеспечивающего доступ кислорода в почву.

*Выводы.* Таким образом, экосистема сосняка кустарничково-сфагнового претерпела существенные изменения, касающиеся нижних ярусов биогеоценоза в сторону их выхода из сфагновой группы типов леса. За 80 лет после осушения, проведенного качественно ручным способом, произошло повышение продуктивности древесного яруса и становление черничного типа леса. Изменение свойств верховой торфяной почвы приближает ее к свойствам почв автоморфного ряда, обеспечивающих хороший рост как древесной, так и травяно-кустарничковой растительности. При этом меняется водно-воздушный режим и водопоглощение, миграционные низходящий и восходящий потоки влаги. Рубки ухода не оказали существенного влияния на изменения в естественном возобновлении, живом напочвенном покрове и торфяной залежи, но увеличили таксационные показатели древостоя.

*Сведения о финансировании исследования.* Статья подготовлена по результатам научно-исследовательских работ, выполненных в рамках государственного задания ФБУ «СевНИИЛХ» на проведение прикладных научных исследований в сфере деятельности Федерального агентства лесного хозяйства «Разработка цифровой имитационной модели динамики экологического состояния и продуктивности лесных экосистем на переувлажненных землях под воздействием природных и антропогенных факторов» (регистрационный номер темы 122020300230-5).

*Благодарности.* Авторы благодарят сотрудников ФБУ СевНИИЛХ и студентов САФУ (4 курс «Лесное дело»), принимавших участие в полевых работах.

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

### Библиографический список

Бабигов Б.В., Пахучий В.В. Гидротехнические мелиорации (осушение лесных земель): учебное пособие. Сыктывкар: СЛИ, 2014. 160 с.

Мисников О.С., Пухова О.В., Чертова Е.Ю. Физико-химические основы торфяного производства: учеб. пособие. Тверь: Тверской государственный технический университет, 2015. 168 с.

Наквасина Е.Н. Агрохимические свойства почв: учеб. пособие. Архангельск, 2009. 101 с.

Орлов А.Я., Кошельков С.П. Почвенная экология сосны. М.: Наука, 1971. 323 с.

Оценка пригодности субстрата для выращивания посадочного материала с закрытыми корнями: методические указания / сост. Белостоцкий Н.Н., Бирцева А.А., Жигунов А.В. Л.: ЛенНИИЛХ, 1984. 29 с.

Пахучая Л.М. Комплексная оценка влияния осушения на лесные биогеоценозы на Тимане // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2017. № 49. С. 38–42.

Пахучий В.В., Пахучая Л.М. Лесоводство на заболоченных землях. СПб.: СПбГЛТУ, 2017. 232 с.

Пономарева Т.И. Влияние лесосушения на лесорастительные условия сосняков кустарничково-сфагновых северотаежного района Архангельской области: автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук по специальности 06.03.02 – Лесоведение, лесоводство, лесоустройство и лесная таксация. Архангельск, САФУ, 2022 г. 20 с.

Пономарева Т.И., Штанг А.К., Ярыгина О.Н., Селянина С.Б. Трансформация микроклимата и гидрологических условий осушаемых сосняков кустарничково-сфагновых северотаежной подзоны Архангельской области // Успехи современного естествознания. 2021. 12(1). С. 56–63.

Скрипниченко В.А., Селянина С.Б., Татаринцева В.Г., Пономарева Т.И., Дайбова Е.Б., Кириллова М.Е. Торф как источник для производства удобрений (на примере месторождения Овечье) // Проблемы освоения нефтегазовых месторождений приарктических территорий России: матер. Всерос. науч.-практич. конференции (17–18 декабря 2020 г.) / отв. ред. профессор М.Г. Губайдуллин и доцент О.В. Крайнева; Сев. (Арктич.) федер. ун-т. Архангельск: САФУ, 2020. Вып. 3. С. 117–121.

Соколов Н.Н., Бахтин А.А. Гидротехнические мелиорации. Происхождение, характеристика и классификация болот и избыточно увлажненных лесов: учеб. пособие. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2006. 100 с.

Тарakanов А.М. Рост осушаемых лесов и ведение хозяйства в них. Архангельск: СевНИИЛХ, 2004. 228 с.

Тарakanов А.М. Характеристика гидролесомелиоративного фонда и природные особенности заболоченных лесов Европейского Севера России // Arctic Environmental Research. 2005. № 2. С. 56–63.

Тараканов А.М., Симаков А.А., Капистка В.В., Дворяшин А.В. Особенности ведения лесного хозяйства на осушаемых землях : сб. науч. трудов ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства». Архангельск, 2019. С. 9–18.

Юрковская Т.К. Взаимоотношения таежных лесов и болот в пространстве и времени // Известия Самарского НЦ РАН. 2012. № 1–5. С. 1–4.

Davis K.T., Dobrowski S.Z., Holden Z.A., Higuera P.E., Abatzoglou J.T. Microclimatic buffering if forests of the future: the role of the local water balance // *Ecography*. 2019. No. 42. P. 1–11. (In Engl.)

Kozlowski T.T. Soil aeration, flooding and tree growth // *J. of Arboric.* 1985. No. 11. P. 85–96. (In Engl.)

Osman K.T. *Forest Soils: Properties and Management*. Springer International Publishing Switzerland, Switzerland, 2013. P. 217. (In Engl.)

### References

Assessment of the suitability of the substrate for growing planting material with closed roots: Guidelines / comp. N.N. Belostotsky, A.A. Birtseva, A.V. Zhigunov. L.: LenNIILH, 1984. 29 p. (In Russ.)

Babikov B.V., Pakhuchy V.V. *Hydrotechnical land reclamation (drainage of forest lands): textbook*. Syktyvkar: SLI, 2014. 160 p. (In Russ.)

Davis K.T., Dobrowski S.Z., Holden Z.A., Higuera P.E., Abatzoglou J.T. Microclimatic buffering if forests of the future: the role of the local water balance. *Ecography*, 2019, no. 42. pp. 1–11.

Kozlowski T.T. Soil aeration, flooding and tree growth. *Journal of Arboric*, 1985, no. 11, pp. 85–96.

Misnikov O.S., Pukhova O.V., Chertkova E.Yu. *Physico-chemical bases of peat production: textbook*. Tver: Tver State Technical University, 2015. 168 p. (In Russ.)

Nakvasina E.N. *Agrochemical properties of soils: textbook*. Arkhangelsk. 2009. 101 p. (In Russ.)

Orlov A.Ya., Purses S.P. *Soil ecology of pine*. M.: Nauka, 1971. 323 p. (In Russ.)

Osman K.T. *Forest Soils: Properties and Management*. Springer International Publishing Switzerland, Switzerland, 2013, p. 217.

Pakhuchaya L.M. A comprehensive assessment of the effect of drainage on forest biogeocenoses on Timan. *Actual problems of the forest complex*, 2017, no. 49, pp. 38–42. (In Russ.)

Pakhuchy V.V., Pakhuchaya L.M. *Forestry on wetlands*. St. Petersburg: SPbGLTU, 2017. 232 p. (In Russ.)

Ponomareva T.I. The influence of deforestation on the forest-growing conditions of shrub-sphagnum pine forests of the North Taiga district of the Arkhangelsk region: avtoref. diss. ... candidate of Agricultural Sciences, specialty

06.03.02 – Forestry, forestry, forest management and forest taxation. Arkhangelsk, SAFU, 2022. 20 p. (In Russ.)

*Ponomareva T.I., Shtang A.K., Yarygina O.N., Selyanina S.B.* Transformation of microclimate and hydrological conditions of drained shrub-sphagnum pine forests of the North Taiga subzone of the Arkhangelsk region. *Successes of modern natural science*, 2021, no. 12(1), pp. 56–63. (In Russ.)

*Skipnichenko V.A., Selyanina S.B., Tatarintseva V.G., Ponomareva T.I., Daibova E.B., Kirillova M.E.* Peat as a source for fertilizer production (on the example of the Ovechye deposit). *Problems of oil and gas fields development in the Arctic territories of Russia: materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference (December 17–18, 2020)* / ed. Professor M.G. Gubaidullin and Associate Professor O.V. Kraineva; Northern (Arctic) feder. un-t. Arkhangelsk: SAFU, 2020, iss. 3, pp. 117–121. (In Russ.)

*Sokolov N.N., Bakhtin A.A.* Hydraulic reclamation. Origin, characteristics and classification of swamps and excessively moist forests: textbook. Arkhangelsk: Publishing house of AGTU, 2006. 100 p. (In Russ.)

*Tarakanov A.M.* Characteristics of the hydroforestry fund and natural features of swampy forests of the European North of Russia. *Arctic Environmental Research*, 2005, no. 2, pp. 56–63. (In Russ.)

*Tarakanov A.M.* The growth of drained forests and farming in them. Arkhangelsk: Sevniiikh, 2004. 228 p. (In Russ.)

*Tarakanov A.M., Simakov A.A., Kapistka V.V., Dvoryashin A.V.* Features of forestry management on drained lands. Collection of scientific papers of the Northern Research Institute of Forestry. Arkhangelsk, 2019, pp. 9–18. (In Russ.)

*Yurkovskaya T.K.* The relationship of taiga forests and swamps in space and time. *Izvestiya Samarskogo NC RAS*, 2012, no. 1–5, pp. 1–4. (In Russ.)

*Материал поступил в редакцию 11.11.2023*

---

**Наквасина Е.Н., Цветков И.В., Давыдов А.В., Корсакова А.О.** Трансформация сосняка кустарничково-сфагнового при длительном осушении в северном лесном районе // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 250. С. 98–115. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.98-115

В развитии лесоболотных комплексов после осушения происходят экосистемные изменения всех ярусов биогеоценоза, что требует их комплексного изучения. Нами изучено влияние длительного (более 80 лет) осушения, проведенного в сосняке кустарничково-сфагновом в северном лесном районе (Архангельская область), на древостой и состояние нижних ярусов биогеоценоза: естественное возобновление, живой напочвенный покров и свойства торфяной почвы. Осушительная мелиорация проведена в 1940 г. ручным способом, на части площади проведены рубки ухода (1976 г.) – прочистки с целью регулирования

густоты насаждения и улучшения условий роста деревьев главной породы. Объект является стационарным с 1990 г. (Северный НИИЛХ), заложено 3 пробные площади – осушаемый сосняк, осушаемый сосняк с рубками ухода и неосушаемое контрольное насаждение. Изучение древостоя, естественного возобновления, живого напочвенного покрова и почв проводили по общепринятым методикам. На осушаемой площади почвенно–грунтовые условия положительно повлияли на общую продуктивность лесных насаждений: древостой характеризуется высокой продуктивностью, класс бонитета II, тогда как на неосушаемой пробной площади – Va. Значительные различия и по запасу древесины стволов (246 и 63 м<sup>3</sup>/га, соответственно). Рубки ухода на фоне осушительной мелиорации незначительно способствовали повышению продуктивности древостоя, прежде всего за счет перераспределения по породам. Естественное возобновление в осушаемых сосново-березовых насаждениях слабое, представлено березой (200 шт./га), появившейся после рубок ухода. В живом напочвенном покрове в результате осушения снизилась численность видов, изменился их эколого-ценотический состав: полностью исчезли ксерофитные виды, доля мезофитов увеличилась в 2 раза. Сходство между неосушаемым и осушаемым насаждениями низкое, индекс Жаккара составляет 0,153–0,233. Рубки ухода, проводимые на фоне осушения, несколько выравнивают уровень биоразнообразия и повышают его, по сравнению с осушенным насаждением. Тип леса кустарничково-сфагновый, отмеченный ранее и соответствующий контрольному насаждению, изменился на черничный (влажный), в котором сформировалась типичная для автотрофного увлажнения лесная подстилка. В торфяной залежи (верхние слои): в два раза увеличилась степень разложённости и плотность сложения торфа, снизилась общая скважность, но возросла скважность аэрации. При этом зольность и кислотность торфа изменились незначительно. Экосистема сосняка кустарничково-сфагнового при проведении длительной осушительной мелиорации претерпела существенные изменения, касающиеся нижних ярусов биогеоценоза в сторону их выхода из сфагновой группы типов леса, что обуславливает и повышение продуктивности насаждения.

**Ключевые слова:** сосняк кустарничково-сфагновый, осушение, естественное возобновление, живой напочвенный покров, почва, свойства.

**Nakvasina E.N., Tsvetkov I.V., Davydov A.V., Korsakova A.O.** Transformation of shrub-sphagnum pine under prolonged drainage in the northern forest area. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2024, iss. 250, pp. 98–115 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.98-115

In the development of forest-swamp complexes after drainage, ecosystem changes occur in all tiers of biogeocenosis, which requires their comprehensive study. We have studied the effect of a long (more than 80 years) drainage carried out in the shrub-sphagnum pine forest in the northern forest district (Arkhangelsk region), on the

stand and the state of the lower tiers of biogeocenosis: natural renewal, living ground cover and properties of peat soil. Drainage reclamation was carried out in 1940 by hand, care felling (1976) was carried out on part of the area – clearing in order to regulate the density of planting and improve the growth conditions of trees of the main breed. The facility has been stationary since 1990. (Northern NIILH), in which 3 trial areas are laid – drained pine forest, drained pine forest with care cabins and non-drained control plantation. The study of the stand, natural renewal, living ground cover and soils was carried out according to generally accepted methods. On the drained area, soil and soil conditions positively affected the overall productivity of forest stands: the stand is characterized by high productivity, bonus class II, whereas on the non–drained trial area – Va. There are also significant differences in the stock of trunk wood (246 and 63 m<sup>3</sup>/ha, respectively). Felling of care against the background of drainage reclamation slightly contributed to an increase in the productivity of the stand, primarily due to redistribution by species. Natural renewal in drained pine-birch plantations is weak, represented by birch (200 pcs./ha), which appeared after logging. In the living ground cover, as a result of drainage, the number of species decreased, their ecological and cenotic composition changed: xerophytic species completely disappeared, the proportion of mesophytes increased by 2 times. The similarity between non-drained and drained plantings is low, the Jacquard index is 0.153–0.233. Logging of care carried out against the background of drainage somewhat equalize the level of biodiversity and increase it, compared with the drained plantation. The type of shrub-sphagnum forest noted earlier and corresponding to the control planting has changed to blueberry (moist), in which a typical autotrophic moistening forest litter has formed. In peat deposits (upper layers): the degree of decomposition and the density of peat addition doubled, the total borehole decreased, but the borehole aeration increased. At the same time, the ash content and acidity of peat have changed slightly. The ecosystem of shrub-sphagnum pine during long-term drainage reclamation has undergone significant changes concerning the lower tiers of biogeocenosis towards their exit from the sphagnum group of forest types, which also causes an increase in the productivity of planting.

**Key words:** shrub-sphagnum pine, drainage, tree stand, natural renewal, living ground cover, soil, properties.

---

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

163002, наб. С. Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: nakvasina@yandex.ru



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

163002, Dvina emb. 17, Arkhangelsk, Russia. E-mail: nakvasina@yandex.ru

**ЦВЕТКОВ Илья Васильевич** – доцент Северного (Арктического) Федерального университета имени М.В. Ломоносова; старший научный сотрудник Северного НИИ лесного хозяйства, кандидат сельскохозяйственных наук. ORCID: 0000-0002-1559-3254.

163002, наб. С. Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: i.tsvetkov@narfu.ru

**TSVETKOV Илья V.** – PhD (Agriculture), Associate Professor, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov; senior researcher, Northern Research Institute of Forestry. ORCID: 0000-0002-1559-3254.

163002, Dvina emb. 17, Arkhangelsk, Russia. E-mail: i.tsvetkov@narfu.ru

**ДАВЫДОВ Александр Владимирович** – лаборант-исследователь Северного НИИ лесного хозяйства; аспирант Северного (Арктического) Федерального университета имени М.В. Ломоносова. ORCID: 0000-0003-4328-7040.

163002, наб. С. Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: davydov.a@edu.narfu.ru

**DAVYDOV Alexsandr V.** – laboratory assistant-researcher, Northern Research Institute of Forestry; graduate student, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. ORCID: 0000-0003-4328-7040.

163002, Dvina emb. 17, Arkhangelsk, Russia. E-mail: davydov.a@edu.narfu.ru

**КОРСАКОВА Анастасия Олеговна** – магистрант Северного (Арктического) Федерального университета имени М.В. Ломоносова.

163002, наб. С. Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия.

**KORSAKOVA Anastasia O.** – PhD student, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov.

163002, Dvina emb. 17, Arkhangelsk, Russia.

**А.Б. Шишляникова, Д.А. Данилов, И.В. Змитрович, И.В. Бачериков**

## **ФИТОПАТОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДУБА ЧЕРЕШЧАТОГО В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ПРОИЗРАСТАНИЯ**

*Введение.* Дуб черешчатый (*Quercus robur*) представляет своеобразный и адаптированный к умеренно-холодному климату дериват теплолюбивого и процветавшего в терциере на обширных пространствах Евразии и Северной Америки рода *Quercus* [Недолужко, 1995; Grimshaw, Bayton, 2009]. Ценоспектр дуба черешчатого в пределах его ареала своеобразен и охватывает степную, лесостепную, широколиственнолесную, подтаежную зоны и южную полосу таежной зоны. Ценооптимум дуба черешчатого мы наблюдаем в неморальных поймах в пределах широколиственнолесной и подтаежной зон. Именно на дренированных гривах центральной поймы, ежегодно обогащаемых речным аллювием и лишенных бокового затенения, складываются условия, наиболее благоприятные для роста дуба черешчатого [Фирсов и др., 2021]. В равновесном с текущей биогеоценотической обстановкой состоянии некроз ветвей дуба черешчатого является фактором, имеющим адаптивное значение, а изучение грибов-сапротрофов, вовлеченных в процесс самоизреживания кроны, представляет теоретический и практический интерес [Шишляникова и др., 2023].

*Цель работы* – оценка влияния некротрофных и сапротрофных видов грибов на жизненное состояние деревьев дуба черешчатого в оптимум-ареале дуба черешчатого и севернее его естественного распространения. Для достижения поставленной цели нами был проведен комплексный анализ насаждений, сформированных в различных условиях произрастания дуба черешчатого.

*Материал и методы.* Нами была намечена зонально-меридиональная трансекта, пересекающая наиболее широкий спектр местообитаний дуба черешчатого (рис. 1). В субширотном направлении она идет от Тулы до Пушкиногорья, поворачивая субмеридионально в направлении Выбога.

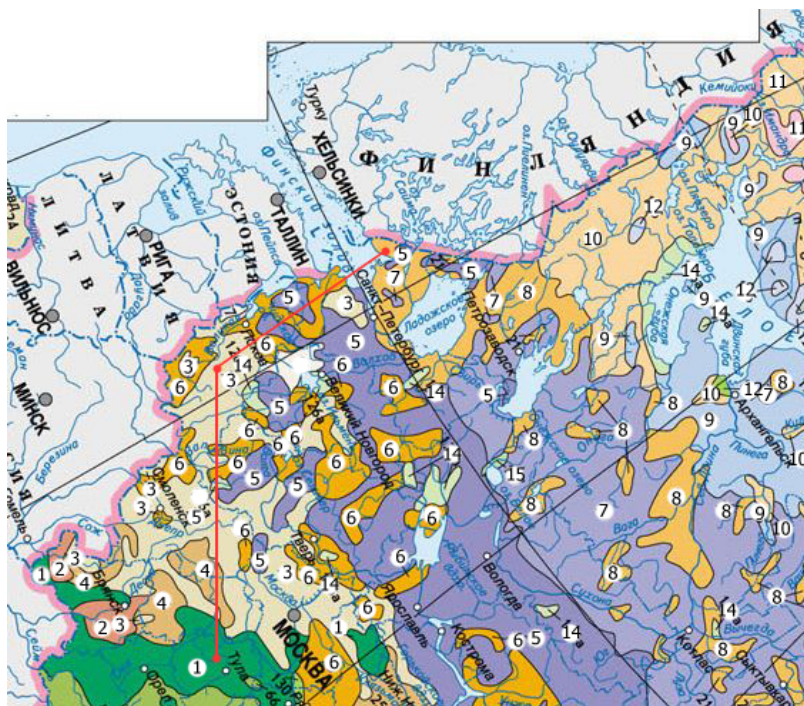


Рис. 1. Зонально-меридиональная трансекта ЕТР и пересекаемые ею типы растительности [Национальный атлас, 2007]: 1 – липово-дубовые широколиственные леса; 2 – сосново-широколиственные леса; 3 – елово-широколиственные подтаежные леса; 4 – сосновые подтаежные леса с южноборовыми и лесостепными видами; 5 – еловые южнотаежные леса; 6 – сосновые южнотаежные леса с южноборовыми видами; 7 – еловые среднетаежные леса; 8 – сосновые среднетаежные леса; 9 – еловые северотаежные леса; 10 – сосновые северотаежные леса; 11 – тундрово-редколесные горные таежные леса; 12 – травяно-гипново-сфагновые грядово-мочажинные болота; 13 – травяно-кустарничково-сфагновые болота; 14 – сфагновые верховые болота

Fig. 1. Zonal-meridional transect of the ETR and vegetation types crossed by it [from: National Atlas, 2007]: 1 – linden-oak broadleaved forests; 2 – pine-broadleaved forests; 3 – spruce-broadleaved sub-taiga forests; 4 – pine sub-taiga forests with southern pine and forest-steppe species; 5 – spruce southern taiga forests; 6 – southern taiga pine forests with southern grasses species; 7 – middle taiga spruce forests; 8 – middle taiga pine forests; 9 – northern taiga spruce forests; 10 – northern taiga pine forests; 11 – tundra-rare mountain taiga forests; 12 – grass-hypno-sphagnum ridge-moss bogs; 13 – grass-shrub-sphagnum bogs; 14 – sphagnum bogs

Исследование проводилось на территориях, относящихся к разным лесорастительным районам (Приказ Минприроды..., 2014 с изм. 2023)<sup>1</sup>: лесостепная зона Российской Федерации, лесостепной район европейской части Российской Федерации (Щекинский район Тульской области); зона хвойно-широколиственных лесов Российской Федерации, район хвойно-широколиственных (смешанных) лесов европейской части Российской Федерации (Пушкиногорский район Псковской области); таежная зона, Балтийско-Белозерский таежный район (г. Санкт-Петербург и Ленинградская область).

Объекты нашего исследования – комплекс ксилосапротрофных грибов, ассоциированных с побеговой системой дуба черешчатого в насаждениях дуба черешчатого в лесных и парковых экосистемах (табл. 1–8) вдоль субширотной-субмеридиональной трансекты «Тула – Выборг», отражающей движение из зоны оптимум-ареала этой породы к его периферии. Исследование проводилось в разных лесорастительных зонах и лесорастительных районах (Приказ Минприроды..., 2014, с изм. 2023)<sup>1</sup>.

Таблица 1

### Характеристика участков исследования

#### Characteristics of the study sites

Виды участков	Селивановская лесная дача Крюковского участкового лесничества ГУ ТО «Плавское лесничество»	
Номер участка	1	2
Площадь участка, га	38,4	42,0
Высота над уровнем моря, м	185,3	158,6
Особенности рельефа	Холмистая равнина, расчлененная овражно-балочной системой	Холмистая равнина, расчлененная овражно-балочной системой
Тип леса или посадки; состав насаждения	Дубняк ясенево-липовый снытевый 6Д4ЛП+Б+С+ОС+КЛ (неоднородный) 1 ярус – Дуб выс	Дубняк кленово-липовый снытевый 5Д5ЛП+ОС+Б +ИВ (неоднородный) 1 ярус – Дуб выс
Подрост, подлесок (при наличии)	Подрост 4ЯЗКЛЗЛП Подлесок ЛЩ Р Ж густой	Подрост 5КЛ4ЛП1Д Подлесок ЛЩ ЧР Ж средний
Преобладающие типы почв	Серая лесная	Дерново-среднеоподзоленная

<sup>1</sup> Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 18.08.2014 г. № 367 «Об утверждении Перечня лесорастительных зон Российской Федерации и Перечня лесных районов Российской Федерации». Зарегистрирован 29.09.2014 г. № 34186 (с изм. на 02.08.2023 г.).

Таблица 2

**Характеристика участков исследования**  
**Characteristics of the study sites**

Виды участков	Насаждения дуба черешчатого в окрестностях и на территории Дендрария ГОУ СПО ТО «Крапивенский лесхоз-техникум»
Номер участка	3
Площадь участка, га	15,1
Высота над уровнем моря, м	176,8
Особенности рельефа	Холмистая равнина
Тип леса или посадки; состав насаждения	Линейные, куртинные; отдельные деревья 10Д
Подрост, подлесок (при наличии)	нет
Преобладающие типы почв	Тяжелые суглинки, сильно оподзоленные и оглеенные

Таблица 3

**Характеристика участков исследования**  
**Characteristics of the study sites**

Виды участков	Государственный мемориальный историко-архитектурный и природно-ландшафтный музей-заповедник А.С. Пушкина «Михайловское», территория «Усадьба-музей Михайловское»		
Номер участка	1	2	3
Площадь участка, га	6,7	7,1	6,7
Высота над уровнем моря, м	100,4	99,0	88,4
Особенности рельефа	Равнинно-холмисто-грядовый	Равнинно-холмисто-грядовый	Равнинно-холмисто-грядовый
Тип леса или посадки; состав насаждения	Ельник (с липой и дубом) кислично-зеленчуковый с полянами из лиственных пород 4Е2С2ЛП2Д1Б+Р	Ельник (с липой и дубом) зеленчуково-волосистоосоковый с полянами из лиственных пород 3ЕЗЛП2С2Д1Б1КЛ	Сосняк сложный лещиново-чернично-кисличный с полянами из лиственных пород 4С2Д2ЛП1Е1КЛ+ЯС
Подрост, подлесок (при наличии)	Подрост 3ЕЗКЛЗЛП 1Д Подлесок ЛЩ Ж КЛН КРС СМР БРК МЛ	Подрост 3ЕЗКЛЗЛП 1Д+Б Подлесок ЛЩ Ж	Подрост 2Е2КЛ2ЛП2Д1В Подлесок ЛЩ КРС Р Ж
Преобладающие типы почв	Дерново-подзолистые и дерновые легкие	Дерново-подзолистые и дерновые легкие	Дерново-слабоподзолистые супесчаные

Таблица 4

## Характеристика участков исследования

## Characteristics of the study sites

Виды участков	Баболовский парк, г. Пушкин			
Номер участка	1	2	3	4
Площадь участка, га	24,5	12,5	17,9	16,5
Высота над уровнем моря, м	73,0	63,5	62,5	69,3
Особенности рельефа	Равнинный	Равнинный	Равнинный с понижением, с постоянным избыточным увлажнением	Равнинный с понижением, с избыточным увлажнением, застоем воды
Тип леса или посадки; состав насаждения	Линейные посадки и отдельные деревья, в глубине лесопарковые насаждения 6Б4ДЗЕ	Вдоль дорожек линейные посадки, в глубине лесопарковые насаждения 6Б4ОЛ	Линейные посадки и отдельные деревья 10Д	Вдоль дорожек линейные посадки, в глубине лесопарковые насаждения 1 ярус 10Б 2 ярус 9Е2Д1ОЛ
Подрост, подросток (при наличии)	Подрост 5Е5ОС угнетен	Подрост 4ЕЗКЛЗОС +Д угнетен Подросток КРС Р ЧР	нет	Подрост 4Е4ОС2КЛ +Д угнетен Подросток КРС Р ЧР
Преобладающие типы почв	Дерновая слабо-подзолистая глеевая антропогенно-трансформированная суглинистая	Дерновая слабо-подзолистая глеевая антропогенно-трансформированная суглинистая	Дерновая слабо-подзолистая глеевая антропогенно-трансформированная суглинистая	Дерновая слабо-подзолистая глеевая антропогенно-трансформированная суглинистая

Таблица 5

**Характеристика участков исследования**

**Characteristics of the study sites**

Виды участков	Отдельный (Нижний) парк, г. Пушкин	
Номер участка	1	2
Площадь участка, га	9,1	7,3
Высота над уровнем моря, м	30,9	39,4
Особенности рельефа	Равнинный	Равнинный
Тип леса или посадки; состав насаждения	Линейные и куртинные посадки, сырые луга 10Д	Линейные и куртинные посадки, сырые луга 10Д
Подрост, подросток (при наличии)	нет	нет
Преобладающие типы почв	Дерново-подзолистая (урбаноземы)	Дерново-подзолистая (урбаноземы)

Таблица 6

**Характеристика участков исследования**

**Characteristics of the study sites**

Виды участков	Государственный природный комплексный заказник «Дубравы у деревни Велькота»			
Номер участка	1	2	3	4
Площадь участка, га	31,9	28,1	40,1	6,6
Высота над уровнем моря, м	119,7	61,5	97,7	101,1
Особенности рельефа	Равнинный	Равнинный	Равнинный	Равнинный
Тип леса или посадки; состав насаждения	Дубняк снытевый Aegopodio- Quercetum 8Д+2Б+ОС	Дубняк снытевый Aegopodio- Quercetum 10Д+Я	Дубняк снытевый Aegopodio- Quercetum 10Д+В	Куртины и отдельные деревья 10Д
Подрост, подросток (при наличии)	Подрост ЗОС2Б2КЛ 2ЛП1Я+Д Подросток ЛЩ Ж КЛН КРС ЧР	Подрост 2Б2КЛ 2ЛП2ОС1В 1Я+Д Подросток ЛЩ Ж КЛН КРС ЧР	Подрост 2Б2В2КЛ 2ЛП2ОС+Д Подросток ЛЩ Ж КЛН КРС ЧР	Подрост 2КЛ2ЛП1Т 1Я
Преобладающие типы почв	Дерново-карбонатные оподзоленные	Дерново-карбонатные оподзоленные	Дерново-карбонатные оподзоленные	Дерново-карбонатные

Таблица 7

**Характеристика участков исследования****Characteristics of the study sites**

Виды участков	Парк Дубки Сестрорецкие (Дальние)			
Номер участка	1	2	3	4
Площадь участка, га	3,5	1,6	1,0	3,3
Высота над уровнем моря, м	2,9	3,5	2,9	4,3
Особенности рельефа	Равнинный с понижением, с избыточным увлажнением	Равнинный, дренирован	Равнинный с понижением, с избыточным увлажнением, застоем воды	Равнинный с понижением, с избыточным увлажнением
Тип леса или посадки; состав насаждения	Линейные посадки, отдельные деревья 10Д	Отдельные деревья 10Д	Линейные посадки, отдельные деревья 10Д	Лесопарковые насаждения 2Б2Д2ОЛ2ОС1Е1С +ЛП+Т
Подрост, подлесок (при наличии)	нет	нет	нет	Подрост 1Б1Д1ОЛ 1ОС Подлесок Ж КЛН КРС ЧР
Преобладающие типы почв	Дерново-подзолистая (урбаноземы)	Дерново-подзолистая (урбаноземы)	Дерново-подзолистая (урбаноземы)	Дерново-подзолистая (урбаноземы)

Изучение насаждений дуба черешчатого проходило в пределах участков, как правило, ограниченных дорожно-тропиночной сетью, по методу безразмерных пробных площадей или пробных площадей по неповешенной ходовой линии [Тальман, Катаев, 1964; Мозолева и др., 1984]. Пробной площадью служил весь обследуемый участок, обследование начиналось от любой произвольной точки на границе участка. От этой точки происходило движение в глубину участка, по направлению к заранее выбранному ориентиру. По ходу движения детально обследовались все деревья дуба черешчатого, находящиеся в десяти метрах по обе стороны от неповешенной ходовой линии. Дойдя до ориентира, произвольно выбиралось направление к другому ориентиру.



Таблица 8

**Характеристика участков исследования**

**Characteristics of the study sites**

Виды участков	Государственный историко-архитектурный и природный музей-заповедник «Парк Монрепо»				
Номер участка	1	2	3	4	5
Площадь участка, га	2,7	2,0	2,6	1,5	1,7
Высота над уровнем моря, м	0,7	3,0	3,3	0,8	8,4
Особенности рельефа	Равнинный, заболоченный	Скалистый	Возвышенный	Острова и полуостров	С повышением
Тип леса или посадки; состав насаждения	Отдельные группы деревьев 10Д	Группы деревьев по скалам и вдоль дорог 10Д	Массивы и группы деревьев по склонам 10Д	Группы деревьев 10Д	Отдельные группы деревьев 10Д
Подрост, подлесок (при наличии)	Подрост 9ОЛ1КЛ	Подрост 2Б2КЛ2ОЛ2ОС2Р	Подрост 4ИВ3КЛ3ОС	Подрост 9ОЛ1КЛ	Подлесок КЛ Р ЧР
Преобладающие типы почв	Насыпные среднемошные суглинистые и дерново-глеевые, насыпные мощные на иле	Примитивные на граните и дерново-подзолисто-супесчаные на двучлене	Примитивные на граните и слабоподзолистые песчаные	Насыпные мощные суглинистые на иле	Слабоподзолистые супесчаные на граните

*Примечание:* Б – Береза, БРК – Бересклет, В – Вяз, Д – Дуб, Е – Ель, Ж – Жимолость, ИВ – Ива, КЛ – Клен, КЛН – Калина, КРС – Крушина, ЛП – Липа, ЛЩ – Лещина, МЛ – Малина, ОЛ – Ольха, ОС – Осина, Р – Рябина, СМР – Смородина, С – Сосна, Т – Тополь, ЧР – Черемуха, Я – Ясень.

Диаметр дерева замеряли мерной вилкой Mantax Black Haglof арт. № 11-200-1004; размер и градуировка 800 мм; 30"; вес 750 г; материал шкалы – анодированный алюминий, безбликовый; материал рукоятки по-

ликарбонатный пластик, армированный стекловолокном; ножки складные алюминиевые и стальные; запатентована FPA и РТВ.

Высоту дерева замеряли лазерным дальномером Nikon Forestry Pro WJ 069092; измеряемое расстояние 10 – 500 м; измеряемое расстояние с отражателем до 999 м; угол  $\pm 890^\circ$ ; увеличение 6 X; эффективный диаметр объектива 21 мм; внутренний дисплей Act (Actual Distance – реальное расстояние) точность 0,5 м (до 100 м), точность до 1 м (свыше 100 м), Hor (Horizontal Distance – горизонтальное расстояние) и Hgt (Height – высота) точность 0,2 м (до 100 м), точность до 1 м (свыше 100 м), Ang (Angle – угол) с точностью 0,10 (менее 100), с точностью 1,00 (более 100); Внешний дисплей Act (Actual Distance – реальное расстояние) с точностью 0,5 м, Hor (Horizontal Distance – горизонтальное расстояние) и Hgt (Height – высота) с точностью 0,2 м, Ang (Angle – угол) с точностью 0,10; угол по направлению вниз от горизонтальной линии: отображаемые значения «–».

Возраст дерева, наличие скрытой гнили в древесине в полевых условиях определяли при помощи приростного (возрастного) бурава Djos 350/14” мм Haglof, буровая коронка диаметром 5,15 мм, 3-резьбовая, экс-трактор.

При оценке состояния отдельных деревьев и древостоев дуба применяли визуальный подход, основанный на глазомерной оценке морфологических признаков и выделении категорий (баллов) состояния [Мозолевская и др., 1984; Кузьмичев и др., 2004], используя шкалу категорий состояния.

Нами при детальном обследовании дубовых насаждений парков и ООПТ была принята специализированная шкала категорий состояния дуба [Звягинцев и др., 2019], с дополнениями [Селочник, Каплина, 2011; Фурменкова, Кочергина, 2021]. В данной шкале (табл. 9) всем признакам придается равное значение. Признаки состояния дерева в данной шкале разделены на три группы, последовательно определяемые для каждого отдельного дерева.

Сначала оценка дается по признакам в кроне, затем – по признакам на стволе и в заключение – по внутренним признакам, при необходимости выявленным при вскрытии коры. Признаки (симптомы) ослабления дерева в кроне, на стволе и внутренние признаки равнозначны, все они должны в полной мере использоваться для оценки текущего состояния дерева. По каждой группе признаков дереву последовательно присваивается одна из 9 категорий состояния.

Таблица 9

**Шкала категорий состояния деревьев дуба**

**Scale of English oak tree condition categories**

Категория состояния деревьев, балл	Признаки ослабления	
1 – без признаков ослабления	в кроне	Крона густая, листва зеленая; прирост текущего года нормальный для возраста и условий местопроизрастания, сухие ветви единичны
	на стволе	нет
	дополнительные	нет
1,5-единичные признаки ослабления, без снижения жизнеспособности	в кроне	Крона густая, листва зеленая; прирост текущего года нормальный для возраста и условий местопроизрастания, сухие ветви внизу кроны; дефолиация до 5%
	на стволе	Единичные водяные побеги; механические повреждения до 1 дм <sup>2</sup> ; поперечный рак до 1/3 периметра ствола
	дополнительные	нет
2 – небольшая степень ослабления	в кроне	Крона слабоажурная, листва зеленая (возможно объедание); усыхание отдельных ветвей (до 15%) в верхней и средней частях кроны; дефолиация 5–10%
	на стволе	Местные повреждения ствола и корневых лап болезнями или абиотическими факторами
	дополнительные	Локализованные деревом сухобочины под корой до 1/8 окружности; возможны однолетние базидиомы дереворазрушающих грибов
2,5 – средняя степень ослабления	в кроне	Крона слабоажурная, листва зеленая (возможно объедание); усыхание отдельных ветвей (до 25%) в верхней и средней частях кроны, прирост уменьшен по сравнению с нормальным; дефолиация 10–30%
	на стволе	Местные повреждения ствола и корневых лап болезнями или абиотическими факторами
	дополнительные	Локализованные деревом сухобочины под корой до 1/8 окружности; попытки поселения попытки ксилофагов; повреждение отдельных корневых лап опенком; возможны базидиомы дереворазрушающих грибов

Продолжение табл. 9

Категория состояния деревьев, балл	Признаки ослабления	
3 – сильная степень ослабления	в кроне	Крона сильноажурная, листва мельче обычной или преждевременно опадает; усыхает в верхней и средней частях кроны 26–30% ветвей (в возрасте до 80 лет) или 26–40% (в возрасте 80 лет и более), прирост слабый; дефолиация 30–40%
	на стволе	Повреждение корневых лап и ствола (гнилевое, механическое, огневое и т. п.) на 26–30% окружности (до 80 лет) или 26–40% (80 лет и старше); сокоотечение на стволе и ветвях; обильные водяные побеги; на стволе раковые опухоли от поперечного рака закрытого типа
	дополнительные	Распространение под корой внутренней сухобочины; возможны локальные поселения ксилофагов до 1/4 окружности ствола; повреждения бактериальной водянкой или опенком ствола на 1/4 окружности, или 1/4 от количества корневых лап; возможны многолетние базидиомы дереворазрушающих грибов
3,5 – очень сильная степень ослабления	в кроне	Усыхание ветвей в верхней и средней частях кроны 31–50% (до 80 лет) или 41–60% (80 лет и старше), суховершинность; дефолиация 40–60%.
	на стволе	Повреждение корневых лап и ствола (гнилевое, механическое, огневое и т. п.) на 31–50% окружности (до 80 лет) или 41–60% (80 лет и старше)
	дополнительные	Распространение под корой внутренней сухобочины; успешное поселение стволовых вредителей, повреждение бактериальной водянкой или опенком ствола на 1/4–1/2 окружности или 1/4–1/2 от количества корневых лап; базидиомы дереворазрушающих грибов
4 – усыхающие	в кроне	Усыхание ветвей в верхней и средней частях кроны более 50% (до 80 лет) или более 60% (80 лет и более); листва преждевременно опадает, желтеет или усыхает; дерево существует за счет вторичной кроны (водяных побегов); дефолиация более 1/2 кроны (60–80%)
	на стволе	Повреждено более 50% (до 80 лет) или более 60% (80 лет и старше) окружности ствола или корневых лап; признаки грибного поражения луба и заболони; сокоотечение; сухобочины, заселенные или с выходными отверстиями ксилофагов; усыхающие водяные побеги

Окончание табл. 9

Категория состояния деревьев, балл	Признаки ослабления	
4 – усыхающие	дополнительные	Заселение стволовыми вредителями более 1/2 окружности ствола или продолжение освоения ксилофагами от сухобочины или прошлогоднего поселения; освоение опенком или бактериальной водянкой более 1/2 окружности ствола с отмиранием луба; базидиомы дереворазрушающих грибов
5 – сухостой текущего года	в кроне	Листва отсутствует или усохла; возможно частичное опадение ветвей; могут сохраняться отдельные живые водяные побеги
	на стволе	Мицелиальные пленки и ризоморфы опенка; заселение или выходные отверстия ксилофагов по всему стволу; возможно частичное опадение коры; базидиомы дереворазрушающих грибов
	дополнительные	Под корой – следы массового развития ксилофагов; поражение луба и заболони грибной и бактериальной инфекцией
6 – сухостой прошлых лет	в кроне	Листвы нет, часть ветвей опала
	на стволе	Заболонь и луб разрушаются или разрушены; кора отслоилась от древесины либо опала
	дополнительные	Заболонь и луб разрушаются или разрушены; кора отслоилась от древесины либо опала

Пораженность кроны ключевыми грибными агентами усыхания учитывалась по следующим шкалам:

– пораженность кроны *Colpoma quercinum*: 1 балл – нижняя часть кроны, поражено 5–10% кроны; 2 балла – нижняя и частично средняя часть кроны, поражено 10–25% кроны; 3 балла – средняя и частично верхняя часть кроны, поражено 25–40% кроны; 4 балла – преимущественно верхняя часть кроны, поражено 40–60% кроны; 5 баллов – поражено 60–80% кроны; 6 баллов – поражено более 80% кроны.

– пораженность кроны *Vuilleminia comedens*: 1 балл – нижняя часть кроны, поражено 5–10% кроны; 2 балла – нижняя и частично средняя часть кроны, поражено 10–15% кроны; 3 балла – средняя и частично верхняя часть кроны, поражено 15–20% кроны; 4 балла – преимущественно верхняя часть кроны, поражено 20–40 % кроны; 5 балла – поражено 40–60% кроны; 6 баллов – поражено 60–80% кроны.

Пораженность листы *Erysiphe alphitoides* учитывалась по шкале: 1 балл – поражено 5–10% листы; 2 балла – поражено до 25% листы; 3 балла – поражено до 40% листы; 4 балла – поражено до 55% листы; 5 баллов – поражено  $\geq 75\%$  листы.

Наличие базидиом / раковых образований учитывалось как: 1 – *Laetiporus sulphureus*; 2 – *Fomitiporia robusta*; 3 – *Daedalea quercina*; 4 – ступенчатый рак, возбудитель *Neonectria ditissima* (= *Nectria galligena*); 5 – поперечный надломовидный рак, возбудитель бактерия *Pseudomonas quercina*; 6 – *Inonotus dryophilus*; 7 – *Armillaria lutea*.

Наличие дупел (пораженность гнилями) учитывалось как: 1 – дупла по всей длине ствола, в т. ч. сквозные; гниющие сучья – ствольные гнили; 2 – дупла в комлевой части ствола; до 2 м по высоте ствола – комлевые гнили; 3 – некроз коры ствола – гниль корней.

Дополнительно учитывались следующие внешние патологии деревьев дуба: 1 – крупные морозные трещины; 2 – сухобокость; 3 – прорость; 4 – обдир, ошмыг; 5 – наклон (кривизна) ствола; 6 – толстые скелетные ветви; 7 – облом вершины; 8 – облом скелетных ветвей; 9 – усыхание вершины; 10 – усыхание скелетных ветвей; 11 – изреженная (очень маленькая) крона; 12 – многочисленные водяные побеги; 13 – наплывы, каповые наросты.

Полученные результаты обрабатывали при помощи табличного процессора MS Excel, пакета прикладных программ STATISTICA 11.0 [Боровиков, 2001] и разработанной на языке Python программы для автоматизации анализа, использующей библиотеки Pandas [McKinney, 2010], SciPy [Virtanen et al., 2020], Sklearn [Pedregosa et al., 2011], Numpy [Harris, 2020], Matplotlib [Hunter et al., 2007], Seaborn [Waskom, 2021].

В качестве статистических методов применяли непараметрические тесты, так как выборки из переменных принадлежат к интервальной шкале (ранги) и не подчиняются нормальному распределению [Chang, 2003; Мاستицкий, Шитиков, 2014; Баврина, 2021].

Для корректного применения непараметрических тестов значения диаметров были приведены к рангам. Ранг (по диаметру ствола на выс. 1,3 м): 1 – до 10 см; 2 – 12–20 см; 3 – 22–30 см; 4 – 32–40 см; 5 – 42–50 см; 6 – 52–60 см; 7 – 62–70 см; 8 – 72–80 см; 9 – 82–90 см; 10 – 92–100 см; 11 – 102–110 см; 12 – 112–120 см; 13 – 122–130 см; 14 – 132–140 см; 15 – 142–150 см; 16 – 152–160 см; 17 – 162–170 см; 18 – 172–180 см; 19 – 182–190 см; 20 – 192–200 см; 21 – 202–210 см; 22 – 212–220 см; 23 – 222–230 см; 24 – 232–240 см; 25 – 242–250 см.

Сравнение групп выполняли при помощи непараметрического дисперсионного анализа или критерия Краскела–Уоллиса (англ. Kruskal-Wallis

ANOVA by ranks или Kruskal-Wallis rank sum test). Статистически значимыми считали различия при  $p < 0,05$  [Любищев, 1986; Унгуриану, Гржибовский, 2014].

Исследование взаимосвязи между двумя переменными выполняли при помощи корреляционного анализа с использованием непараметрического коэффициента корреляции Спирмена. Уровень значимости коэффициента корреляции принимается  $p \leq 0,05$  [Баврина, 2021].

Для отображения парной корреляции всех переменных полученный набор данных из всех возможных коэффициентов корреляции представили в виде матрицы корреляций и ее визуализации в виде тепловой карты корреляций.

Для рассмотрения взаимосвязи влияния объясняющей независимой переменной на объясняемую зависимую переменную было проведено статистическое моделирование (англ. statistical learning) уравнения парной линейной регрессии [Мастицкий, Шитиков, 2014].

*Результаты и обсуждение.* Для оценки вклада различных патологий в категорию состояния деревьев дуба черешчатого был проведен комплексный анализ в насаждениях, сформированных в различных условиях произрастания, что позволяет выявить как сходство, так и различие в фитопатологическом состоянии дуба черешчатого в регионах исследования, выявить общие закономерности формирования ксилосапротрофного миксокомплекса дуба черешчатого в ценооптимуме и на северной границе его распространения.

При оценке категории фитопатологического состояния деревьев на всех опытных объектах (пробных площадях) было выявлено, что наибольший вклад в умеренное поражение побеговой системы дуба черешчатого вносится тремя показателями – поражение ветвей некротрофом *Colpota quercinum* (колпома дубовая), поражение ветвей вызывающим некрозы сапротрофом *Vuilleminia comedens* (вийемения разъедающая), поражение листьев биотрофом *Erysiphe alphitoides* (мучнистая роса дуба).

В результате корреляционного анализа массива данных, полученных при проведении фитопатологического исследования насаждений дуба черешчатого, сформированных в различных условиях произрастания, составлена корреляционная матрица (рис. 2). Коэффициенты корреляции в матрице представлены, в том числе в виде цветов для визуальной демонстрации корреляции факторов в массиве данных друг с другом; в результате матрица имеет вид тепловой карты, что позволяет быстро оценить взаимосвязи внутри массива данных.

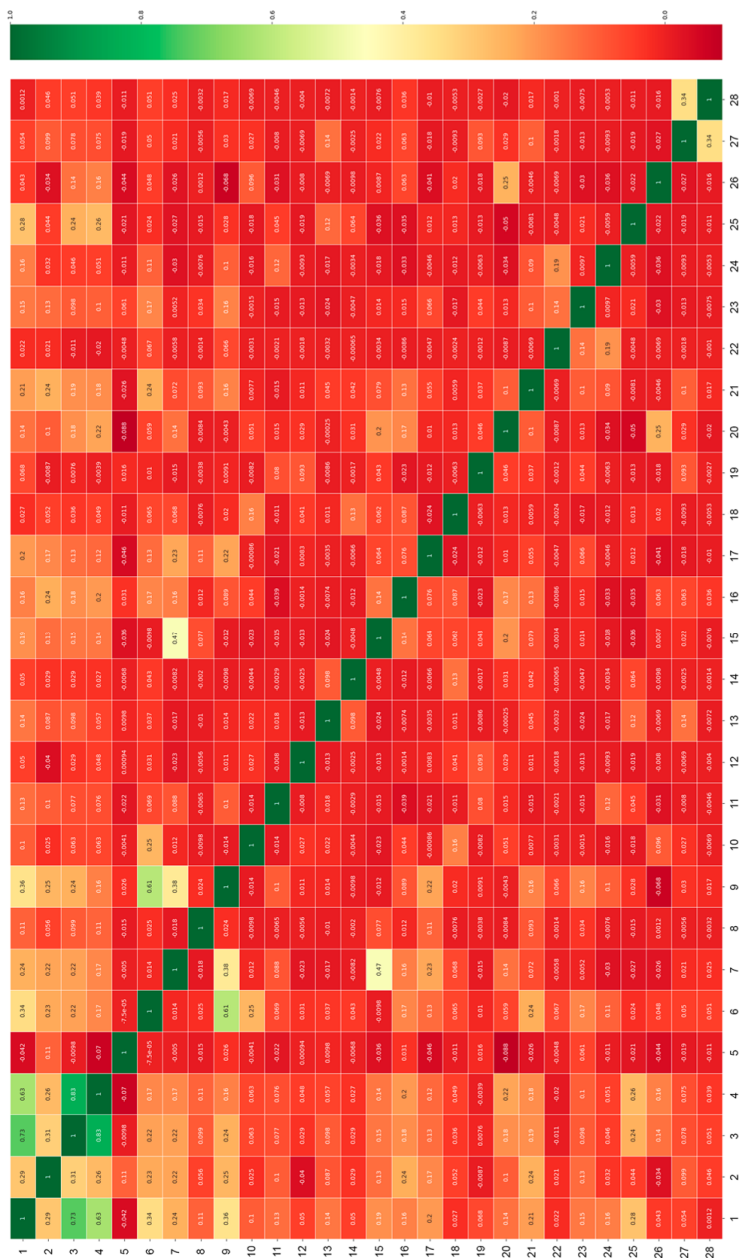




Рис. 2. Корреляции между основными параметрами древостоев дуба черешчатого, по данным, полученным на субширотно-субмеридиональной трансекте «Тула – Выборг»  
 1 – категория состояния, балл; 2 – ранг по диаметру ствола; 3 – пораженность кроны *Colpota quercinum*, балл; 4 – пораженность кроны *Vuileminia comedens*, балл; 5 – пораженность листвы *Erysiphe alphitoides* (Мучнистая роса), балл; 6 – стволовая гниль; 7 – комлевая гниль; 8 – корневая гниль; 9 – базидиомы *Laetiporus sulphureus* (Серно-желтый трутовик); 10 – базидиомы *Fomitiporia robusta* (ложный дубовый трутовик); 11 – базидиомы *Daedalea quercina* (дубовая губка); 12 – ступенчатый рак (возб. *Neonectria ditissima* (= *Nectria galligena*); 13 – поперечный надломовидный рак (возб. *Pseudomonas quercina*); 14 – базидиомы *Inonotus dryophilus* (Дубовый (Дуболюбивый) трутовик); 15 – базидиомы *Armillaria lutea* (Опенок желтый); 16 – крупные морозные трещины; 17 – сухобокость; 18 – пророст; 19 – обдир, ошмыг; 20 – наклон (кривизна) ствола; 21 – толстые скелетные ветви; 22 – облом вершины; 23 – облом скелетных ветвей; 24 – усыхание вершины; 25 – усыхание скелетных ветвей; 26 – изреженная (очень маленькая) крона; 27 – многочисленные водяные побеги; 28 – наплывы, каповые наросты

Fig. 2. Correlations between the main parameters of stands of English oak, according to the data obtained on the sublatitudinal-submeridional transect «Tula – Vybory»

1 – condition category, score; 2 – rank by trunk diameter; 3 – crown infestation with *Colpota quercinum*, score; 4 – crown infestation with *Vuileminia comedens*, score; 5 – powdery mildew infestation with *Erysiphe alphitoides*, score; 6 – stem rot; 7 – butt rot; 8 – root rot; 9 – basidiomes of *Laetiporus sulphureus* (sulfur-yellow tinder fungus); 10 – basidiomes of *Fomitiporia robusta* (false oak tinder fungus); 11 – basidiomes of *Daedalea quercina* (oak sponge); 12 – step cancer (causal agent *Neonectria ditissima* = *N. galligena*); 13 – transverse fracture cancer (causal agent *Pseudomonas quercina*); 14 – basidiomes of *Inonotus dryophilus* (oak-loving tinder fungus); 15 – basidiomes of *Armillaria lutea* (yellow honey fungus); 16 – large frost cracks; 17 – dryness; 18 – sprouting; 19 – stripping, scaly; 20 – tilt (curvature) of trunk; 21 – thick skeletal branches; 22 – broken top; 23 – broken skeletal branches; 24 – drying out of top; 25 – drying out of skeletal branches; 26 – sparse (very small) crown; 27 – numerous water shoots; 28 – burls, burl growths

Корреляционная матрица (рис. 2) показала наибольшую связь между категорией состояния и поражением терминальных ветвей кроны дуба черешчатого *Colpota quercinum* на статистически достоверном уровне  $R_s = 0,73$ . Несколько меньшая связь с категорией состояния деревьев дуба наблюдается с поражением кроны *Vuileminia comedens* –  $R_s = 0,63$ . Значимая корреляция категории состояния наблюдается с наличием плодовых тел *Laetiporus sulphureus* на стволах деревьев дуба –  $R_s = 0,36$ . Статистически значимая, но менее значительная корреляция наблюдается со стволовыми гнилями –  $R_s = 0,24$  и  $0,34$ . Также наблюдается значимая связь усыхания скелетных ветвей с категорией состояния деревьев дуба черешчатого –  $R_s = 0,28$ . Слабая, но значимая связь внешних патологий – сухобокости и толстых скелетных ветвей с категорией состояния деревьев дуба практически одинакова и составляет  $R_s = 0,20$  и  $0,21$  соответственно. С остальными учтенными поражениями корреляция или очень слабая, или отсутствует.

Взаимосвязь с поражениями и категорией состояния с диаметром на высоте 1,3 м у деревьев дуба имеет меньшие по величине корреляции. Категория состояния деревьев дуба значимо коррелирует с диаметром последних, и составляет  $R_s = 0,29$ . Для поражений ветвей некротрофом *Colpota quercinum* и ветвей вызывающим некрозы сапротрофом *Vuileminia comedens*, которые наиболее коррелируют с категорией состояния насаждения дуба, для рангов диаметров деревьев выявлены значимые, но более низкие коэффициенты корреляции –  $R_s = 0,31$  и  $0,26$  соответственно. Со стволовыми и комлевыми гнилями выявлена также значимая связь с показателями диаметра деревьев дуба –  $R_s = 0,23$  и  $0,22$  соответственно. Также показатель диаметра дерева коррелирует с наличием плодовых тел *Laetiporus sulphureus*,  $R_s = 0,25$ . Патологии стволов – крупные морозные трещины и

толстые скелетные ветви имеют одинаковый статистически значимый коэффициент корреляции  $R_s = 0,24$ , аналогичный со стволовыми гнилями, как и в случае с категорией состояния деревьев, причем наличие толстых скелетных ветвей имеет более высокий коэффициент корреляции с диаметрами деревьев, чем в случае с категорией состояния деревьев. Остальные поражения имеют слабую связь с показателем диаметра ствола дерева дуба.

Значимая корреляция категории состояния с рангом по диаметру ствола ( $R_s = 0,29$ ) объясняется конституциональным различием «эвтрофных» и «олиготрофных» экад дуба черешчатого и большей устойчивостью к стрессорным воздействиям эвтрофных экад.

Значимая корреляция некроза кроны с рангом по диаметру ствола ( $R_s = 0,31$ ) объясняется конституциональным различием «эвтрофных» и «олиготрофных» экад дуба черешчатого и большей устойчивостью к стрессорным воздействиям эвтрофных экад. Этим же объясняется выраженная связь поражения *Vuilleminia comedens* с рангом по диаметру ствола ( $R_s = 0,26$ ).

Высокозначимая корреляция некроза кроны (возбудитель – некротроф *Colpoma quercinum*) с категорией состояния ( $R_s = 0,73$ ) связана с тем, что некроз кроны выступает ключевым индикатором при оценке состояния дерева. Вторым индикатором некроза кроны является поражение крупных ветвей *Vuilleminia comedens* – корреляция между наличием некроза кроны и плодовых тел *V. comedens* составляет  $R_s = 0,83$ .

Значимая корреляция между наличием плодовых тел *Laetiporus sulphureus* и такими характеристиками как категория состояния, ранг по диаметру, некроз кроны –  $R_s = 0,36$ ;  $R_s = 0,25$ ;  $R_s = 0,24$  соответственно: в первом случае наличие базидиом свидетельствует о поражении ядра и является одним из индикаторов состояния дерева, во втором случае – о более выраженном иммунном ответе (гипертрофия и гиперплазия каллусной ткани, интенсивное застание раковых язв) крупных деревьев с более интенсивным флористическим трафиком, а в третьем случае прогрессирующий некроз кроны можно также рассматривать как индикатор снижения фитоиммунитета.

Сравнительный анализ категорий состояния деревьев дуба черешчатого в насаждениях, сформированных в разных условиях произрастания (рис. 3) показывает, что на всем протяжении субширотно-субмеридиональной трансекты «Тула – Выборг» деревья дуба черешчатого, образующие сомкнутые и слабо сомкнутые насаждения, характеризуются хорошим фитосанитарным состоянием.

Выявлено значимое различие по категориям состояния насаждений дуба черешчатого в парке Монрепо – за период между первым и вторым фитопатологическими обследованиями отмечается явное ухудшение категорий состояния древостоя, что, вероятно, связано с ухудшением почвенно-гидрологических условий местопроизрастания и, соответственно, снижением устойчивости деревьев дуба к поражениям.

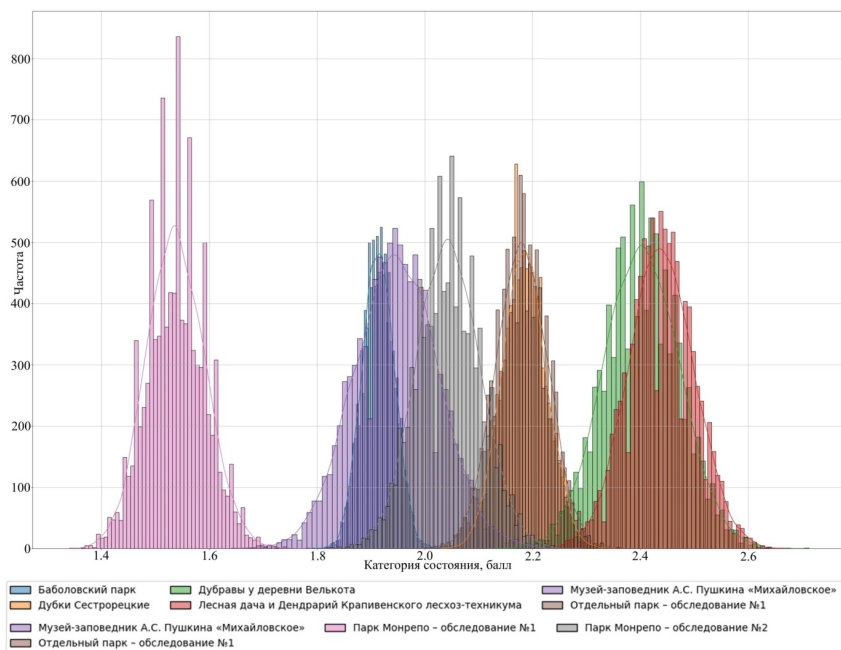


Рис. 3. Категории состояния деревьев дуба черешчатого в насаждениях, сформированных в разных условиях произрастания

Fig. 3. State categories of oak trees in stands formed under different growing conditions

Во всех реперных точках трансекты распределение деревьев дуба черешчатого по категориям состояния приближается к нормальному. Обращает на себя внимание, что различия между состоянием дуба черешчатого в его оптимум-ареале (неморальные поймы и плакоры на границе широколиственнолесной и подтаежной зон) и на северном пределе распространения не столь разительны. Это связано с тем, что дуб черешчатый является давним спутником человека, а антропогенное освоение таежной зоны сопровождается гидролесомелиорацией, сведением леса, раскислением почвы и наработкой дернины – все три направления антропогенных преобразований таежных ландшафтов способствовали продвижению дубовых насаждений на север – вплоть до подзоны средней тайги.

Сравнительный анализ рангов по диаметру деревьев дуба в насаждениях, сформированных в разных условиях произрастания (рис. 4), показывает наличие двух размерных групп – до 50 см в диаметре (с тремя частотными подгруппами) и более 50 см в диаметре (с двумя частотными подгруппами).

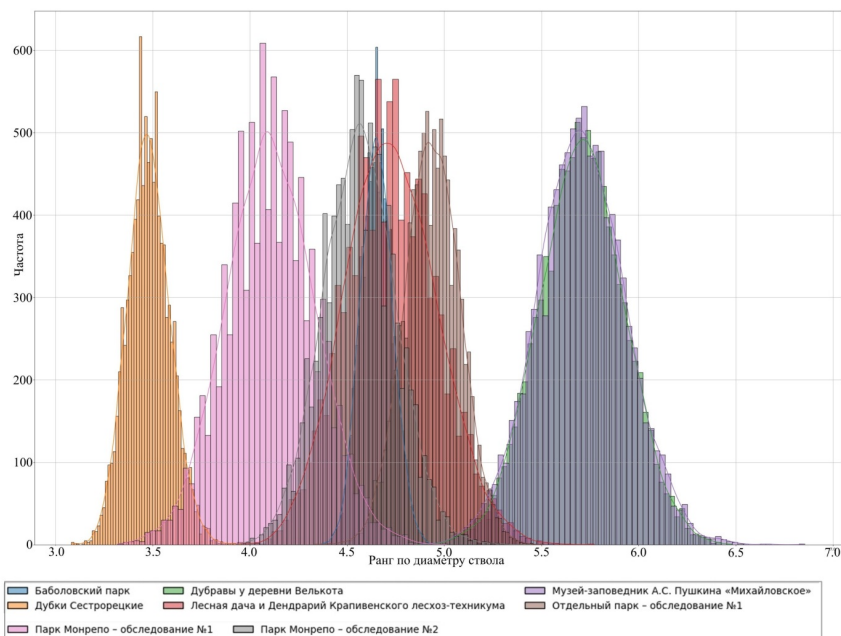


Рис. 4. Ранги по диаметру деревьев дуба черешчатого в насаждениях, сформированных в разных условиях произрастания

Fig. 4. Ranks by diameter of oak trees in stands formed under different growing conditions

Различие деревьев по диаметру связаны с почвенно-гидрологическими условиями занимаемых деревьями микросайтов сообщества.

Согласно Е.Н. Синской [1961], отклонение растения от «усредненного» габитуса по одному признаку, представляющему ответ на локальные условия гетерогенной среды, именуется экадой. Крупномерные деревья дуба черешчатого, связанные с более богатой и дренированной почвой, можно назвать «эвтрофной» экадой, в то время как мелкомерные деревья, связанные изначально с более бедной и обводненной почвой – «олиготрофной» экадой.

Как показали наши исследования, «эвтрофные» экады дуба черешчатого более устойчивы к поражению стволов и кроны и наиболее перспективны в парковом строительстве.

Проведенные исследования фитопатологического состояния деревьев дуба черешчатого в насаждениях, сформированных в различных условиях произрастания, показали, что в зависимости от размерной категории деревьев дуба наблюдается, в большинстве случаев, явное статистически значимое

различие как по категории состояния, так и по основным поражениям, с которыми коррелирует диаметр дерева (рис. 3, 4). Для определения статистически значимого вклада поражений в жизненное состояние деревьев дуба возникает необходимость разработки уравнений зависимости, моделирование уравнений регрессии для определения влияния фитопатогенных факторов на дуб черешчатый в ценооптимуме и на северной границе его распространения.

Для моделирования зависимости категории состояния от комплекса патологий нами было разработано регрессионное уравнение вида:

$$Y = X_1 + \dots X_n + \text{const},$$

где Y – балл состояния; X – показатели поражения деревьев, коэффициенты для уравнения приведены ниже:

«Категория состояния, балл» = +0,885 + 0,437672 \* «Пораженность кроны *Colpota quercinum*, балл» + 0,044722 \* «Пораженность кроны *Vuilleminia comedens*, балл» – 0,059085 \* «Пораженность листвы *Erysiphe alphitoides* (Мучнистая роса), балл» + 0,259560 \* «Стволовая гниль» + 0,119225 \* «Комлевая гниль» + 0,438082 \* «Корневая гниль» + 0,275299 \* «Базидиомы *Laetiporus sulphureus* (Серно-желтый трутовик)» + 0,275686 \* «Базидиомы *Fomitiporia robusta* (Ложный дубовый трутовик)» + 0,411373 \* «Базидиомы *Daedalea quercina* (Дубовая губка)» + 0,325673 \* «Ступенчатый рак (возб. *Neonectria ditissima* (= *Nectria galligena*))» + 0,387658 \* «Поперечный надломовидный рак (возб. *Pseudomonas quercina*)» + 0,529913 \* «Базидиомы *Inonotus dryophilus* (Трутовик дубовый (дуболюбивый))» + 0,332368 \* «Базидиомы *Armillaria lutea* (Опенок желтый)» + 0,033338 \* «Крупные морозные трещины» + 0,263404 \* «Сухобокость» – 0,186967 \* «Прорость» + 0,342125 \* «Обдир, ошмыг» – 0,025774 \* «Наклон (кривизна) ствола» + 0,053927 \* «Толстые скелетные ветви» – 0,309575 \* «Облом вершины» + 0,225180 \* «Облом скелетных ветвей» + 0,744246 \* «Усыхание вершины» + 0,349285 \* «Усыхание скелетных ветвей» – 0,093958 \* «Изреженная (очень маленькая) крона» – 0,283420 \* «Многочисленные водяные побеги» – 0,665445 \* «Наплывы, каповые наросты»

Аналогично было смоделировано уравнение зависимости для диаметра на высоте 1,3 м, где коэффициенты для уравнения:

«Ранг по диаметру ствола» = +3,155 + 0,441307 \* «Пораженность кроны *Colpota quercinum*, балл» – 0,016885 \* «Пораженность кроны *Vuilleminia comedens*, балл» + 0,566713 \* «Пораженность листвы *Erysiphe alphitoides* (Мучнистая роса), балл» + 0,530271 \* «Стволовая гниль» + 0,725010 \* «Комлевая гниль» + 0,744334 \* «Корневая гниль» + 0,456024 \* «Базидиомы *Laetiporus sulphureus* (Серно-желтый трутовик)» – 0,309513 \* «Базидиомы *Fomitiporia robusta* (Ложный дубовый трутовик)» + 1,765528 \* «Базидиомы *Daedalea quercina* (Дубовая губка)» – 1,869770 \* «Ступенчатый рак (возб.

*Neonectria ditissima* (= *Nectria galligena*)» +0,617657 \* «Поперечный надломовидный рак (возб. *Pseudomonas quercina*)» +0,826778 \* «Базидиомы *Inonotus dryophilus* (Трутовик дубовый (дуболюбивый))» +0,483667 \* «Базидиомы *Armillaria lutea* (Опенок желтый))» +0,822550 \* «Крупные морозные трещины» +1,238852 \* «Сухобокость» +0,565695 \* «Прорость» –1,412932 \* «Обдир, ошмыг» +0,271431 \* «Наклон (кривизна) ствола» +1,043601 \* «Толстые скелетные ветви» +0,839505 \* «Облом вершины» +0,963885 \* «Облом скелетных ветвей» +0,189265 \* «Усыхание вершины» +0,019306 \* «Усыхание скелетных ветвей» –0,410440 \* «Изреженная (очень маленькая) крона» +1,622246 \* «Многочисленные водяные побеги» –1,469534 \* «Наплывы, каповые наросты»

Метрики полученных уравнений приведены в табл. 10.

Таблица 10

### Метрики уравнений линейной регрессии

#### Metrics of linear regression equations

Метрика	Уравнение категории состояния, балл	Уравнение ранга по диаметру ствола
Зависимая переменная / Dependent variable		
Коэффициент детерминации / Coefficient of determination / $R^2$	0,686	0,152
Средняя ошибка смещения / Mean Bias Error / (MBE)	0,050	–0,037
Средняя абсолютная ошибка / Mean Absolute Error / (MAE)	0,366	1,736
Среднеквадратическая ошибка / Mean Squared Error / (MSE)	0,217	4,714
Корень средней квадратичной ошибки / Root Mean Squared Error / (RMSE)	0,466	2,171
Средняя абсолютная процентная ошибка / Mean Absolute Percentage Error / (MAPE)	0,204	0,518
Симметричная средняя абсолютная процентная ошибка / Symmetric Mean Absolute Percentage Error / (SMAPE)	18,643	39,108
Средняя логарифмическая ошибка / Mean Squared Log Error / (MSLE)	0,023	0,160
Среднеквадратичная логарифмическая ошибка / Root mean squared log error / (RMSLE)	0,151	0,400
Константа уравнения линейной регрессии / Constant	0,890	3,155

**Выводы:**

1. Вне процесса развития эпифитотий и в равновесии с эколого-ценотической обстановкой побеговая система дуба черешчатого взаимодействует с пулом ксилосапротрофных грибов, что приводит к изменениям в ее архитектуре.

2. Ключевыми видами, определяющими облик побеговой системы поздних генеративных и субсильных особей дуба черешчатого являются *Colpota quercinum* и *Vuilleminia comedens*, способствующие изреживанию кроны, *Daedalea quercina*, *Laetiporus sulphureus* и *Fomitiporia robusta*, вызывающие стволовые гнили и в благоприятных для дерева условиях локализуемые в ядровой области, а также *Armillaria lutea*, поражающая преимущественно комлевую область дерева.

3. Адаптивный потенциал деревьев дуба черешчатого определяется локальными почвенно-гидрологическими условиями. Выделяются «эвтрофная» и «олиготрофная» экады дуба черешчатого, характеризующиеся диаметром ствола (на выс. 1,3 м) более и менее 50 см соответственно. Проведенные исследования подтверждают большую устойчивость деревьев «эвтрофной экады» к прогрессирующему отмиранию кроны и ухудшению состояния: высокая корреляция некроза кроны с рангом по диаметру ствола объясняется конституциональным различием «эвтрофных» и «олиготрофных» экад дуба черешчатого и большей устойчивостью к стрессорным воздействиям эвтрофных экад.

4. На лесостепном/широколиственнолесном участке трансекты деревьев дуба слабо дифференцированы на две экады и в целом угнетены липовыми древостоями.

5. На подтаежном участке трансекты наблюдается пестрая картина дифференциации деревьев дуба по фитопатологическому состоянию, причем «эвтрофные» экады демонстрируют низкий балл фитосанитарного состояния.

6. На южнотаежном участке трансекты непрерывный поток поколений дуба черешчатого связан с антропогенно-преобразованной растительностью. Основная задача паркового строительства севернее естественного ареала *Quercus robur* – поддержание дренажной системы и отбор «эвтрофных» экад дуба черешчатого.

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

**Библиографический список**

Баврина А.П. Современные правила применения параметрических и непараметрических критериев в статистическом анализе медико-биологических данных // Медицинский альманах. 2021. № 1 (66). С. 64–73.

Боровиков В.П. STATISTICA: искусство анализа данных на компьютере. СПб.: Питер, 2001. 650 с.

Звягинцев В.Б., Блинцов А.И., Козел А.В., Кухта В.Н., Сазонов А.А., Середич М.О., Хвасько А.В. Защита леса. Минск: БГТУ, 2019. 164 с.

Катаев О.А., Тальман П.Н., Методы лесозащитного обследования. Л.: ЛТА, 1964. 120 с.

Кузьмичев Е.П., Соколова Э.С., Мозолевская Е.Г. Болезни древесных растений. Справочник. Т. 1. М.: ВНИИЛМ, 2004. 120 с.

Любичев А.А. Дисперсионный анализ в биологии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 200 с.

Мастицкий С.Э., Шитиков В.К. Статистический анализ и визуализация данных с помощью R. Электронная книга 2014. URL: <http://r-analytics.blogspot.com>

Мозолевская Е.Г., Катаев О.А., Семенова И.Г. Методы лесопатологического обследования очагов стволовых вредителей и болезней леса. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 152 с.

Национальный атлас России / сост. и подгот. к изданию ПКО «Картография» / под общ. рук. М-ва транспорта Российской Федерации и Роскартографии; отв. ред. Г.Ф. Кравченко; предс. редколл. А.В. Бородко. Т. 2: Природа. Экология. Калининград, 2007. С. 370–371.

Недолужко В.А. Конспект дендрофлоры российского Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 1995. 208 с.

Селочник Н.Н., Каплина Н.Ф. Оценка состояния дубрав с учетом развития крон деревьев в неблагоприятных условиях: антропогенных (Московский регион) и климатических (лесостепь) // Вестник Моск. гос. ун-та леса. Лесн. вестник. 2011. № 4 (80). С. 103–108.

Синская Е.Н. Учение о виде и таксонах (конспект лекций). Л.: ВИР, 1961. 46 с.

Унгуряну Т.Н., Гржибовский А.М. Сравнение трех и более независимых групп с использованием непараметрического критерия Краскела-Уоллиса в программе STATA // Экология человека. 2014. № 6. С. 55–58.

Фирсов Г.А., Ярмишко В.Т., Змитрович И.В., Бондарцева М.А., Волобуев С.В., Дудка В.А. Морозобоины и патогенные ксилотрофные грибы в парке-дендрарии Ботанического сада Петра Великого. СПб.: Ладога, 2021. 304 с.

Фурменкова Е.С., Кочергина М.В. Методы диагностики состояния древесных растений по внешним патологическим признакам // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии имени В.Р. Филиппова. 2021. № 4(65). С. 164–171.

Шишлянникова А.Б., Змитрович И.В., Зарудная Г.И., Перелыгин В.В., Жариков М.В. Результаты микологического обследования побеговой системы «Ириновского дуба» (Ленинградская область, Россия) // Микология и фитопатология. 2023. Т. 57. № 6. С. 456–461. DOI: 10.31857/S0026364823060120

Chang Y.H. Biostatistics 101: Data presentation // Singapore Medical Journal. 2003. No. 6. P. 280–285.

Grimshaw J., Bayton R. New trees: Recent introductions to cultivation // The Board of Trustees of the Royal Botanic Gardens, Kew and The International Dendrology Society, 2009. 976 p.



Harris C.R., Millman K.J., van der Walt S.J. et al. Array programming with NumPy // *Nature*. 2020. 585. P. 357–362. DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2.

Hunter J.D. Matplotlib: A 2D Graphics Environment // *Computing in Science & Engineering*. 2007. Vol. 9, no. 3. P. 90–95. DOI: 10.1109/MCSE.2007.55

McKinney W. Data structures for statistical computing in Python // *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*. 2010. Vol. 445. P. 56–61. DOI: 10.25080/Majora-92bf1922-00a

Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O. et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python, *Journal of Machine Learning Research*. 2011. Vol. 12. P. 2825–2830.

Virtanen P., Gommers R., Oliphant T.E., Haberland M. et al. SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python // *Nature Methods*. 2020. No. 17(3). P. 261–272. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2

Waskom M.L. Seaborn: statistical data visualization // *Journal of Open Source Software*. 2021. 6(60). 3021. DOI: 10.21105/joss.03021.

## References

Bavrina A.P. Modern rules for the use of parametric and nonparametric tools in the statistical analysis of biomedical data. *Medicinskij al'manah*, 2021, no. 1 (66), pp. 64–73. (In Russ.)

Borovikov V.P. STATISTICA: the art of analysing data on a computer. SPb.: Piter, 2001. 650 p. (In Russ.)

Chang Y.H. Biostatistics 101: Data presentation. *Singapore Medical Journal*, 2003, no. 6, pp. 280–285. (In Russ.)

Firsov G.A., Yarmishko V.T., Zmitrovich I.V., Bondarceva M.A., Volobuev S.V., Dudka V.A. Morozoboiny i patogennye ksilotrofnye griby v parke-dendrarii Botanicheskogo sada Petra Velikogo. SPb.: Ladoga, 2021. 304 p. (In Russ.)

Furmenkova E.S., Kochergina M.V. Metody diagnostiki sostoyaniya drevesnyh rastenij po vneshnim patologicheskim priznakam. *Vestnik Buryatskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii imeni V.R. Filippova*, 2021, no. 4(65), pp. 164–171. (In Russ.)

Grimshaw J., Bayton R. New trees: Recent introductions to cultivation. *The Board of Trustees of the Royal Botanic Gardens, Kew and The International Dendrology Society*, 2009. 976 p.

Harris C.R., Millman K.J., van der Walt S.J. et al. Array programming with NumPy. *Nature*, 2020, 585, pp. 357–362. DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2.

Hunter J.D. Matplotlib: A 2D Graphics Environment. *Computing in Science & Engineering*, 2007, vol. 9, no. 3, pp. 90–95. DOI: 10.1109/MCSE.2007.55

Kataev O.A., Tal'man P.N. Metody lesoentomologicheskogo obsledovaniya. L.: LTA, 1964. 120 p. (In Russ.)

Kuz'michev E.P., Sokolova E.S., Mozolevskaya E.G. Bolezni drevesnyh rastenij. Spravochnik. T. 1. M.: VNIILM, 2004. 120 p. (In Russ.)

Lyubishchev A.A. Dispersionnyj analiz v biologii. M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 1986. 200 p. (In Russ.)

Mastickij S.E., Shitikov V.K. Statisticheskij analiz i vizualizaciya dannyh s pomoshch'yu R. Elektronnaya kniga 2014. URL: <http://r-analytics.blogspot.com>

McKinney W. Data structures for statistical computing in Python. *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, 2010, vol. 445, pp. 56–61. DOI: 10.25080/Majora-92bfl922-00a

Mozolevskaya E.G., Kataev O.A., Semenkova I.G. Metody lesopatologicheskogo obsledovaniya ochagov stvolovyh vreditel'ej i boleznej lesa. M.: Lesn. prom-st', 1984. 152 p. (In Russ.)

Nacional'nyj atlas Rossii / sost. i podgot. k izdaniyu PKO «Kartografiya» pod obshch. ruk. M-va transporta Rossijskoj Federacii i Roskartografii; otv. red. G.F. Kravchenko; preds. redkoll. A.V. Borodko. Vol. 2: Priroda. Ekologiya. Kaliningrad, 2007, pp. 370–371. (In Russ.)

Nedoluzhko V.A. Konspekt dendroflory rossijskogo Dal'nego Vostoka. Vladivostok: Dal'nauka, 1995. 208 p. (In Russ.)

Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O. et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python, *Journal of Machine Learning Research*, 2011, vol. 12, pp. 2825–2830.

Selochnik N.N., Kaplina N.F. Ocenka sostoyaniya dubrav s uchetom razvitiya kron derev'ev v neblagopriyatnyh usloviyah: antropogennyh (Moskovskij region) i klimaticheskikh (lesostep'). *Vestnik Mosk. gos. un-ta lesa. Lesn. vestnik*, 2011, no. 4 (80), pp. 103–108. (In Russ.)

Shishlyannikova A.B., Zmitrovich I.V., Zarudnaya G.I., Pereygin V.V., Zharikov M.V. Results of the mycological investigation of the shoot system of «Irinovsky oak» tree (Leningrad Region, Russia). *Mycology and phytopathology*, 2023, vol. 57, no. 6, pp. 456–461. DOI: 10.31857/S0026364823060120. (In Russ.)

Sinskaya E.N. Uchenie o vide i taksonah (konspekt lekciy). L.: VIR, 1961. 46 p. (In Russ.)

Virtanen P., Gommers R., Oliphant T.E., Haberland M. et al. SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. *Nature Methods*, 2020, no. 17(3), pp. 261–272. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2

Unguryanu T.N., Grzhibovskij A.M. Sravnenie trekh i bolee nezavisimyh grupp s ispol'zovaniem neparametricheskogo kriteriya Kraskela-Uollisa v programme STATA. *Ekologiya cheloveka*, 2014, no. 6, pp. 55–58. (In Russ.)

Waskom M.L. Seaborn: statistical data visualization. *Journal of Open Source Software*, 2021, 6(60), 3021. DOI: 10.21105/joss.03021.

Zvyaginets V.B., Blincov A.I., Kozel A.V., Kuhta V.N., Sazonov A.A., Seredich M.O., Hvas'ko A.V. Zashchita lesa. Minsk: BG TU, 2019. 164 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 01.08.2024

---

**Шишлянникова А.Б., Данилов Д.А., Змитрович И.В., Бачериков И.В.** Фитопатологическая характеристика дуба черешчатого в различных условиях произрастания // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 250. С. 116–143. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.116-143

Цель настоящей работы – оценка влияния некротрофных и сапротрофных видов грибов на жизненное состояние деревьев дуба черешчатого в оптимум-ареале дуба черешчатого и севернее его естественного распространения. Для достижения поставленной цели нами был проведен комплексный анализ насаждений, сформированных в различных условиях произрастания дуба черешчатого. Объекты нашего исследования – комплекс ксилосапротрофных грибов, ассоциированных с побеговой системой дуба черешчатого в насаждениях дуба черешчатого в лесных и парковых экосистемах вдоль субширотной-субмеридиональной трансекты «Тула – Выборг», отражающей движение из зоны оптимум-ареала этой породы к его периферии. Выявлен комплекс ключевых видов грибов-килосапротрофов, определяющий облик побеговой системы поздних генеративных и субсильных особей дуба черешчатого: *Colpota quercinum*, *Vuilleminia comedens* (способствуют изреживанию кроны), *Daedalea quercina*, *Laetiporus sulphureus*, *Fomitiporia robusta* (вызывают стволовые гнили), *Armillaria lutea* (поражает преимущественно комлевую область дерева). Показано, что адаптивный потенциал деревьев дуба черешчатого определяется локальными почвенно-гидрологическими условиями. Выделяются «эвтрофная» и «олиготрофная» экады, характеризующиеся диаметром ствола (на выс. 1,3 м) более и менее 50 см соответственно. Проведенные исследования подтверждают большую устойчивость деревьев «эвтрофной» экады к прогрессирующему отмиранию кроны и ухудшению состояния: высокая корреляция некроза кроны с рангом по диаметру ствола объясняется конституциональным различием «эвтрофных» и «олиготрофных» экад дуба черешчатого и большей устойчивостью к стрессорным воздействиям эвтрофных экад. На лесостепном/широколиственнолесном участке трансекты деревья дуба слабо дифференцированы на две экады и в целом угнетены липовыми древостоями. На подтаежном участке трансекты наблюдается пестрая картина дифференциации деревьев дуба по фитопатологическому состоянию, причем «эвтрофные» экады демонстрируют низкий балл фитосанитарного состояния. На южнотаежном участке трансекты непрерывный поток поколений дуба черешчатого связан с антропогенно-преобразованной растительностью. Основная задача паркового строительства севернее естественного ареала *Quercus robur* – поддержание дренажной системы и отбор «эвтрофных» экад дуба черешчатого.

Ключевые слова: дуб черешчатый, *Quercus robur*, некротрофные грибы, сапротрофные грибы, линейная регрессия.

**Shishlyannikova A.B., Danilov D.A., Zmitrovich I.V., Bacherikov I.V.** Phytopathological characteristics of *Quercus robur* in different growing conditions. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 250, pp. 116–143 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.116-143

The purpose of the present paper is to assess an influence of necrotrophic and saprotrophic fungi species on the vital state of *Quercus robur* trees in its optimum range

and north of natural distribution. To achieve this purpose, we have carried out a comprehensive analysis of stands formed in various growing conditions of *Q. robur*. Another object of our study was a complex of xylosaprotrophic fungi associated with the shoot system of *Q. robur* in forest and park ecosystems along the sublatitudinal-submeridional transect «Tula – Vyborg», reflecting the movement from the zone of the optimum range of this species to its periphery. A complex of key species of xylosaprotrophic fungi that determine the appearance of the shoot system of late generative and subsenile individuals of *Q. robur* has been identified: *Colpoma quercinum*, *Vuilleminia comedens* (promote a crown thinning), *Daedalea quercina*, *Laetiporus sulphureus*, *Fomitiporia robusta* (cause a trunk rot), *Armillaria lutea* (affects mainly the butt area of the tree). It has been shown that the adaptive potential of *Quercus robur* trees is determined by local soil and hydrological conditions. «Eutrophic» and «oligotrophic» ecades are distinguished, characterized by a trunk diameter (at a height of 1.3 m) of more and less than 50 cm, respectively. The studies carried out confirm the high resistance of trees of the «eutrophic» ecades to progressive crown dying and deterioration. The high correlation of crown necrosis with the rank by trunk diameter is explained by the constitutional difference between the «eutrophic» and «oligotrophic» ecades of *Q. robur* and the high resistance of eutrophic ecadas to stress effects. In the forest-steppe/broadleaf forest section of the transect, oak trees are weakly differentiated into two ecades and are generally suppressed by linden stands. In the subtaiga section, a motley picture of differentiation of oak trees by phytopathological condition is observed, whereas the «eutrophic» ecadas demonstrate a low phytosanitary condition score. In the southern taiga section, the continuous flow of generations of *Q. robur* is associated with anthropogenically transformed vegetation. The main purpose of park building north of the natural range of *Q. robur* is to maintain the drainage system and select «eutrophic» oak stands.

Keywords: English oak, *Quercus robur*, necrotrophic fungi, saprotrophic fungi, linear regression.

---

**ШИШЛЯННИКОВА Арина Борисовна** – заведующий отделением Колледжа технологий лесного комплекса и садово-паркового хозяйства, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова. SPIN-код: 2962-9507

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

**SHISHLYANNIKOVA Arina B.** – Head of Department of College of Forestry and Gardening Technologies, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 2962-9507

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

**ДАНИЛОВ Дмитрий Александрович** – заведующий кафедрой почвоведения Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, доктор сельскохозяйственных наук, доцент. SPIN-код: 5826-3852. ResearcherID: S-7007-2019. ScopusID: 57205402682. ORCID: 0000-0002-7504-5743.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: stown200@mail.ru

Главный научный сотрудник Ленинградского НИИСХ «Белогорка» – филиала ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха».

188338, ул. Институтская, д. 1, д. Белогорка, Гатчинский район, Ленинградская область, Россия.

**DANILOV Dmitry A.** – DSc (Agricultural), chair of Soil science department of the St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 5826-3852. ResearcherID: S-7007-2019. ScopusID: 57205402682. ORCID: 0000-0002-7504-5743

194021. Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: stown200@mail.ru

Chief Scientist in Russian Potato Research Centre.

188338. Institutsкая str. 1. Belogorka village. Gatchina district. Leningrad region. Russia.

**ЗМИТРОВИЧ Иван Викторович** – ведущий научный сотрудник Ботанического института имени В.Л. Комарова Российской академии наук, доктор биологических наук. SPIN-код: 4155-3190. ResearcherID: I-1523-2013. ScopusID: 56521442400. ORCID: 0000-0002-3927-2527

197022, ул. Профессора Попова, д. 2, лит. В, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: iv\_zmitrovich@mail.ru

**ZMITROVICH Ivan V.** – DSc (Biology), leading researcher in Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences. SPIN-code: 4155-3190. ResearcherID: I-1523-2013. ScopusID: 56521442400. ORCID: 0000-0002-3927-2527

197376. Professora Popova str. 2. St. Petersburg. Russia. E-mail: iv\_zmitrovich@mail.ru

**БАЧЕРИКОВ Иван Викторович** – математик-аналитик, ООО «Умные цифровые решения», кандидат технических наук. SPIN-код: 7210-3600. ResearcherID: K-6350-2017. ScopusID: 57217860297. ORCID: 0000-0002-0531-1604.

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

**BACHERIKOV Ivan V.** – PhD (Technical), mathematician, «Smart Digital Solutions» LLC. SPIN-code: 7210-3600. ResearcherID: K-6350-2017. ScopusID: 57217860297. ORCID: 0000-0002-0531-1604.

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

**А.И. Мельник, С.А. Чанчикова, А.А. Вайс, В.Н. Немич,  
П.В. Михайлов, Е.Ф. Лузина, А.В. Мантулина**

**УГЛЕРОДНЫЙ ПУЛ ДРЕВЕСНОГО ОПАДА СОСНЯКОВ  
ПОДТАЕЖНО-ЛЕСОСТЕПНОГО РАЙОНА СРЕДНЕЙ СИБИРИ  
ЗА ВЕГЕТАЦИОННЫЙ ПЕРИОД 2022 ГОДА**

*Введение.* Опад является важным компонентом возврата питательных веществ от растений к лесной подстилке и минеральной почве. Он обеспечивает поверхность земли растительными остатками (хвоей, листвой, ветками, шишками, корой и т. д.), которые постепенно разлагаются при участии сообществ редуцентов. В ходе этого процесса химические элементы становятся доступными для поглощения растениями, что имеет решающее значение для продуктивности лесных экосистем [Карпачевский, 1981; Jasińska, Sewerniak et al., 2020; Иванова, 2021; Солодовников, 2019].

Показатели массы и структуры опада характеризуются годовой динамикой, связанной с цикличностью физиологических процессов, обычно обусловленной сезонностью (почвенно-климатические условия, погодные условия текущего времени и предыдущих лет, степень воздействия энтомофитов, порода, возраст древостоя и т. д.). Однако на наблюдаемые закономерности могут влиять случайные события, например, экстремальные погодные явления или лесные пожары высокой интенсивности [Jasińska, Sewerniak et al., 2020; Иванова, 2021; Кузнецов, 2010; Baietto, Hernández et al., 2021].

Для всех лесопокрываемых площадей типично поступление опада на протяжении всей фазы роста и развития, но в лесах с паузой в метаболизме приток опада резко увеличивается в начале и конце вегетационного периода [Карпачевский, 1981; Jasińska, Sewerniak et al., 2020; Иванова, 2021; Абрамова, Брянин, 2018].

Процесс разложения опада, часто начинающийся с отдельного дерева, фактически представляет собой начальный этап круговорота. Карпачевский Л.О., в связи с этим, разделяет растительные остатки в зависимости от их способности к разложению на две части: активную и неактивную. К активной части относятся листья (хвоя), почечные чешуи, соцветия, пыльца и семена, а к неактивной – ветви, шишки, кора, лишай-

ники. Данная классификация является самой распространенной на сегодняшний день.

Другие исследователи выделяют иные структурные элементы в зависимости от задач исследования. Так, зарубежными учеными определялись лишь две части: хвоя и смешанная фракция, состоящая из всех остальных собранных компонентов [Иванова, 2021]. При отборе материала с поверхности земли могли идентифицироваться такие фракции, как опад карликовых кустарников, моховой опад, травы [Решетникова, 2011].

Показатели массы опада изучали многие исследователи, в том числе из Польши [Jasińska, Sewerniak et al., 2020; Węgiel, Polowy, 2020]; Уругвая [Baietto, Hernández et al., 2021]; Северо-Западной части РФ [Кузнецов, 2010, 2011; Осипов, 2017; Лянгузова и др., 2020]; левобережной части реки Енисей [Решетникова, 2011] и др.

Одним из свойств растительных организмов является способность поглощать органический углерод в процессе фотосинтеза. В связи с этим актуальны работы по оценке баланса углерода [Замолодчиков и др., 2011; Малышева и др., 2017; Назаренко, Красноярова, 2018; Федоров, 2017]. Однако остается открытым вопрос уточнения данных по количеству депонированного углерода разными компонентами леса (включая подземные, отпад и опад).

Элементом аккумуляирования углерода является процесс разложения опада надземной фитомассы [Абрамова, Брянин, 2018; Кузнецова, 2021]. Основную долю опада в сосновых насаждениях составляет его древесная часть (до 87%) [Стеценко, Сафонов, 2010].

На основании анализа состояния проблемы и необходимости изучения процесса опада на региональном уровне сформулирована цель исследования. Это оценка динамики поступления фитомассы и углеродного пула надземного опада в сосновых насаждениях на территории подтаежно-лесостепного района Средней Сибири.

*Методика исследования.* Объектом изучения являлся опад модальных насаждений сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Исследования проведены на территории учебно-опытного лесхоза СибГУ в Караульном участковом лесничестве, расположенного в пригородной зоне города Красноярска (рис. 1). Территория лесничества относится к Средне-Сибирскому подтаежно-лесостепному району.

Полевые и лабораторные исследования осуществлялись с начала мая по конец октября 2022 года. Временной отрезок с мая по ноябрь характеризуется преимущественно теплой погодой, а также формированием большей части годового опада, в сравнении с зимне-весенним периодом.

Изучение лесных сообществ и их компонентов начинаются с рекогносцировочного обследования территории для получения общих сведений о характере растительного покрова территории [Жукова и др., 2008]. После предварительной оценки насаждений на основе модальности породного состава древостоев и лесорастительных условий, авторами заложены четыре пробные площади (ПП), где впоследствии проводилось исследование древесного опада. В соответствии с этой задачей на каждой ПП осуществлялась равномерная установка стационарных опадоуловителей (ОУ) [Базилевич и др., 1978; Лиханова, 2014; Родин и др., 1967]. В зависимости от размера пробной площади количество ОУ менялось от 8 до 10 штук.

Сбор опада осуществлялся в разные временные интервалы на основании естественных стадий функционирования фитоценозов [Земсков, 2021].

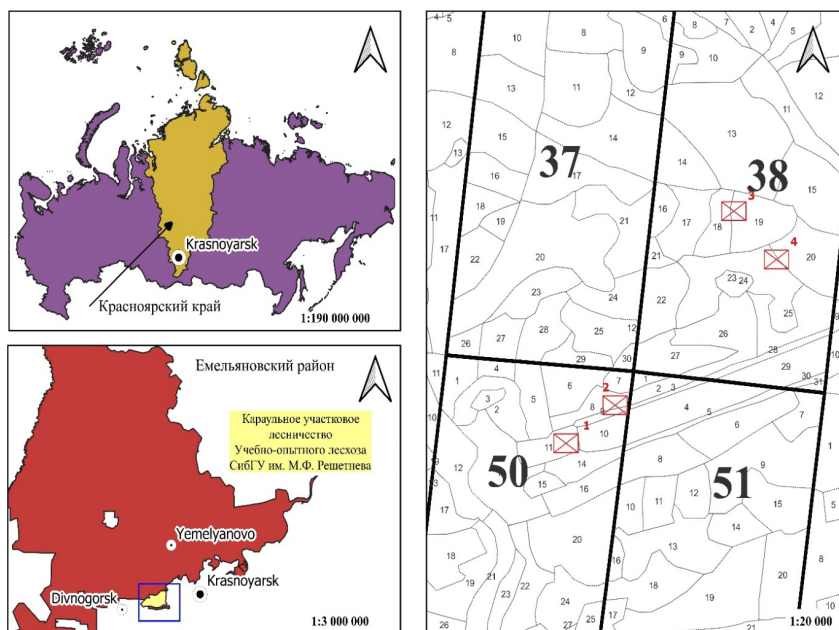


Рис. 1. Схема расположения исследуемых пробных площадок на территории Учебно-опытного лесхоза (1 ПП – квартал 50, выдел 11; 2 ПП – 50/8; 3 ПП – 38/18; 4 ПП – 38/25)

Fig. 1. Diagram defining the location of research test plots on the territory of Educational and Experimental Forestry (1 research plot – 50th forest compartment, 11th forest unit; 2 RP – 50/8; 3 RP – 38/18; 4 RP – 38/25)



Образцы, достигшие воздушно-сухого состояния, делились на группы. Условно выделялись две составляющие опада: неактивная (ветви, шишки) и активная (все остальное). После разбора массы проводилось взвешивание, сушка в специализированном шкафу при температуре 105–110 °С до достижения абсолютно сухого веса, также рассчитывался запас опада на единицу площади (в г/м<sup>2</sup>, кг/га).

После оценки биомассы древесного опада вычислены запасы депонированного углерода с помощью конверсионного коэффициента, предложенного Ф.И. Земсковым – 0,47 [Земсков, 2021].

Статистическая обработка материала выполнялась в специализированном пакете программы «STATISTICA» и пакете анализа данных электронной таблицы «Excel». С помощью статистического анализа получены оценочные статистики при уровне доверительной вероятности 0,954.

*Результаты исследования.* На всех пробных площадях проведено описание насаждений и определены следующие показатели: относительная полнота, средний возраст, диаметр и высота древостоя, тип леса. Данные глазомерно-измерительной таксации представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Таксационные показатели сосновых насаждений**

**Silvicultural and forest inventory of the studied pine stands**

ПП	Состав	A <sub>ср</sub> , лет	D <sub>ср</sub> , см	H <sub>ср</sub> , м	Бонитет	Тип леса	P <sub>отн</sub>	M, м <sup>3</sup> /га
1	9С1Б	95	29,3	25,3	II	С разнотравно-зеленомошный	1,0	412
2	7С3Б	90	27,7	25,0	II	С осочково-разнотравный	0,8	292
3	10С	75	23,0	27,0	I	С разнотравно-зеленомошный	0,5	219
4	10С	97	30,0	29,0	I	С осочково-разнотравный	0,6	252

*Примечание:* A<sub>ср</sub> – средний возраст, D<sub>ср</sub> – средний диаметр, H<sub>ср</sub> – средняя высота, P<sub>отн</sub> – относительная полнота, M – стволовой запас, С – сосняк.

Пробные площади отражали модальные условия по составу, полноте, бонитету, возрасту и типу леса для исходной территории. Состав преимущественно чистые древостои с небольшой долей берёзы до 3 единиц. Высота насаждений варьировала от 25 до 29 м. Группа возраста – приспевающие и спелые сосняки (75–97 лет). Класс бонитета I–II, что указывает на

благоприятные условия местопроизрастания. Полнота менялась от 0,5 до 1,0. Типологическая структура соответствует наиболее представленным типам леса исследуемой территории: сосняки осочково-разнотравного и разнотравно-зеленомошного типов леса.

Результаты выполненного деления опада на фракции и их составляющие компоненты представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Абсолютно сухая масса (числитель) – г/м<sup>2</sup> и доля участия компонентов фракций (знаменатель) в опаде сосновых насаждений – %**

**Absolutely dry mass (numerator) – g · m<sup>-2</sup> and the share of fraction components (denominator) in the litter of pine stands – %**

Компоненты фракции	Пробная площадь			
	1	2	3	4
Листья лиственных пород	<u>1,2±0,25</u> 0,4	<u>17,3±4,12</u> 6,2	<u>17,5±4,01</u> 6,4	<u>8,4±2,58</u> 4,2
Хвоя сосны	<u>185,7±36,09</u> 54,4	<u>112,8±20,00</u> 40,3	<u>165,8±36,20</u> 61,1	<u>115,5±23,97</u> 57,2
Трава	<u>0,9±0,17</u> 0,3	<u>2,3±0,32</u> 0,8	<u>2,8±0,45</u> 1,0	<u>2,4±0,45</u> 1,2
Семена сосны	<u>0,7±0,14</u> 0,2	<u>0,7±0,15</u> 0,2	<u>0,2±0,04</u> 0,1	<u>0,1±0,03</u> 0,1
Кора древесных пород	<u>34,3±3,98</u> 10,0	<u>19,6±2,58</u> 7,0	<u>27,3±3,59</u> 10,0	<u>20,9±2,40</u> 10,3
Прочее (неидентифиц. остатки)	<u>28,5±4,35</u> 8,3	<u>35,5±4,70</u> 12,7	<u>20,0±2,68</u> 7,4	<u>23,3±3,37</u> 11,6
Итого по актив. фракции	<u>251,3±37,51</u> 73,6	<u>188,2±23,07</u> 67,2	<u>233,6±42,48</u> 86,0	<u>170,6±24,45</u> 84,6
Ветви	<u>61,7±16,90</u> 18,1	<u>30,9±5,42</u> 11,0	<u>23,3±4,95</u> 8,6	<u>11,1±2,63</u> 5,5
Шишки	<u>28,3±2,56</u> 8,3	<u>60,9±7,78</u> 21,8	<u>14,6±2,18</u> 5,4	<u>20,0±3,30</u> 9,9
Итого по неактив. фракции	<u>90,0±17,84</u> 26,4	<u>91,8±9,19</u> 32,8	<u>37,9±6,42</u> 14,0	<u>31,1±2,96</u> 15,4
Общий опад	<u>341,3±54,90</u> 100,0	<u>280,0±24,95</u> 100,0	<u>271,5±44,00</u> 100,0	<u>201,7±24,59</u> 100,0

Примечание: Статистики получены при уровне доверительной вероятности 0,954.

Средняя масса опада в период с мая по ноябрь составила  $273,6 \pm 57,12$  г/м<sup>2</sup> или  $2,7 \pm 0,57$  т/га. Максимальное значение зафиксировано на 1 ПП –  $341,3 \pm 54,90$  г/м<sup>2</sup>, меньшее на 4 ПП –  $201,7 \pm 24,59$  г/м<sup>2</sup>. В среднем доля участия активной фракции опада – 77,9% ( $210,9 \pm 37,74$  г/м<sup>2</sup>), неактивной – 22,1% ( $62,72 \pm 32,72$  г/м<sup>2</sup>). Масса шишек и ветвей характеризовалась сильной вариабельностью (5,4–21,8%). В общей массе опада на всех пробных площадях выявлено преобладание хвои сосны (от 40 до 61%). Масса листьев минимальна, что связано с преимущественно чистым породным составом (однако на территории 3 и 4 ПП присутствуют подлесочные растения, что отразилось на результатах). Оценивать опад трав в задачи не входило, поэтому учитывалась фитомасса только polegших растений непосредственно в зоне сетки опадоуловителей. По семенам процент участия минимален, что обусловлено зоогенным фактором и малым весом. Содержание неидентифицированных остатков достаточно велико от 7 до 10%, разница на участках 1, 3 и 2, 4 ПП и объясняется типом леса.

Количественные оценки получены путем усреднения данных (среднее арифметическое), также рассчитаны стандартные отклонения, все показатели получены при уровне доверительной вероятности 0,954.

Одним из этапов исследования являлась оценка доли участия опада в составе лесной подстилки. Для этого собрана информация по морфологическим показателям верхнего почвенного горизонта. Работа проводилась в начале вегетации, непосредственно на стыке двух периодов годичной динамики поступления и разложения опада [Цыкунов, 1974]. Имея данные о массе подстилки, которая проходит стадию разложения, и сведения о поступлении фитомассы древесного опада за весь вегетационный сезон, получены данные о цикличности процесса круговорота питательных веществ на территории исследования (табл. 3).

Таблица 3

**Соотношение фитомассы древесного опада и лесной подстилки**

**Ratio of phytomass of falling litter and forest litter**

ПП	Масса подстилки до начала вегетации, т/га	Масса опада в вегетацию, т/га	Доля опада от массы подстилки, %
1	50,40	3,41	6,8
2	30,63	2,80	9,1
3	45,98	2,71	5,9
4	27,48	2,02	7,4

Примечание: Масса подстилки и опада в абсолютно сухом состоянии.

Масса древесного опада менялась в пределах от 2,02 до 3,41 т/га. Максимальное значение на 1 ПП (3,41 т/га), что можно связать с полнотой и стволовым запасом. Доля опада от массы лесной подстилки варьировала от 5 до 9%. С точки зрения процесса разложения подстилки (который длится по данным разных исследователей от 3 до 8 лет [Цыкунов, 1974]) установлено, что в разных типах леса сохраняется индивидуальная скорость разложения. Количество массы древесного опада отражает таксационные показатели, почвенные и атмосферно-климатические условия.

На следующем этапе выполнили оценку депонированного углерода в поступающем опаде:

- 1 ПП –  $1,6 \pm 0,26$  т/га;
- 2 ПП –  $1,3 \pm 0,12$  т/га;
- 3 ПП –  $1,3 \pm 0,21$  т/га;
- 4 ПП –  $1,0 \pm 0,12$  т/га.

Результаты исследования приведены за вегетационный период без учета накопления в холодное время года (+20–30%). Это нужно принимать во внимание при сравнении с годовыми данными других авторов (сосняки Польши: 1,51–1,70 С т/га [Jasińska, Sewerniak et al., 2020], 0,71–0,86 С т/га [Węgiel, Polowy, 2020]; сосняки Республики Коми: 1,3 С т/га [Кузнецов, 2010]; сосняки левобережной части р. Енисей: 2,45 С т/га [Решетникова, 2011]). Различия в углеродных пулах объясняются условиями местопроизрастания; почвенными, типологическими и таксационными особенностями сосновых насаждений.

Для исходного периода наблюдений (вегетационный период 2022 года) выполнен анализ временной динамики накопления углерода в составе опада. Незначительная аккумуляция массы листьев выявлена в первые дни на 4 ПП, что очевидно связано с близким расположением березовых древостоев. Также за этот период отмечен порывистый ветер с максимальными значениями до 15 м/с, что могло повлиять на количество поступающего опада в целом. В дальнейшем, наблюдалась стагнация в накоплении. После 13 августа (сотый день исследования) выявлено достаточно активное поступление углерода, что связано с началом «увядания» листовых древостоев и подлесочных пород, произрастающих в соседних выделах.

Аккумуляция углерода в опаде трав совсем незначительна и связано главным образом с типом леса и степенью вытаптывания растительности.

Количество углерода в семенах минимально, вследствие малого веса и эндозоохории. Отмечена существенная разница между значениями 1, 2 и 3,

4 ПП, что объясняется полнотой древостоев. Также два первых участка характеризуются интенсивной рекреационной нагрузкой, что влияет на обитание животных.

Количество углерода в опаде коры незначительно и накапливается без резких скачков.

Депонирование углерода в опаде неидентифицированных остатков, идентичен процессу аккумуляирования элемента в семенах. Наблюдался высокий рост на начальном этапе вегетационного периода, затем интенсивность снижалась. Схожесть объясняется наличием в компоненте продуктов генеративного размножения, а именно микростробилов. Со второй половины мая до середины июня наступает период цветения сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.).

Поступление хвойного опада (рис. 2) стабильно увеличивается в течение вегетационного периода. На первой неделе наблюдений выявлен небольшой скачок на 1 и 2 ПП, что связано с порывами ветра. В первой половине наблюдения отмечена низкая интенсивность депонирования элемента, что объясняется естественными процессами в вегетационном цикле. В дальнейшем процесс накопления углерода происходит более интенсивно.

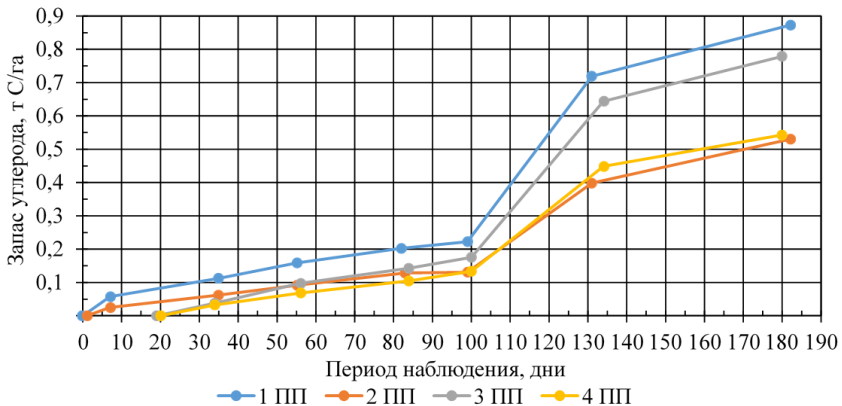


Рис. 2. Процесс накопления углерода опада хвои по дням наблюдения

Fig. 2. The process of carbon accumulation in needle litter by days of observation

На процесс накапливания опада влияют два таксационных показателя: запас и возраст. На 1 ПП стволовой запас равен 412 м<sup>3</sup>/га – 95 лет, а на 3 ПП 219 м<sup>3</sup>/га – 75 лет. Чем старше древостой, тем интенсивнее процесс

опада хвой. Однако учитывая большую разницу в запасах древесины, можно предположить, что сочетание этих факторов привели к полученным результатам. Близкая ситуация отмечена на 2 и 4 ПП (рис. 2), однако небольшое различие в запасах ( $292$  и  $252 \text{ м}^3/\text{га}$  соответственно) и возрасте (на 2 ПП более молодой древостой) подтверждают вывод относительно интенсивности опада сосновых древостоев.

В табл. 4 представлены данные по стадиям поступления углерода в опад хвой. Определены три стадии (умеренная, значительная, интенсивная), которые можно выделить в зависимости от накопления углерода.

Таблица 4

**Стадии, длительность периода и накопление массы углерода в опаде хвой**  
**Stages, duration of the period and accumulation of carbon mass in the needle litter**

ПП	Стадия роста	Длительность стадии, дней	Даты	Накопление, т С/га
1	умеренная	100	05.05.2022–13.08.2022	$0,0–222,3 \cdot 10^{-3}$
	интенсивная	31	14.08.2022–13.09.2022	$222,3 \cdot 10^{-3}–719,5 \cdot 10^{-3}$
	умеренная	51	14.09.2022–03.11.2022	$719,5 \cdot 10^{-3}–872,6 \cdot 10^{-3}$
2	умеренная	100	05.05.2022–13.08.2022	$0,0–130,9 \cdot 10^{-3}$
	значительная	31	14.08.2022–13.09.2022	$130,9 \cdot 10^{-3}–398,4 \cdot 10^{-3}$
	умеренная	51	14.09.2022–03.11.2022	$398,4 \cdot 10^{-3}–530,2 \cdot 10^{-3}$
3	умеренная	81	24.05.2022–13.08.2022	$0,0–175,6 \cdot 10^{-3}$
	интенсивная	34	14.08.2022–16.09.2022	$175,6 \cdot 10^{-3}–644,3 \cdot 10^{-3}$
	умеренная	46	17.09.2022–01.11.2022	$644,3 \cdot 10^{-3}–779,2 \cdot 10^{-3}$
4	умеренная	80	25.05.2022–13.08.2022	$0,0–133,8 \cdot 10^{-3}$
	значительная	34	14.08.2022–16.09.2022	$133,8 \cdot 10^{-3}–448,7 \cdot 10^{-3}$
	умеренная	46	17.09.2022–01.11.2022	$448,7 \cdot 10^{-3}–542,8 \cdot 10^{-3}$

Неактивная фракция обладает высокой вариабельностью из-за большого веса. В связи с этим процесс выявления закономерностей затруднен. Выделено резкое накопление в начале исследования, которое связано с порывами ветра, в остальной период активность процесса довольно низкая и достаточно равномерная.

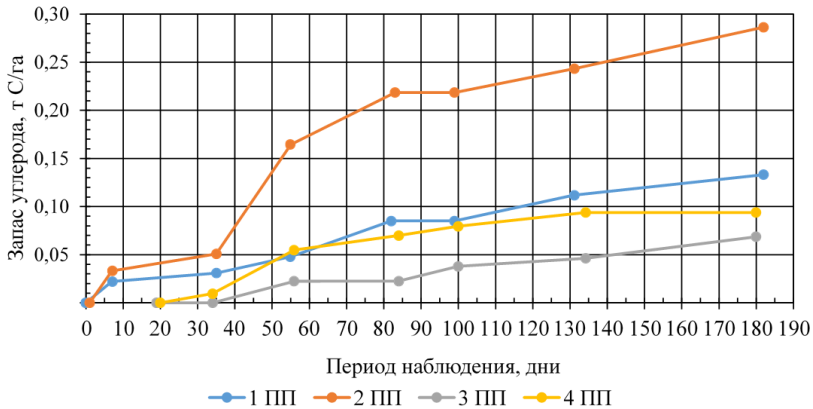


Рис. 3. Процесс накопления углерода опада шишек по дням наблюдения  
 Fig. 3. The process of carbon accumulation in cone litter by days of observation

Интенсивность процесса аккумуляции углерода в опаде шишек (рис. 3) происходит равномерно на всех участках, за исключением 2 ПП. Стадии депонирования углерода представлены в табл. 5 (стабильно низкая, умеренная, интенсивная). Максимальные значения отмечены на 2 ПП, а минимальные на 3 ПП.

Таблица 5

**Стадии, длительность периода и накопление массы углерода в опаде шишек**  
**Stages, duration of the period and accumulation of carbon mass in the litter of cones**

ПП	Стадия роста	Длительность стадии, дней	Даты	Накопление, т С/га
1	стабильно низкая	182	05.05.2022 – 03.11.2022	$0,0 - 1331,8 \cdot 10^{-4}$
2	стабильно низкая	36	05.05.2022 – 09.06.2022	$0,0 - 507,8 \cdot 10^{-4}$
	интенсивная	20	10.06.2022 – 29.06.2022	$507,8 \cdot 10^{-4} - 1645,1 \cdot 10^{-4}$
	умеренная	126	30.06.2022 – 03.11.2022	$1645,1 \cdot 10^{-4} - 2863,7 \cdot 10^{-4}$
3	стабильно низкая	160	24.05.2022 – 01.11.2022	$0,0 - 686,2 \cdot 10^{-4}$
4	стабильно низкая	161	25.05.2022 – 01.11.2022	$0,0 - 938,9 \cdot 10^{-4}$

**Выводы.** В результате изучения процесса динамики углеродного пула опада в наиболее активный период развития (май–ноябрь) сосновых насаждений подтаёжно-лесостепного района Средней Сибири получены следующие выводы:

- по данным учёных основным источником поступления органических веществ в почву является опад, от которого зависят процессы формирования и накопления углерода;
- доля опада от массы лесной подстилки варьировала от 5 до 10%. Установлено, что характер поступления опада зависит от таксационных показателей;
- результаты оценки депонированного углерода в опаде приведены за вегетационный период без учета накопления в холодное время года. В зависимости от условий местопроизрастания итоговые значения исследователей различаются;
- в среднем доля участия активной фракции опада составила 77,9%, неактивной – 22,1%;
- в общей массе опада на всех пробных площадях выявлено преобладание хвои сосны (от 40 до 61%). Доля участия листьев, травы и семян минимальна, что обусловлено: составом древостоя, конструкцией опадоуловителей, интенсивной рекреационной нагрузкой, зоогенным воздействием и малым весом семян;
- масса неидентифицированных остатков достаточно велика от 7 до 10%. Разница на участках 1, 3 ПП и 2, 4 связана вероятнее всего с типом леса;
- масса депонированного углерода опада варьировала на пробных площадях от  $1,0 \pm 0,12$  т С/га до  $1,6 \pm 0,26$  т С/га;
- результаты анализа временного накопления показали, что в начале исследования скорость поступления опада высока и связана с метеорологическими показателями. В дальнейшем, наблюдается снижение интенсивности процесса. После 13 августа выявлено достаточно активное поступление углерода в связи с подготовкой к переходу изучаемых экосистем к стадии покоя, что объясняется естественными процессами в вегетационном цикле;
- динамике процесса аккумуляции углерода в опаде сосновых насаждений свойственно стадийное (неравномерное) накопление по отдельным составляющим (фракциям) и длительности процесса. Выделены следующие стадии по всем фракциям: стабильно низкая, умеренная, значительная, интенсивная;
- во временной динамике накапливания углерода в составляющей хвои выделены три стадии (умеренная, значительная, интенсивная), что являет-



ся показательным для активной фракции, так как доля участия в большинстве случаев свыше 50%;

- динамика аккумуляции углерода в составляющей шишек является показательной для неактивной фракции, на период исследования активность процесса довольно низкая и достаточно равномерная;

- в пределах пробных площадей установлена различная интенсивность накопления углерода, с учетом длительности периода и по количеству опада в конкретной стадии.

Необходимо отметить, что опад как часть лесной экосистемы характеризуется высокой вариабельностью и зависит от совокупности как биотических, так и абиотических факторов.

Исследование проводилось в рамках государственного задания, установленного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, для реализации проекта «Динамика восстановления таежных лесов Центральной Сибири, нарушенных энтомовредителями» (№ FEFE–2024–0029) коллективом научной лаборатории «Лесных экосистем».

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

### Библиографический список

Абрамова Е.Р., Брянин С.В. Разложение опада в постпирогенных лиственничниках хребта Тукурингра (верхнее Приамурье) // Сибирский лесной журнал. 2018. № 2. С. 71–77.

Жукова А.И., Григорьев И.В., Григорьева О.И., Ледяева А.С. Лесное ресурсосведение: учеб. пособие. СПб.: СПб ГЛТА, 2008. 205 с.

Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Краев Г.Н. Динамика бюджета углерода лесов России за два последних десятилетия // Лесоведение. 2011. № 6. С. 16–28.

Земсков Ф.И. Детритогенез в условиях лесных биогеоценозов урбанизированных территорий: дисс. ... канд. биол. наук: 03.02.13 – почвоведение М.: МГУ, 2021. 219 с.

Иванова Е.А. Формирование и разложение древесного опада в лесных экосистемах в фоновых условиях и при аэротехногенном загрязнении // Вопросы лесной науки. 2021. № 4 (3). С. 1–52.

Карпачевский Л.О. Лес и лесные почвы. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 264 с.

Кузнецов М.А. Влияние условий разложения и состава опада на характеристики и запас подстилки в среднетаежном чернично-сфагновом ельнике // Лесоведение. 2010. № 6. С. 54–60.

Кузнецов М.А., Осипов А.Ф. Растительный опад как компонент биологического круговорота углерода в заболоченных хвойных сообществах средней тайги // Вестник института биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. 2011. № 9. С. 10–12.

Кузнецова А.И. Влияние растительности на запасы почвенного углерода в лесах (обзор) // Вопросы лесной науки. 2021. Т. 4. № 4. С. 41–95.

Лиханова Н.В. Роль растительного опада в формировании лесной подстилки на вырубках ельников средней тайги // ИВУЗ. Лесной журнал. 2014. № 3. С. 52–66.

Лянгузова И.В. и др. Пространственное распределение запасов напочвенного покрова и лесной подстилки в фоновых и дефолирующих сосновых лесах Кольского полуострова // Растительные ресурсы. 2020. Т. 56. № 4. С. 335–350.

Малышева Н.В., Моисеев Б.Н., Филипчук А.Н. Методы оценки баланса углерода в лесных экосистемах и возможности их использования для расчетов годичного депонирования углерода // Вестник МГУЛ. 2017. № 1. С. 4–13.

Базилевич Н.И. и др. Методы изучения биологического круговорота в различных природных зонах. М.: Мысль, 1978. 185 с.

Назаренко А.Е., Красноярова Б.А. Стоимостная оценка экосистемных услуг по депонированию углерода экосистемами Алтайского края как составляющая перехода к устойчивому развитию // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2018. Т. 4 (14) № 3. С. 89–99.

Осинов А.Ф. Запасы и потоки органического углерода в экосистеме спелого сосняка черничного средней тайги // Сибирский лесной журнал. 2017. №. 2. С. 70–80.

Решетникова Т.В. Лесные подстилки как депо биогенных элементов // Вестник КрасГАУ. 2011. № 12. С. 75–82.

Родин Л.Е., Ремезов Н.П., Базилевич Н.И. Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах. Л.: Наука, 1967. 145 с.

Солодовников А.Н. Особенности начального разложения хвои в сосняке брусничном в среднетаежной подзоне Карелии // Труды КарНЦ РАН. 2019. № 11. С. 97–106.

Стеценко А.В., Сафонов Г.В. Инвестиции в леса России: методологические основы. М.: МАКС Пресс, 2010. 134 с.

Федоров Б.Г. Российский углеродный баланс: монография. М.: Общество с ограниченной ответственностью «Научный консультант», 2017. 82 с.

Цыкунов И.А. Накопление лесной подстилки в сосновых насаждениях // Лесоведение и лесное хозяйство: республиканский межведомственный сборник. 1974. № 8. С. 52–55.

Baietto A., Hernández J., del Pino A. Comparative Dynamics of Above-Ground Litter Production and Decomposition from *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden and *Pinus taeda* L., and Their Contribution to Soil Organic Carbon // Forests. 2021. Vol. 12, no. 3. P. 349.

Jasińska J., Sewerniak P., Puchalka R. Litterfall in a Scots Pine Forest on Inland Dunes in Central Europe: Mass, Seasonal Dynamics and Chemistry // Forests. 2020. Vol. 11, no. 6. P. 678.

Węgiel A., Polowy K. Aboveground Carbon Content and Storage in Mature Scots Pine Stands of Different Densities // Forests. 2020. Vol. 11, no. 2. P. 240.

## References

Abramova E.R., Brianin S.V. Decomposition of sediment in post-pyrogenic larch forests of the Tukuringra Range (Upper Priamurye). *Siberian Forest Journal*, 2018, no. 2, pp. 71–77. (In Russ.)

Bazilevich N.I. et al. Methods for studying the biological cycle in different natural areas. M.: Mysl, 1978. 185 p. (In Russ.)

Baietto A., Hernández J., del Pino A. Comparative Dynamics of Above-Ground Litter Production and Decomposition from *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden and *Pinus taeda* L., and Their Contribution to Soil Organic Carbon. *Forests*, 2021, vol. 12, no. 3, pp. 349.

Fedorov B.G. The Russian carbon balance: a monograph. M.: Scientific Adviser Limited Liability Company, 2017. 82 p. (In Russ.)

Ivanova E.A. Formation and decomposition of woody debris in forest ecosystems under background conditions and under aerotechnogenic pollution. *Voprosy lesnoy nauki*, 2021, no. 4 (3), pp. 1–52. (In Russ.)

Jasińska J., Sewerniak P., Puchalka R. Litterfall in a Scots Pine Forest on Inland Dunes in Central Europe: Mass, Seasonal Dynamics and Chemistry/ *Forests*. 2020. vol. 11, no. 6. p. 678.

Karpachevskii L.O. Forest and forest soils. M.: Forest Industry, 1981. 264 p. (In Russ.)

Kuznetsov M.A. Effect of decomposition conditions and composition of litter on litter characteristics and stock in a mid-mediterranean bilberry-sphagnum spruce forest. *Forest Science*, 2010, no. 6, pp. 54–60. (In Russ.)

Kuznetsov M.A., Osipov A.F. The vegetation litter as a component of the biological carbon cycle in waterlogged coniferous communities of the Middle Taiga. *Bulletin of the Institute of Biology of the Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2011, no. 9, pp. 10–12. (In Russ.)

Kuznetsova A.I. Influence of vegetation on soil carbon stocks in forests. *Voprosy lesnoy nauki*, 2021, vol. 4, no. 4, pp. 41–95. (In Russ.)

Lianguzova I.V. et al. Spatial distribution of ground cover and forest litter stocks in background and defoliation pine forests of the Kola Peninsula. *Plant resources*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 335–350. (In Russ.)

Likhanova N.V. The role of plant debris in the formation of forest litter in logged areas of middle taiga spruce forests. *IVUZ. Journal of Forestry*, 2014, no. 3, pp. 52–66. (In Russ.)

Malysheva N.V., Moiseev B.N., Filipchuk A.N. Methods for estimating the carbon balance in forest ecosystems and how they can be used to calculate annual carbon deposition. *MSUL Bulletin*, 2017, no. 1, pp. 4–13. (In Russ.)

Nazarenko A.E., Krasnoiarova B. A. Cost estimation of ecosystem services of carbon sequestration by ecosystems of Altai Krai as a component of transition to

sustainable development. *Geopolitics and eco-geodynamics of regions*, 2018, vol. 4 (14), no. 3, pp. 89–99. (In Russ.)

Osipov A.F. Organic carbon stocks and fluxes in a mature bilberry pine forest ecosystem of the Middle Taiga. *Siberian Forest Journal*, 2017, no. 2, pp. 70–80. (In Russ.)

Reshetnikova T.V. Forest litter as a depot of biogenic elements. *Krasnoyarsk State Agrarian University Bulletin*, 2011, no. 12, pp. 75–82. (In Russ.)

Rodin L.E., Remezov N.P., Bazilevich N.I. Methodological guidelines for the study of dynamics and biological cycling in phytocenoses. L.: Nauka, 1967. 145 p. (In Russ.)

Solodovnikov A.N. Peculiarities of initial decomposition of pine needles in lingonberry pine forests in the middle taiga subzone of Karelia. *Proceedings of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences*, 2019, no. 11, pp. 97–106. (In Russ.)

Stetsenko A.V., Safonov G.V. Investment in Russia's Forests: Methodological Foundations. M.: MAKS Press, 2010. 134 p. (In Russ.)

Tsykunov I.A. Accumulation of forest litter in pine stands. *Forest Science and Forestry: A Republican Interdepartmental Collection*, 1974, no. 8, pp. 52–55. (In Russ.)

Węgiel A., Polowy K. Aboveground Carbon Content and Storage in Mature Scots Pine Stands of Different Densities. *Forests*, 2020, vol. 11, no. 2, p. 240.

Zamolodchikov D.G., Grabovskii V.I., Kraev G.N. Dynamics of the Russian forest carbon budget over the last two decades. *Forest Science*, 2011, no. 6, pp. 16–28. (In Russ.)

Zemskov F.I. Detritogenesis in forest biogeocenoses of urbanized areas: Ph. 219 p. (In Russ.)

Zhukova A.I., Grigorev I.V., Grigoreva O.I., Lediaeva A.S. Forest Resource Science: Training Manual. SPb.: SPb GLTA, 2008. 205 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 20.03.2023

---

**Мельник А.И., Чанчикова С.А., Вайс А.А., Немич В.Н., Михайлов П.В., Лузина Е.Ф., Мантулина А.В.** Углеродный пул древесного опада сосняков подтаежно-лесостепного района Средней Сибири за вегетационный период 2022 года // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 250. С. 144–162. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.144-162

В связи с ростом актуальности работ по оценке бюджета углерода лесопокрываемых территорий, на сегодняшний день остается одна из главных проблем – это уточнение данных по запасам депонированного углерода разными компонентами леса. Целью исследования является оценка динамики поступления фитомассы и углеродного пула наземного опада в сосновых насаждениях на территории подтаежно-лесостепного района Средней Сибири. На территории

учебно-опытного лесхоза Сибирского университета науки и технологий (СибГУ), расположенного в пригородной зоне города Красноярска, заложены пробные площади на основе модальности породного состава древостоев и лесорастительных условий. Проведено таксационное описание изучаемых насаждений, а также сбор морфологической информации, касательно поступающего опада за вегетационный период 2022 года. Выполнены анализ и обработка полученных данных во время полевого и камерального периодов, таких как: абсолютно сухая масса каждой составляющей фракций опада, запасы опада и углерода на единицу площади, доля опада от массы лесной подстилки и стадии роста аккумуляирования древесного опада. Результаты исследования показали, что доля участия активной фракции составила 77,9%, неактивной – 22,1%; преобладание в общей массе выявлено у хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) – до 61%; масса депонированного углерода опада варьировала на пробных площадях от  $1,0 \pm 0,12$  т С/га до  $1,6 \pm 0,26$  т С/га. Также отмечено неравномерное накопление по составляющим и длительности процесса. Полученные результаты будут использоваться для уточнения данных при оценке углерододепонирующей функции лесов, на территории подтаежно-лесостепного района Средней Сибири.

Ключевые слова: поступление углерода в опад, сосновый древостой, таксационная характеристика, лесная подстилка, временная динамика, фитомасса.

**Melnik A.I., Chanchikova S.A., Vais A.A., Nemich V.N., Mikhaylov P.V., Luzina E.F., Mantulina A.V.** Carbon pool of tree litter of pine forests in the subtaiga-forest-steppe region of Central Siberia for the growing season of 2022. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 250, pp. 144–162 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.144-162

Due to the increasing relevance of work on the assessment of the carbon budget of forest-covered territories, today one of the main problems is the clarification of data on the reserves of deposited carbon by different forest components. The aim of the study is to assess the dynamics of phytomass input and carbon pool of above-ground litter in pine stands on the territory of the subtaiga-forest-steppe region of Central Siberia. Trial areas based on the modality of the stand species composition and forest growing conditions have been laid on the territory of the educational and experimental forestry belonging to Reshetnev Siberian State University of Science and Technology (SibGU), which is located in the suburban area of Krasnoyarsk city. The taxational description of the studied plantings was carried out, as well as collecting morphological information regarding the incoming tree litter for the growing season of 2022. The analysis and processing of the data obtained during the field and cameral periods were made, such as: the absolutely dry mass of each component of the litter fractions, the stocks of litter and carbon per area unit, the tree litter proportion from the mass of the forest litter and the growth stage of the tree litter accumulation. The results of the study showed that the share of the active fraction was 77.9%, while the inactive fraction was 22.1%; the

predominance in the total mass was revealed in the needles of the common pine (*Pinus sylvestris* L.) up to 61%; the mass of deposited carbon of the litter varied on the sample areas from  $1.0 \pm 0.12 \text{ t C ha}^{-1}$  to  $1.6 \pm 0.26 \text{ t C ha}^{-1}$ . Uneven accumulation in terms of components and duration of the process was also noted. The results obtained will be used to refine the data when assessing the carbon-depositing function of forests on the territory of the subtaiga-forest-steppe region of Central Siberia.

**Keywords:** carbon input into the tree litter fall, pine forest, taxation characteristics, forest litter, time dynamics, phytomass.

---

**МЕЛЬНИК Александра Игоревна** – младший научный сотрудник лаборатории «Лесных экосистем», аспирант кафедры лесоводства, охраны и защиты леса. ORCID 0000-0002-1673-1639, Web of Science Researcher ID ABF-0738-2022, Scopus Author ID 57486433000, ID РИНЦ 1135987.

660037, Проспект имени газеты Красноярский рабочий, д. 31, г. Красноярск, Красноярский край, Россия. E-mail: aleksandrana2013@gmail.com

**MELNIK Alexandra I.** – PhD student of the Department of Forestry, Protection and Development of Forests, Junior researcher in the Laboratory for Forest Ecosystems. ORCID 0000-0002-1673-1639, Web of Science Researcher ID ABF-0738-2022, Scopus Author ID 57486433000, ID РИНЦ 1135987.

660037. Prospekt imeni gazety Krasnoarskii rabochii 31. Krasnoyarsk. Krasnoyarsk Territory. Russia. E-mail: aleksandrana2013@gmail.com

**ЧАНЧИКОВА Светлана Анатольевна** – младший научный сотрудник лаборатории «Лесных экосистем». ORCID 0000-0001-6283-1406, Web of Science Researcher ID ABS-0745-2022, Scopus Author ID 57485606100, ID РИНЦ 1114547.

660037, Проспект имени газеты Красноярский рабочий, д. 31, г. Красноярск, Красноярский край, Россия. E-mail: svetylei4ka@mail.ru

**CHANCHIKOVA Svetlana A.** – Junior researcher in the Laboratory for Forest Ecosystems. ORCID 0000-0001-6283-1406, Web of Science Researcher ID ABS-0745-2022, Scopus Author ID 57485606100, ID РИНЦ 1114547.

660037. Prospekt imeni gazety Krasnoarskii rabochii 31. Krasnoyarsk. Krasnoyarsk Territory. Russia. E-mail: svetylei4ka@mail.ru

**ВАЙС Андрей Андреевич** – профессор кафедры лесной таксации, лесоустройства и геодезии Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, ведущий научный сотрудник лаборатории «Лесных экосистем», доктор сельскохозяйственных наук. ORCID 0000-0003-4965-3670, Scopus Author ID 57211205270, ID РИНЦ 284439.

660037, Проспект имени газеты Красноярский рабочий, д. 31, г. Красноярск, Красноярский край, Россия. E-mail: vais6365@mail.ru

**VAIS Andrei A.** – DSc (Agricultural), Professor at the Department of Forest Inventory, Forestry regulation and Geodesy, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Leading researcher at the Laboratory Forest Ecosystems. ORCID 0000-0003-4965-3670, Scopus Author ID 57211205270, ID РИНЦ 284439.

660037. Prospekt imeni gazety Krasnoarskii rabochii 31. Krasnoyarsk. Krasnoyarsk Territory. Russia. E-mail: vais6365@mail.ru

**НЕМИЧ Виктор Николаевич** – доцент кафедры лесной таксации, лесоустройства и геодезии Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, старший научный сотрудник лаборатории «Лесных экосистем», кандидат сельскохозяйственных наук. ORCID 0000-0001-8700-532X, Scopus Author ID 57216963386, ID РИНЦ 88238.

660037, Проспект имени газеты Красноярский рабочий, д. 31, г. Красноярск, Красноярский край, Россия. E-mail: nvn-16@yandex.ru

**NEMICH Victor N.** – PhD (Agricultural), Assistant Professor at the Department of Forest Inventory, Forestry regulation and Geodesy, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Senior Researcher at the Laboratory Forest Ecosystems. ORCID 0000-0001-8700-532X, Scopus Author ID 57216963386, ID РИНЦ 88238.

660037. Prospekt imeni gazety Krasnoarskii rabochii 31. Krasnoyarsk. Krasnoyarsk Territory. Russia. E-mail: nvn-16@yandex.ru

**МИХАЙЛОВ Павел Владимирович** – заведующий кафедры лесоводства, охраны и защиты леса Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, ведущий научный сотрудник лаборатории «Лесных экосистем», кандидат сельскохозяйственных наук. ORCID 0000-0003-3967-0709, Scopus Author ID 57219098463, ID РИНЦ 715203.

660037, Проспект имени газеты Красноярский рабочий, д. 31, г. Красноярск, Красноярский край, Россия. E-mail: mihaylov.p.v@mail.ru

**MIKHAYLOV Pavel V.** – PhD (Agricultural), Head of the Department of Forestry, Protection and Development of Forests, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Leading researcher at the Laboratory Forest Ecosystems. ORCID 0000-0003-3967-0709, Scopus Author ID 57219098463, ID РИНЦ 715203.

660037. Prospekt imeni gazety Krasnoarskii rabochii 31. Krasnoyarsk. Krasnoyarsk Territory. Russia. E-mail: mihaylov.p.v@mail.ru

**ЛУЗИНА Елизавета Фёдоровна** – младший научный сотрудник лаборатории «Лесных экосистем». ORCID 0000-0002-4707-1194, Scopus Author ID 57486227000, ID РИНЦ 1135789.

660037, Проспект имени газеты Красноярский рабочий, д. 31, г. Красноярск, Красноярский край, Россия. E-mail: luzinaliza99@mail.ru

**LUZINA Elizaveta F.** – Junior researcher in the Laboratory for Forest Ecosystems. ORCID 0000-0002-4707-1194, Scopus Author ID 57486227000, ID РИНЦ 1135789.

660037. Prospekt imeni gazety Krasnoiarskii rabochii 31. Krasnoyarsk. Krasnoyarsk Territory. Russia. E-mail: luzinaliza99@mail.ru

**МАНТУЛИНА Алина Валерьевна** – аспирант кафедры селекции и озеленения, младший научный сотрудник лаборатории «Лесных экосистем». ORCID 0000-0001-7780-6633, Scopus Author ID 57485814600, ID РИНЦ 1119126.

660037, Проспект имени газеты Красноярский рабочий, д. 31, г. Красноярск, Красноярский край, Россия. E-mail: lina.mantulina@inbox.ru

**MANTULINA Alina V.** – PhD student of the Department of Selection and Landscaping, Junior researcher in the Laboratory for Forest Ecosystems. ORCID 0000-0001-7780-6633, Scopus Author ID 57485814600, ID РИНЦ 1119126.

660037. Prospekt imeni gazety Krasnoiarskii rabochii 31. Krasnoyarsk. Krasnoyarsk Territory. Russia. E-mail: lina.mantulina@inbox.ru



А.А. Логинова, А.А. Егоров, В.В. Бялт

**НОВЫЕ ТАКСОНЫ ДЕРЕВЬЕВ И КУСТАРНИКОВ  
(*SPIRAEA* × *SCHINABECKI*, *SWIDA RUGOSA*, *ULMUS* ‘*COLUMELLA*’)  
В ЗЕЛЕННЫХ НАСАЖДЕНИЯХ Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГА**

*Введение.* Санкт-Петербург – это известный мировой центр ландшафтного искусства, фундаментальной и прикладной ботанической науки, где начиная с XVIII века для испытания и озеленения привлекались разнообразные интродуцированные деревья и кустарники. В обобщающей работе по составу древесных растений, используемых в зеленых насаждениях г. Санкт-Петербурга [Фирсов и др., 2010], приводится список из 404 видов, форм и культиваров, относящихся к 104 родам древесных растений и 43 семействам.

Источниками пополнения ассортимента деревьев и кустарников города является в основном деятельность садово-парковых хозяйств. С 1990-х гг. существенную часть в расширении ассортимента города составляет импортный посадочный материал, поступающий из питомников Западной Европы [Фирсов и др., 2010]. Некоторую роль в расширении ассортимента сыграл бизнес, который без согласования с садово-парковыми службами инициативно высаживает импортный посадочный материал.

Поэтому в зеленых насаждениях исследователями все время отмечаются новые для города таксоны деревьев и кустарников. Наши наблюдения последних десятилетий в зеленых насаждениях Санкт-Петербурга, а также литературные данные [Цвелев, 2000; Фирсов и др., 2010; Бялт и др., 2019], подтверждают это. Определённый вклад в познание и увеличение таксономического разнообразия зеленых насаждений города вносят ботанические сады, в коллекциях которых регистрируются гибриды и формы [Прохоров, 2019].

Наши сравнительные исследования видового состава древесных растений в 18 садах и парках Санкт-Петербурга, начатые в 2005 г. [Логинова и др., 2010, 2020] показали, что для зеленых насаждений города ранее не приводились 3 таксона деревьев и кустарников. В то же время, необходимо подчеркнуть, что два таксона из этих видов раньше успешно выращивались в специальных коллекциях – ботанических садах и дендрариях Санкт-

Петербурга и России в целом, но до сих пор не встречались в городских посадках.

Исходя из этого нами была поставлена цель: подтвердить статус находки как нового таксона для зеленых насаждений Санкт-Петербурга и выявить их распространение и, по возможности, состояние в ботанических коллекциях России.

*Материалы и методика исследования.* Исследования проводились нами в 2019–2023 гг. в 18 парках и садах Санкт-Петербурга: Московский парк Победы, Парк Aviаторов, Южно-Приморский парк, Удельный парк, парк Сосновка, Приморский парк Победы, Александровский парк, парк 9-го января, парк Лесотехнического университета, Овсянниковский сад, Юсуповский сад, сад Олимпия, Измайловский сад, сад Прудки, парк им. И.В. Бабушкина, Александровский сад, Опочининский сад, парк Екатеринбургф.

Разнообразие деревьев и кустарников изучалось маршрутным методом, на пробных площадях и на основе анализа литературы. Для уточнения таксонов и культиваров был собран гербарий деревьев и кустарников, насчитывающий более 200 гербарных образцов и сделаны фотографии растений.

Для подтверждения статуса нового таксона для зеленых насаждений Санкт-Петербурга, проводилось изучение специальной литературы, доступных материалов, данных в информационно-поисковых системах России и мира.

*Результаты исследования.* Как показал анализ полевых наблюдений, собранных гербарных образцов и данных из обобщающих публикаций [Цвелев, 2000; Фирсов и др., 2010; Бялт и др., 2019], нами были выявлены дополнительно 3 новых таксона деревьев и кустарников для зеленых насаждений общего пользования г. Санкт-Петербурга: *Spiraea* × *schinabecki*, *Swida rugosa*, *Ulmus* ‘Columella’. Далее приведем их краткую характеристику по жизненной форме, местонахождению в Санкт-Петербурге, сроку ввода в культуру, географии, состоянию и диагностическим признакам. Приводится коллектор – соавтор А.А. Логинова (сокращенно – А.Л.). Образцы хранятся в Гербарии им. И.П. Бородина Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета (акроним – KFTA).

***Spiraea* × *schinabecki* Zabel** – Спирея Шинабека – кустарник. Посадки высотой 1,3 м в группе на газоне в Удельном парке (северная часть), единично, декоративный. Существует только в культуре и происходит от гибридизации *S. chamaedryfolia* L. и *S. trilobata* L. Коллектор А.Л., KFTA.

Распространение: появился впервые в культуре с 1884 г. в Западной Европе и Северной Америке. Состояние: хорошее, признаки болезней и вредителей отсутствуют, плодоношение обильное. Диагностические признаки: листья яйцевидные, в нижней части побегов почти круглые с дланевидным жилкованием (рис. 1), лепестки длиннее тычинок.



Рис. 1. Спирея Шинабека (*Spiraea* × *schinabecki*) с газона в Удельном парке Санкт-Петербурга; гербарный образец в КФТА

Fig. 1. *Spiraea* × *schinabecki* from a lawn in the Udelnyi Park of St. Petersburg; herbarium specimen in KFTA

***Swida rugosa* (Lam.) Rydb.** (= *Cornus rugosa* Lam.) – Дерен морщинистый – кустарник. Культивируется в парке Сосновка, Удельном парке и Приморском парке Победы, высотой 2,1; 2,1 и 1,7 м соответственно; редко, декоративный, интродуцент. Коллектор А.Л., КФТА. Ранее выращивалась в коллекции открытого грунта Ботанического института РАН (1852, 1861–1913, до 1961–?, 1976–2000), причина выпадения из коллекции неизвестна [Связева, 2005]. Представлен в коллекции СПбГЛТУ. Распространение: Северная Америка – от Новой Шотландии и Манитобы до Виргинии, Иллинойса и Айовы. Состояние: удовлетворительное, выявлены признаки мучнистой росы, вредителей не обнаружено, плодоношение обильное. Диагностические признаки: отличается от *Swida sericea* и *S. sanguinea* крупной, слегка морщинистой, листовой пластинкой, побеги бурые, сердцевина белая, плоды бледно-голубые (рис. 2).

***Ulmus 'Columella'*** – Вяз гибридный культивар Колумелла. – Дерево. Аллейная посадка в парке 9-го января. Культивар сложного гибридного происхождения выведен научно-исследовательским институтом лесного хозяйства и ландшафтного планирования Доршкампа (Dorshcamp), г. Вареининген (Нидерланды) [Tijdgat, 2020]. Гибрид впервые получен ещё в 1967 г. и после того, как показал устойчивость к голландской болезни, поступил в широкую продажу в 1989 г. Молекулярно-генетический анализ показал, что этот гибрид происходит от скрещивания *U. minor* и *U. 'Plantyn'* [Tijdgat, 2020]. Сам *U. 'Plantyn'* происходит от скрещивания голландских гибридов '202' (*U. 'Exoniensis'* × *U. wallichiana*) и '302' (*U. minor* '1' × *U. minor* '28') [Heybroek, 1993]. *U. 'Exoniensis'* является культиваром *U. glabra* [Tijdgat, 2020]. Таким образом, в образовании этого культивара участвовали культивары и родительские формы трёх видов *U. minor*, *U. glabra* и *U. wallichiana*. Состояние *Ulmus 'Columella'* в парке 9-го января хорошее, признаки голландской болезни и вредителей отсутствуют, плодоношение обильное. Диагностические признаки: крона узкоколоновидная, высотой 13 м, шириной 5 м, листья зубчатые, темно-зеленые, кора серо-коричневого цвета, плодоношение обильное (рис. 3).

Как показал анализ литературы, из трёх приведённых нами видов упоминаются в коллекции БИН РАН [Связева, 2005] только *Swida rugosa*.

Поиск присутствия трёх новых таксонов в ботанических садах России по Информационно-поисковой системе «Ботанические коллекции России и сопредельных государств» [Информационно-поисковая система ..., 1997; Прохоров, Нестеренко, 2001] показал следующее:

1. *Spiraea* × *schinabecki* – не указан.
2. *Swida rugosa* присутствует в коллекциях 4 ботанических садов: Ботанический сад-институт Поволжского ГТУ; Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН; Сахалинский ботанический сад ДВО РАН; Южно-Уральский ботанический сад-институт Уфимского ФИЦ РАН.
3. *Ulmus 'Columella'* – не указан ни для одной коллекции.



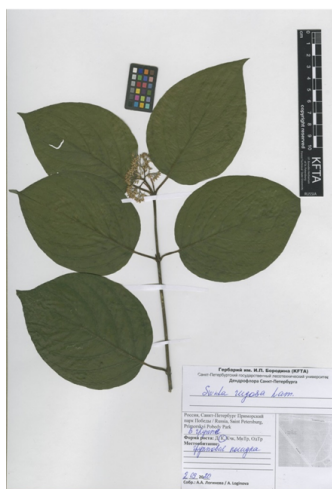
(a)



(b)



(c)



(d)

Рис. 2. Дерен морщинистый (*Swida rugosa*) из групповой посадки в Приморском парке Победы, Санкт-Петербург: (a) общий вид, (b) лист, (c) соцветие, (d) гербарный образец, KFTA

Fig. 2. Roundleaf dogwood (*Swida rugosa*) from a group planting in Primorsky park Pobedy, St. Petersburg: (a) general appearance, (b) leaf, (c) inflorescence, (d) herbarium specimen, KFTA



(a)



(b)

Рис. 3. Вяз гибридный Колумелла (*Ulmus* 'Columella') из аллеиной посадки в парке 9-го января: (a) общий вид, (b) гербарный образец, KFTA

Fig. 3. *Ulmus* 'Columella' from the alley planting in the park on January 9th: (a) general view, (b) herbarium specimen, KFTA

По каталогу Главного ботанического сада г. Москвы на 1975 г. [Древесные растения ..., 1975] приводятся два вида: *Spiraea* × *schinabecki* в коллекции открытого грунта с 1949 г., *Swida rugosa* – с 1958 г.. Позже для коллекции приводится только *Spiraea* × *schinabecki* как зимостойкий гибрид [Древесные растения ..., 2005].

Необходимо подчеркнуть, что в информационно-поисковой системе «Ботанические коллекции России и сопредельных государств» [Информационно-поисковая система ..., 1997] имеются списки видов растений не по всем ботаническим садам, в том числе отсутствуют данные по ботаническому саду Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета. Анализ материалов лесоустройства 1983 г. (данные тогда были представлены дендрологом Н.Е. Булыгиным) и данных инвентаризации на 2008 г. в этом ботаническом саду, проведенной под руководством соавтора А.А. Егорова, показали наличие в коллекции только *Swida rugosa*.

Сведения о распространении в России выявленных нами 3 новых таксонов в культуре по базе данных Глобального информационного фонда по биоразнообразию (<https://www.gbif.org/>) позволили выявить наличие в коллекции Иркутского ботанического сада *Spiraea* × *schinabecki*, гербарный образец которого с датой сбора 18.06.1964 хранится в Музее ботаники Университета Хельсинки (<https://www.gbif.org/tools/zoom/simple.html?src=/api.gbif.org/v1/image/cache/occurrence/343955537/media/65fd72f06b43fa6668764194a2454ede>).

Обобщенные сведения по распространению *Spiraea* × *schinabecki*, *Swida rugosa*, *Ulmus* ‘Columella’ в зеленых насаждениях и ботанических коллекциях городов России приведены в таблице.

*Обсуждение.* Сравнивая немногочисленные и неполные данные из разных источников [Древесные растения ..., 1975, 2005; Информационно-поисковая система ..., 1997; Прохоров, Нестеренко, 2001; Связева, 2005 и др.] по распространению *Spiraea* × *schinabecki*, *Swida rugosa*, *Ulmus* ‘Columella’, выявленных в зеленых насаждениях общего пользования г. Санкт-Петербурга, можно предположить, что эти растения еще редко используются в озеленении населенных пунктов России. Но существует вероятность, что они могут встретиться в зеленых насаждениях других населенных пунктов.

В ботанических коллекциях эти таксоны слабо представлены или не представлены вовсе (см. табл.). По *Swida rugosa* имеются сведения всего для 7 ботанических садов России. Исходя из географии ботанических садов, в которых встречается этот дёрн, можно предположить, что он заслуживает внедрения в озеленение на юге лесной зоны. *Spiraea* × *schinabecki* приводится только для одного ботанического сада – Главного ботанического сада. А *Ulmus* ‘Columella’ вероятнее всего никогда не выращивался в ботанических садах России. В последнее время о продаже посадочного материала этого

культивара вяза появились предложения от некоторых частных питомников в европейской части России, в том числе в Москве и Московской области, Санкт-Петербурге, Ростове-на-Дону, Владимирской области, Пензе.

**Известные сведения о наличии трёх таксонов древесных растений  
в зеленых насаждениях городов и ботанических коллекциях России  
за весь период наблюдений**

**There is known information about the presence of three taxa of woody plants  
in urban green spaces and botanical collections in Russia  
over the entire observation period**

Название	Город	<i>Swida rugosa</i>	<i>Spiraea</i> × <i>schinabecki</i>	<i>Ulmus</i> 'Columella'
Ботанический сад Ботанического института РАН	Санкт-Петербург	+	–	–
Ботанический сад Санкт-Петербургского лесотехнического ГУ	Санкт-Петербург	+	–	–
Зеленые насаждения города (наши данные)	Санкт-Петербург	+	+	+
Главный ботанический сад РАН	Москва	+	+	–
Ботанический сад-институт Поволжского ГТУ	Йошкар-Ола	+	–	–
Южно-Уральский ботанический сад-институт Уфимского ФИЦ РАН	Уфа	+	–	–
Центральный сибирский ботанический сад СО РАН	Новосибирск	+	–	–
Иркутский ботанический сад ИркГУ	Иркутск		+	
Сахалинский ботанический сад ДВО РАН	Южно-Сахалинск	+	–	–

*Примечание:* наличие сведений о видах: + имеются, – отсутствуют.

**Заключение.** В результате исследований, проводившихся в 2019–2023 гг. в 18 парках и садах Санкт-Петербурга, были выявлены три новых таксона древесных растений для города: *Spiraea* × *schinabecki*, *Swida rugosa*, *Ulmus* 'Columella'. Эти таксоны пока ещё ограниченно используются в озеленении городов России, хотя один из них – *Swida rugosa* начинал испытываться во второй половине XIX века в Санкт-Петербурге – в Ботаническом саду БИН РАН. В условиях Санкт-Петербурга эти таксоны проявили достаточную



устойчивость и имеют удовлетворительное и хорошее состояние и могут в дальнейшем использоваться для озеленения города. *Swida rugosa*, которая встречается в 7 ботанических садах европейской части России и Сибири, вероятнее всего, может быть использована шире в озеленении населенных пунктов России. *Ulmus* 'Columella' из-за высокой устойчивости к голландской болезни вяза, однозначно заслуживает широкого использования в зеленых насаждениях городов России.

**Вклад авторов.** А.А. Логинова проводила полевые исследования, составляла текст статьи, А.А. Егоров участвовал в уточнении таксонов, анализе литературы по распространению таксонов, составлении текста статьи, в её обсуждении и подготовке к печати. В.В. Бялт участвовал в уточнении таксонов, в обсуждении статьи, сборе данных по номенклатуре названий и подготовке статьи к печати.

**Благодарности.** Статья представляет собой вклад в выполнение государственного задания Ботанического института им. В. Л. Комарова РАН, в рамках проекта «Сосудистые растения Евразии: систематика, флористические исследования, растительные ресурсы», № АААА-А 19-119031290052-1.

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

### Библиографический список

Бялт В.В., Фирсов Г.А., Бялт А.В., Орлова Л.В. Обзор культурной флоры Санкт-Петербурга (Россия) / отв. ред. В.Т. Ярмишко. М.: БИН РАН. РОСА. 2019. 180 с.

Древесные растения главного ботанического сада АН СССР. М.: Наука, 1975. 547 с.

Древесные растения Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина РАН: 60 лет интродукции. М.: Наука. 2005. 585 с.

Информационно-поисковая система «Ботанические коллекции России и сопредельных государств» / ред. Прохоров А.А. и др. Web-мастер: Каштанов М.В., Андрусенко В.В. 1997. URL: <http://garden.karelia.ru/>, свободный.

Логинова А.А., Егоров А.А. Состав и состояние часто встречаемых древесных растений в 18 садах и парках Санкт-Петербурга // Современные проблемы и перспективы рационального лесопользования в условиях рынка: сб. матер. Междунар. науч.-практич. конференции молодых ученых и специалистов, проходившей 10–11 ноября 2010 года в Санкт-Петербургской государственной лесотехнической академии. СПб.: Изд-во СПбГЛТА. 2010. С. 38–40.

Логинова А.А., Егоров А.А., Бялт В.В., Егоров А.А. Разнообразие и динамика таксономического состава деревьев и кустарников в 7 садах и парках Санкт-Петербурга // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: матер. Всерос. науч.-технич. конференции-вебинара. С.-Петербург, 16–18 июня 2020. СПб.: Политех-Пресс, 2020. С. 169–171.

Прохоров А.А. Феномен современного видообразования в ботанических садах // *Hortus botanicus*. 2019. Т. 14. С. 30–36.

Прохоров А.А., Нестеренко М.И. Информационно-поисковая система «Коллекционные фонды ботанических садов» // *Hortus botanicus*. 2001. Т. 1. С. 78–85.

Связева О.А. Деревья, кустарники и лианы парка Ботанического сада Ботанического института имени В.Л. Комарова (К истории введения в культуру). СПб.: Росток, 2005 (СПб.: Типография «Наука»). 383 с.

Фирсов Г.А., Егоров А.А., Фадеева И.В., Бялт В.В. К вопросу об ассортименте древесных растений парков Санкт-Петербурга // *Hortus botanicus*. 2010. Т. 5. С. 1–16.

Цвелев Н.Н. Определитель сосудистых растений Северо-Западной России (Ленинградская, Псковская и Новгородская области). СПб.: Изд-во СПХВА. 2000. 780 с.

Heybroek H.M. The Dutch Elm Breeding Program // *Dutch Elm Disease Research* / eds.: Sticklen M.B., Sherald J.L. New York, USA: Springer-Verlag, 1993. P. 16–25.

Tijdgat M. 2020 *Ulmus* – Gebruikswaarde- en sortimentsonderzoek in de praktijk // *Dendroflora*. 2020. Vol. 56. P. 60–101.

## References

Byalt V.V., Firsov G.A., Byalt A.V., Orlova L.V. Overview of the cultural flora of St. Petersburg (Russia). M.: ROSA Publishing House, 2019. 180 p. (In Russ.)

Firsov G.A., Egorov A.A., Fadeeva I.V., Byalt V.V. On the issue of the assortment of woody plants in St. Petersburg parks. *Hortus Botanicus*, 2010, vol. 5, pp. 1–14. (In Russ.)

Heybroek H.M. The Dutch Elm Breeding Program. *Dutch Elm Disease Research* / eds.: Sticklen M.B., Sherald J.L. New York, USA: Springer-Verlag, 1993, pp. 16–25.

Information retrieval system «Botanical collections of Russia and neighboring states» / ed. Prokhorov A.A. and others. Webmaster: Kashtanov M.V., Andryusenko V.V. 1997. URL: <http://garden.karelia.ru/> (In Russ.)

Loginova A., Egorov A.A., Byalt V.V., Egorov A. Diversity and dynamics of the taxonomic composition of trees and shrubs in 7 gardens and parks of St. Petersburg. *Forests of Russia: politics, industry, science, education: materials of the All-Russian V scientific and technical conference-webinar*. St. Petersburg State Forestry University named after. C.M. Kirov. St. Petersburg, 2020, pp. 169–171. (In Russ.)

Loginova A.A., Egorov A.A. Composition and condition of frequently encountered woody plants in 18 gardens and parks of St. Petersburg. *Modern problems and prospects for rational forest management in market conditions: Collection of materials of the International scientific and practical conference of young scientists and specialists, held on November 10–11, 2010 in St. Petersburg State Forestry Academy*. St. Petersburg: Publishing house of St. Petersburg GLTA, 2010, pp. 38–40. (In Russ.)

Prokhorov A. The phenomenon of modern speciation in botanical gardens. *Hortus botanicus*, 2019, vol. 14, pp. 30–36. (In Russ.)

Prokhorov A.A., Nesterenko M.I. Information retrieval system «Collection funds of botanical gardens». *Hortus botanicus*, 2001, vol. 1, pp. 78–85. (In Russ.)

Svyazeva O.A. *Trees, shrubs and vines in the park of the Botanical Garden of the Botanical Institute named after V.L. Komarov* (To the history of introduction to culture). St. Petersburg: Rostock, 2005 (St. Petersburg: Printing house «Science»), 383 p. (In Russ.)

Tijdgat M. 2020 *Ulmus* – Gebruikswaarde- en sortimentsonderzoek in de praktijk. *Dendroflora*, 2020, vol. 56, pp. 60–101.

Tzvelev N.N. Manual of the vascular Plants of North-West Russia (Leningrad, Pskov and Novgorod provinces). St.-Petersburg: St.-Petersburg State Chemical-Pharmaceutical Academy Press, 2000. 781 p. (In Russ.)

Woody plants of the Main Botanical Garden named after N.V. Tsitsin RAS: 60 years of introduction. M.: Science, 2005. 585 p. (In Russ.)

Woody plants of the Main Botanical Garden of the USSR Academy of Sciences. M.: Nauka, 1975. 547 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 21.12.2023

---

**Логинова А.А., Егоров А.А., Бялт В.В.** Новые таксоны деревьев и кустарников (*Spiraea* × *schinabecki*, *Swida rugosa*, *Ulmus* ‘Columella’) в зеленых насаждениях г. Санкт-Петербурга // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 250. С. 163–175. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.163-175

Санкт-Петербург – это известный мировой центр ландшафтного искусства и прикладной ботанической науки, в котором начиная с XVIII века для испытания и озеленения привлекались разнообразные интродуцированные деревья и кустарники. Источниками пополнения ассортимента деревьев и кустарников города является в основном деятельность садово-парковых хозяйств. Поэтому в зеленых насаждениях исследователями все время отмечаются новые для города таксоны. В результате исследований, проводившихся в 2019–2023 гг. в 18 парках и садах Санкт-Петербурга, были выявлены три новых таксона древесных растений для города: кустарники *Spiraea* × *schinabecki* Zabel (спирея Шинабека) и *Swida rugosa* (Lam.) Rydb. (= *Cornus rugosa* Lam., Дерен морщинистый) и дерево *Ulmus* ‘Columella’ (Вяз гибридный Колумелла). Цель исследования: подтвердить статус находок как новых таксонов для зеленых насаждений Санкт-Петербурга и выявить их распространение и, по возможности, состояние в ботанических коллекциях России. Эти таксоны пока ещё ограниченно используются в озеленении городов России, хотя один из них – *Swida rugosa* начинал испытываться во второй половине XIX века в Санкт-Петербурге – в Ботаническом саду БИН РАН. В условиях Санкт-Петербурга эти таксоны

проявили достаточную устойчивость, имеют удовлетворительное и хорошее состояние, декоративны и могут в дальнейшем использоваться для озеленения города. А *Swida rugosa*, которая встречается в ботанических садах европейской части России и Сибири, вероятнее всего, может быть использована шире в озеленении населенных пунктов России юга лесной зоны. *Spiraea* × *schinabecki* приводится всего для двух ботанических садов. А *Ulmus* 'Columella' вероятнее всего никогда не выращивался в ботанических садах России. Однако из-за высокой устойчивости к голландской болезни вяза, однозначно заслуживает широкого использования в зеленых насаждениях городов России.

**Ключевые слова:** зеленые насаждения, Санкт-Петербург, новые таксоны, *Spiraea* × *schinabecki*, *Swida rugosa*, *Ulmus* 'Columella'.

**Loginova A.A., Egorov A.A., Byalt V.V.** New taxa of trees and shrubs (*Spiraea* × *schinabecki*, *Swida rugosa*, *Ulmus* 'Columella') in green spaces of St. Petersburg. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2024, iss. 250, pp. 163–175 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.163-175

St. Petersburg City is a famous world center of landscape art and applied botanical science, where, since the 18th century, a variety of introduced trees and shrubs have been used for testing and landscaping. The sources of replenishment of the assortment of trees and shrubs in the city are mainly the activities of gardening farms. Therefore, researchers constantly note new taxa for the city green spaces. As a result of research conducted in 2019–2023. in 18 parks and gardens of St. Petersburg, three new species of woody plants for the city were identified: shrubs *Spiraea* × *schinabecki* Zabel (Shinabek's spirea) and *Swida rugosa* (Lam.) Rydb. (= *Cornus rugosa* Lam., wrinkled dogwood) and the tree *Ulmus* 'Columella' (hybrid elm cultivar Columella). The purpose of the study: to confirm the status of the finds as new taxa for the green spaces of St. Petersburg and to identify their distribution and, if possible, condition in botanical collections of Russia. These taxa are still used to a limited extent in landscaping Russian cities, although one of them, *Swida rugosa*, began to be tested in the second half of the 19th century in St. Petersburg – in the Botanical Garden of the Komarov Botanical Institute RAS. In the conditions of St. Petersburg, these three taxa have shown sufficient stability, are in satisfactory and good condition, decorative and can be used in the future for landscaping the city. And *Swida rugosa*, which is found in botanical gardens in the European part of Russia and Siberia, most likely can be used more widely in landscaping the populated areas of Russia in the southern forest zone. *Spiraea* × *schinabecki* is given for only two botanical garden. And *Ulmus* 'Columella' most likely has never been grown in Russian botanical gardens. However, due to the high resistance to Dutch elm disease, it definitely deserves widespread use in green spaces in Russian cities.

**Keywords:** green spaces, St. Petersburg, new taxa, *Spiraea* × *schinabecki*, *Swida rugosa*, *Ulmus* 'Columella'.

**ЛОГИНОВА Александра Андреевна** – старший лаборант-исследователь с высшим образованием Ботанического института имени В.Л. Комарова РАН (БИН РАН).

197376, ул. Проф. Попова, д. 2, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: lusikss.com@mail.ru

**LOGINOVA Alexandra A.** – Senior research assistant with higher education at the Komarov Botanical Institute of RAS.

Prof. Popova str. 2. St. Petersburg. RU-197376. Russia. E-mail: lusikss.com@mail.ru

**ЕГОРОВ Александр Анатольевич** – старший научный сотрудник Института лесоведения РАН (ИЛАН РАН), ORCID 0000-0002-1800-0389; SPIN-код 9864-2862; Web of Science ResearcherID B-1381-2014; Scopus AuthorID 57218272393.

143030, ул. Советская, д. 21, п/о Успенское, Московская обл., Россия. E-mail: egorovfta@yandex.ru

**EGOROV Aleksandr A.** – Senior Researcher at the Institute of Forestry Sciences, Russian Academy of Sciences (IFS RAS). ORCID 0000-0002-1800-0389; SPIN 9864-2862; Web of Science ResearcherID B-1381-2014; Scopus AuthorID 57218272393.

143030. Sovetskaya str. 21. Uspenskoye. Moscow. Russia. E-mail: egorovfta@yandex.ru

**БЯЛТ Вячеслав Вячеславович** – старший научный сотрудник Ботанического института имени В.Л. Комарова РАН (БИН РАН), ORCID 0000-0002-2529-4389; SPIN-код: 4926-1668; Web of Science ResearcherID J-3539-2018; Scopus AuthorID 18036785700; AuthorID: 86106.

197376, ул. Проф. Попова, д. 2, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: byalt66@mail.ru, VByalt@binran.ru

**BYALT Vyacheslav V.** – Senior Researcher at the Komarov Botanical Institute of RAS, ORCID 0000-0002-2529-4389; SPIN-код: 4926-1668; Web of Science ResearcherID J-3539-2018; Scopus AuthorID 18036785700; AuthorID: 86106.

197376. Prof. Popova str. 2. St. Petersburg. RU-197376. Russia. E-mail: byalt66@mail.ru, VByalt@binran.ru

**В.А. Усольцев, И.С. Цепордей, Н.И. Плуха**

## **ВЗАИМОСВЯЗИ ДИАМЕТРОВ СТВОЛА И КРОНЫ ЛЕСООБРАЗУЮЩИХ ВИДОВ ЕВРАЗИИ**

*Введение.* Крона дерева играет важную роль в процессе обмена веществ и энергии в лесном пологе посредством перехвата солнечной энергии и регулирования газового и водного обмена [Лузганов, Солодько, 1968; Молчанов, 2007; Lowman, 2012; Lei et al., 2018]. В прикладном аспекте крона дерева является источником биологически активных веществ, лекарственного сырья и некоторых пищевых продуктов, выполняет пылеулавливающую и шумопоглощающую роль, оптимизирует микроклимат в пологе [Грищенко и др., 1985].

Количество света, поступающего к дереву, тесно связано с распределением листвы, хвои и ветвей в кроне. Крона дерева отражает видоспецифичную структуру ветвления (сформировавшуюся в ходе филогенеза), а также является многоцелевым экологическим индикатором, отражающим условия произрастания и конкуренцию за ресурсы (сформировавшиеся в ходе онтогенеза) [Panagiotidis et al., 2017; Freudenberg et al., 2022; Guo et al., 2023; Štals et al., 2023]. Диаметр кроны (ДК), как одна из характеристик, определяющих распределение листвы, хвои и ветвей в пространстве полога, имеет важное значение для понимания архитектуры деревьев и динамики лесных экосистем [Umeki, Kikuzawa, 2000; Fischer, 2019]. ДК служит важной переменной при моделировании фитомассы деревьев [Hoffmann, Usoltsev, 2002; Gülci, 2021] и объема ствола [Gonzalez-Benecke, 2014], при выводе уравнений сбега [Kalliovirta, Tokola et al., 2005; Lacerda et al., 2022], моделировании прироста площади сечений стволов [Monserud, Sterba, 1996]. Кроме того, ДК связан с энергией роста деревьев [Zarnoch, 2004], влияет на их конкурентные отношения [Krajicek et al., 1961] и интенсивность отпада деревьев [Monserud, Sterba, 1996].

На процесс формирования кроны большое влияние оказывает густота древостоя, определяющая интенсивность конкурентных отношений между деревьями [Wang et al., 2017]. Модели ДК могут быть построены по данным свободно растущих деревьев и деревьев, растущих в условиях сомкнутого насаждения [Nemery et al., 2005]. Первые предполагают максимальное ис-

пользование биологического потенциала, а вторые учитывают конкуренцию за свет и иные ресурсы. Однако те и другие модели, рассчитанные на примере пихты китайской (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook), показали недостаточную точность прогнозирования [Fu et al., 2013]. На примере эвкалипта (*Eucalyptus obliqua* L'Hér.) в Австралии было показано, что для свободно растущих деревьев ДК линейно связан с диаметром ствола, но в условиях сомкнутого насаждения важной дополнительной переменной является высота деревьев [Curtin, 1964]. Анализ возрастной динамики ДК в насаждениях сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) минимальной и максимальной густоты показал, что в приспевающем возрасте ДК в первом варианте может иметь 7-кратное превышение по отношению к второму [Алексеев, 1975]. Тем не менее, при моделировании ДК густота древостоя бывает незначимой вследствие ее корреляции с диаметром ствола, к тому же в базах данных ее значения часто отсутствуют [Усольцев, 2016].

Сегодня имеется множество моделей ДК в связи с диаметром ствола, в основном, построенных на аллометрии (степенной функции) [Lockhart et al., 2005; Бабенко и др., 2008; Russell et al., 2011; Sharma et al., 2017; Westfall et al., 2020; Wang et al., 2022; Sun et al., 2022]. Одно из первых исследований связи ДК и диаметра ствола у бука европейского (*Fagus sylvatica* L.) показало наличие линейного характера связи при коэффициенте детерминации, равном 0,92 [Duchaufour, 1903]. В ходе дальнейших исследований для многих видов в различных природных зонах было установлено, что часто соотношение двух переменных было не линейным, а сигмоидным. Положительные смещения от линейной зависимости наблюдались у деревьев с минимальным диаметром ствола по причине замера его на высоте груди, а не у основания ствола, а отрицательные смещения – у крупных деревьев вследствие достижения ими перестойного возраста. Однако в диапазоне диаметров ствола от 20 до 50 см соотношение названных переменных было линейным [Dawkins, 1963]. Было показано [Shi et al., 2017], что соотношение диаметров ствола и кроны лучше аппроксимируется не линейной или аллометрической функцией, а параболой второго порядка, которая не проходит через начало координат. Это обуславливает существенные плюсовые и минусовые смещения при малых значениях переменных [Aldred, Alemdag, 1988].

Традиционные ручные методы измерения ДК требуют значительного времени и усилий. С развитием лазерных технологий появились более совершенные методы измерения ДК, позволяющие сканировать морфологию деревьев в пределах лесного выдела [Slavík et al., 2020], а спутниковые системы зондирования позволяют идентифицировать кроны деревьев с по-

мощью специальных алгоритмов [Wagner et al., 2018; Deluzet, 2022]. Эти технологии требуют высокого уровня знаний и дорогостоящей программной и аппаратной поддержки для обеспечения точных непрерывных измерений, однако они дают возможность измерения размеров кроны у большого количества деревьев в режиме реального времени. Таким образом, распространенным и экономически эффективным вариантом является разработка моделей ДК, включающих размеры дерева в качестве легко измеряемых независимых переменных [Uzoh et al., 2008; Sönmez, 2009; Усольцев, 2016; Sharma et al., 2017; Mensah et al., 2018; Liu et al., 2023].

С другой стороны, получили распространение аллометрические модели зависимости фитомассы от диаметра ствола для разных древесных видов [Усольцев, 1971; Luo et al., 2020]. Однако при бортовой лазерной таксации деревьев, даже посредством дронов, оснащенных современным оборудованием, точная оценка диаметра ствола невозможна [Rudge et al., 2021]. Поэтому стали совмещать названные традиционные аллометрические модели с вспомогательными моделями, предназначенными для применения на основе лазерного зондирования [Kalliovirta, Tokola, 2005]. Названные вспомогательные модели оценивают диаметр ствола на высоте груди или по диаметру кроны [Ayhan, 1974; Lockhart et al., 2005; Sönmez, 2009; Hernández-Cole, 2021], или по высоте дерева и диаметру кроны [Bonnor, 1968; Dalponte, Coomes, 2016; Jucker et al., 2017; Богданов и др., 2019]. Путем совмещения вспомогательных и традиционных аллометрических моделей оценивается фитомасса деревьев, и суммированием полученных расчетом данных в пределах пробных площадей даются оценки пулов углерода [Dalponte, Coomes, 2016; Jucker et al., 2017].

В связи с двумя основными направлениями применения взаимосвязей диаметров ствола и кроны, в настоящем исследовании поставлена цель разработки для лесообразующих видов Евразии двух типов всеобщих аллометрических моделей:

- зависимости диаметра кроны от диаметра ствола;
- зависимости диаметра ствола от диаметра кроны.

*Объекты и методы исследования.* Для осуществления поставленной цели исследования из сформированной базы данных в количестве 15800 определений [Усольцев, 2023] отобраны 5570 модельных деревьев 23 видов и родов (подродов), в том числе 3100 для семи хвойных и 2470 для шестнадцати лиственных видов и родов. Результаты статистической обработки общего массива исходных данных приведены в табл. 1.



Таблица 1

**Результаты статистической обработки исходных данных****Results of statistical processing of initial data**

Статистики анализируемых показателей	$D$ , см	$D_{cr}$ , м
Среднее значение	14,1	2,81
Минимальное значение	0,20	0,07
Максимальное значение	72,9	15,50
Стандартное отклонение	9,67	1,76
Коэффициент изменчивости, %	68,6	62,7
Число наблюдений	5570	5570

*Примечание:*  $D$  и  $D_{cr}$  – соответственно диаметр ствола на высоте груди, см, и диаметр кроны, м.

При оценке и моделировании продуктивности лесных сообществ традиционно сосуществуют две концепции: локальности и всеобщности. Широкий спектр лесорастительных условий на территории России обуславливает необходимость составления локальных таблиц (нормативов) хода роста древостоев [Фалалеев, Поляков, 1975; Парамонов и др., 2021]. Но в силу изменчивости условий произрастания в пространстве и времени [Сеннов, 1983], обеспечить всё их многообразие локальными моделями и нормативами практически невозможно. Поэтому для практического применения в практике лесоустройства предложены всеобщие (унифицированные) таблицы хода роста [Загреев, 1974].

Количество аллометрических моделей фитомассы для отдельных видов исчисляется уже тысячами [Jenkins et al., 2004; Muukkonen, Mäkipää, 2006; Hosoda, Iehara, 2010; Luo et al., 2020; Парамонов и др., 2022]. В то же время получили распространение аналогичные модели, обезличенные по видовому и родовому составу [Jucker et al. 2017, 2022]. Последние развиваются в рамках концепции «больших данных». Это так называемые обобщающие (generic) модели как общевидовые, так и общеродовые. Часть их имеет теоретическое обоснование: традиционные аллометрические модели [Gould, 1966], модели теории фракталов [West et al., 1999], модели теории метаболического масштабирования [West et al., 1997], модели теории адаптивного распределения масс [Poorter et al., 2015]. Базовым для теоретических аллометрических моделей является принцип: в основе кажущейся сложности растительных объектов лежат простые правила

[Whitfield, 2001]. В целом, авторы едины в мнении, что обобщенные модели дают лучшие оценки для общей надземной фитомассы, чем оценки надземной фитомассы, полученные суммированием оценок для листвы, ветвей и стволов [Усольцев, 2016]. Другая разновидность всеобщих аллометрических моделей предлагается на основе мета-анализа опубликованных моделей. При отсутствии исходных данных метамоделирование предоставляет региональную информацию, извлекаемую из опубликованных моделей путем генерирования и обобщения псевдоданных [Усольцев и др., 2023а]. Таким образом, в зависимости от назначения тех или иных моделей, при их построении могут быть использованы концепции как локальности, так и всеобщности.

Наше исследование построено на концепции всеобщности, а именно на моделировании взаимосвязи диаметров ствола и кроны на уровне родов и подродов как совокупностей викарирующих видов, произрастающих на территории Евразии. Виды в пределах рода представлены исходными данными крайне неравномерно: например, обильно обеспечен такой двухвойный вид, как сосна обыкновенная, но практически отсутствуют данные по сосне черной (*P. nigra subsp. Pallasiana* (Lamb.) Holmboe). Также широко представлена исходными данными липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill.), но недостаточны данные по липе амурской (*T. amurensis* Rupr.) и т. д. Полностью отсутствуют данные о кедре европейском (*Pinus cembra* L.), тополе белом (*Populus alba* L.), липе сибирской (*T. sibirica* Bayer) и многих других видах. Построение моделей на уровне не только видов, но также родов и подродов, позволяет применить их в локальных условиях и заполнить имеющиеся «белые пятна» по отдельным видам. Видовой состав родов и подродов показан в нашей предыдущей публикации [Усольцев и др., 2023в].

В нашем исследовании, по аналогии с предыдущими исследователями (Gering, May, 1995), приняты два варианта структуры аллометрической модели:

$$\ln D_{cr} = a_0 + a_1(\ln D); \quad (1)$$

$$\ln D = a_0 + a_1(\ln D_{cr}). \quad (2)$$

*Результаты исследований и их обсуждение.* Результаты расчета моделей (1) и (2) представлены в табл. 2. Все регрессионные коэффициенты моделей, представленных в табл. 2, статистически значимы на уровне  $p < 0,001$ , что обеспечивает воспроизводимость полученных результатов [Guttinger, 2020]. Свободный член моделей скорректирован на логарифмическое преобразование [Baskerville, 1972].

Таблица 2

## Результаты расчета моделей (1) и (2)

## Results of calculating models (1) and (2)

№ п/п	Зависи- мая пе- ременная	Регрессионные коэффициенты модели (1)		SE	Зави- симая пе- ременная	Регрессионные коэффициенты модели (2)		SE	adjR <sup>2</sup>	n
		a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>			a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>			
1	Подрод <i>Pinus</i> L. (двухвойные сосны)									
	lnD <sub>cr</sub>	-0,6107	0,5785	0,34	lnD	1,7096	1,0717	0,46	0,620	2088
2	Род <i>Picea</i> Dietr. (ели)									
	lnD <sub>cr</sub>	-0,1413	0,4444	0,25	lnD	0,9966	1,6232	0,48	0,721	632
3	Род <i>Abies</i> Mill. (пихты)									
	lnD <sub>cr</sub>	-0,5956	0,6148	0,35	lnD	2,3332	0,6274	0,36	0,379	90
4	Подрод <i>Haploxylon</i> (Koehe) (пятихвойные сосны)									
	lnD <sub>cr</sub>	-0,4751	0,6114	0,25	lnD	1,1682	1,2650	0,36	0,771	92
5	Род <i>Larix</i> Mill. (лиственницы)									
	lnD <sub>cr</sub>	-0,4767	0,6235	0,29	lnD	1,2553	1,2692	0,42	0,790	140
6	<i>Cryptomeria japonica</i> (Thunb. ex L.f.) D.Don. (криптомерия японская)									
	lnD <sub>cr</sub>	-0,7227	0,5899	0,13	lnD	1,6334	1,2921	0,19	0,753	30
7	<i>Chamaecyparis obtusa</i> (Sieb. et Zucc.) Endl. (кипарисовик)									
	lnD <sub>cr</sub>	-0,7559	0,7246	0,17	lnD	1,3504	1,1135	0,22	0,799	28
8	Род <i>Betula</i> L. (березы)									
	lnD <sub>cr</sub>	-0,8492	0,7610	0,39	lnD	1,7196	0,8438	0,42	0,642	734
9	Род <i>Populus</i> L. (осины и тополя)									
	lnD <sub>cr</sub>	-0,4865	0,6385	0,24	lnD	1,1984	1,2429	0,34	0,793	280
10	Род <i>Alnus</i> Gaertn. (ольхи)									
	lnD <sub>cr</sub>	-0,8426	0,6744	0,37	lnD	2,0522	0,7625	0,40	0,513	405
11	Род <i>Tilia</i> L. (липы)									
	lnD <sub>cr</sub>	-1,3845	0,9275	0,46	lnD	2,3699	0,5026	0,34	0,462	130
12	Род <i>Quercus</i> L. (дубы)									
	lnD <sub>cr</sub>	0,2137	0,4485	0,46	lnD	1,8149	0,7499	0,60	0,335	390

Окончание табл. 2

№ п/п	Зависи- мая пе- ременная	Регрессионные коэффициенты модели (1)		SE	Зави- смая пере- менная	Регрессионные коэффициенты модели (2)		SE	$adjR^2$	$n$
		$a_0$	$a_1$			$a_0$	$a_1$			
13	Род <i>Fagus</i> L. (буки)									
	$\ln D_{cr}$	-0,5424	0,6441	0,30	$\ln D$	1,4556	1,0310	0,38	0,663	223
14	Род <i>Fraxinus</i> L. (ясени)									
	$\ln D_{cr}$	-0,3433	0,6121	0,32	$\ln D$	1,4059	1,1057	0,43	0,673	78
15	Род <i>Carpinus</i> L. (грабы)									
	$\ln D_{cr}$	-0,1854	0,5711	0,37	$\ln D$	1,5143	0,8919	0,46	0,504	100
16	Род <i>Salix</i> L. (ивы)									
	$\ln D_{cr}$	-0,5022	0,7461	0,08	$\ln D$	0,7066	1,3175	0,11	0,981	10
17	<i>Chosenia arbutifolia</i> (Pall.) A. Scvorts. (чозения)									
	$\ln D_{cr}$	0,1938	0,5047	0,42	$\ln D$	0,6787	1,3423	0,68	0,656	17
18	Род <i>Acer</i> L. (клены)									
	$\ln D_{cr}$	0,1138	0,6292	0,22	$\ln D$	0,9693	1,0153	0,28	0,611	15
19	<i>Robinia pseudoacacia</i> L. (робиния ложноакациевая, или акация белая)									
	$\ln D_{cr}$	-0,1119	0,4904	0,37	$\ln D$	1,8437	0,8583	0,50	0,411	60
20	<i>Phellodendron amurense</i> Rupr. (бархат амурский)									
	$\ln D_{cr}$	0,9381	0,3758	0,12	$\ln D$	-1,5331	2,1911	0,28	0,788	7
21	<i>Maackia amurensis</i> Rupr. (маакия амурская)									
	$\ln D_{cr}$	0,6510	0,4272	0,10	$\ln D$	-1,0384	2,0807	0,21	0,867	7
22	<i>Ulmus japonica</i> (Rehd.) Sarg. (вяз японский)									
	$\ln D_{cr}$	0,8460	0,3359	0,17	$\ln D$	0,1736	1,5394	0,36	0,420	7
23	<i>Juglans mandshurica</i> Maxim. (орех маньчжурский)									
	$\ln D_{cr}$	1,3456	0,2417	0,10	$\ln D$	-2,6959	2,7941	0,34	0,610	7

Примечание:  $adjR^2$  – коэффициент детерминации, скорректированный на количество переменных; SE – стандартная ошибка моделей (1) и (2);  $n$  – количество наблюдений.

В табл. 2 коэффициент детерминации идентичен для обеих моделей. Как следует из табл. 2, для некоторых родов коэффициент детерминации находится на уровне 0,34–0,38, что обусловлено влиянием неучтенных факторов, таких как густота или добротность местопроизрастания. Тем не менее, как уже отмечалось, все модели статистически значимы. Невысокие

значения коэффициента детерминации в подобных взаимосвязях в литературе нередки. Например, на высотном градиенте Южного Урала в диапазоне высот от 1210 до 1360 м над ур. м. связь диаметров кроны и ствола характеризуется коэффициентом детерминации 0,27 [Нагимов и др., 2007].

Модели (1) и (2) имеют применение, основанное на рекурсивном принципе [Четыркин, 1977]. В первом случае мы имеем построенные ранее модели зависимости фитомассы деревьев ( $P_i$ ) от ДК по данным непосредственного измерения последнего, например, с помощью дрона [Усольцев и др., 2023; 2023б]. В подобном случае модели (1) совмещаются с моделями фитомассы как связанные (рекурсивные) зависимости:

$$D_{cr} = f(D) \rightarrow P_i = f(D_{cr}). \quad (3)$$

Во втором случае имеем построенные ранее модели зависимости фитомассы деревьев от диаметра ствола по фактическим данным непосредственного измерения последнего на традиционных пробных площадях [Усольцев и др., 2022]. Совмещение моделей осуществляется аналогичным образом:

$$D = f(D_{cr}) \rightarrow P_i = f(D). \quad (4)$$

Далее выполнено ранжирование каждого из моделируемых показателей при фиксированных значениях другого (рис. 1 и 2).

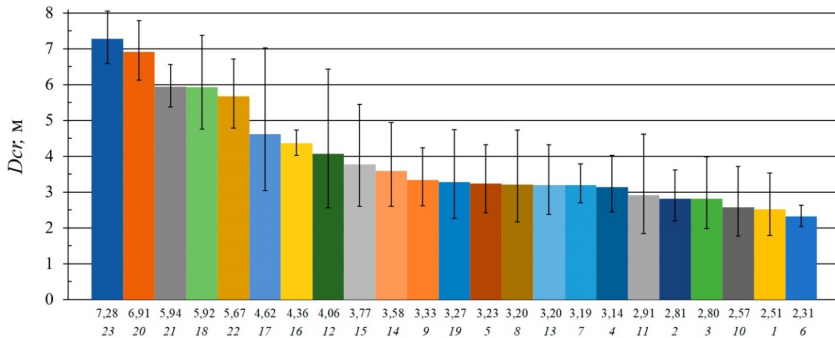


Рис. 1. Диаграмма распределения 23 видов, родов и подродов Евразии по величине диаметра кроны при среднем значении диаметра ствола на высоте груди, равном 14,1 см (табл. 1). Цифры по оси абсцисс: в верхнем ряду – значения диаметра кроны для каждого из 23 видов, родов и подродов, м; в нижнем ряду – порядковый номер вида, рода или подрода, показанный в табл. 2

Fig. 1. Diagram of the distribution of 23 species, genera and subgenera of Eurasia by crown diameter with an average stem diameter at breast height equal to 14,1 cm (Table 1). Figures on the abscissa axis: in the upper row are the crown diameter values for each of the 23 species, genera and subgenera, m; in the bottom row is the ordinal number of the species, genus or subgenus shown in Table 2

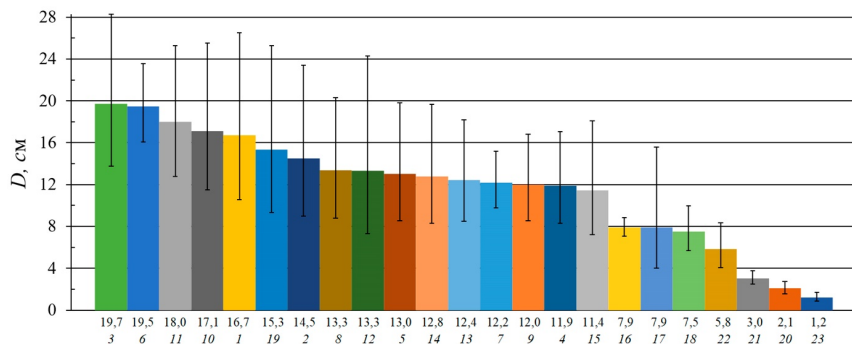


Рис. 2. Диаграмма распределения 23 видов, родов и подродов Евразии по величине диаметра ствола на высоте груди при среднем значении диаметра кроны, равном 2,81 м (табл. 1). Цифры по оси абсцисс: в верхнем ряду – значения диаметра ствола для каждого из 23 видов, родов и подродов, м; в нижнем ряду – порядковый номер вида, рода или подрода, показанный в табл. 2

Fig. 2. Diagram of the distribution of 23 species, genera and subgenera of Eurasia by stem diameter at breast height with an average crown diameter of 2,81 m (Table 1). Figures on the abscissa axis: in the upper row are the stem diameter values for each of the 23 species, genera and subgenera, m; in the bottom row is the ordinal number of the species, genus or subgenus shown in Table 2

Очевидно, что ранжирования видов, родов и подродов Евразии по двум моделируемым показателям не совпадают. Более того, по некоторым видам они прямо противоположны. Например, орех маньчжурский и бархат амурский по диаметру кроны имеют высшие ранги, а по диаметру ствола – низшие (рис. 1 и 2).

Используя технику рангового корреляционного анализа [Митропольский, 1971], выясняем степень коррелированности ранговых распределений видов, родов и подродов по двум моделируемым показателям. Оказалось, что зависимость числовых значений рангов родов по диаметру ствола от числовых значений рангов по диаметру кроны имеет обратно пропорциональный характер и выражается линейным уравнением

$$(\text{Ранг по } D) = 19,48 - 0,6235(\text{ранг по } D_{cr}); \text{adj}R^2 = 0,360; \text{SE} = 5,4. \quad (5)$$

В то же время, зависимость фактических данных диаметра ствола от диаметра кроны имеет прямо пропорциональный характер (табл. 2). Значимость коэффициента регрессии по Стьюденту в уравнении (5) составила 3,7, что превышает стандартный уровень вероятности  $P_{0,999}$ , равный 3,3.

Прямо противоположный характер связи рангов двух диаметров, с одной стороны, и фактических значений двух диаметров, с другой стороны, на фоне фактических данных показан на рис. 3.

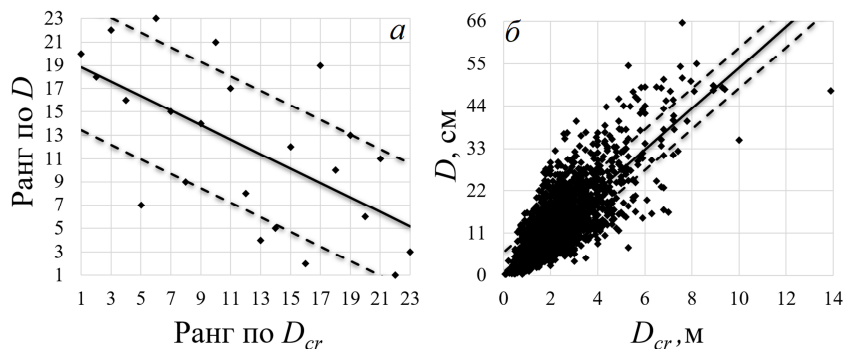


Рис. 3. Зависимость ранга рода по диаметру ствола от ранга по диаметру кроны согласно уравнению (5) (а) и зависимость фактических значений диаметра ствола от диаметра кроны по уравнению (2) для сосен, показанному в табл. 2 (б).

Пунктирными линиями показано среднеквадратическое отклонение

Fig. 3. The dependence of the rank of the genus in stem diameter upon the rank in crown diameter according to equation (5) (a) and the dependence of the actual values of stem diameter upon crown diameter according to equation (2) for pines shown in Table 2 (b). The dotted lines show the standard deviation

**Выводы.** Таким образом, по фактическим данным 3100 модельных деревьев для семи хвойных и 2470 деревьев для шестнадцати лиственных видов и родов (подродов) разработаны 23 аллометрические модели зависимости диаметра кроны от диаметра ствола и зависимости диаметра ствола от диаметра кроны, характеризующие коэффициентами детерминации в диапазоне от 0,34 (для дубов) до 0,98 (для ив). Все модели значимы на уровне  $t_{001}$  и выше. Они предназначены для совмещения с существующими моделями связи фитомассы деревьев с ДК или с диаметром ствола по рекурсивному принципу.

Выполнено ранжирование всех родов как по диаметру кроны, так и по диаметру ствола с последующим ранговым регрессионным анализом, включающим взаимозависимость двух ранговых распределений 23 родов. Установлена отрицательная связь ранговых распределений родов по диаметру кроны и по диаметру ствола, в то время как зависимость фактических данных диаметра ствола от диаметра кроны в возрастном ряду имеет

прямо пропорциональный характер. Таким образом, взаимосвязь диаметра кроны с диаметром ствола может быть как отрицательной, так и положительной, в зависимости от того или иного приложения или контекста.

*Сведения о финансировании исследования.* Работа выполнена согласно государственному заданию Ботанического сада УрО РАН.

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

### Библиографический список

- Алексеев В.А. Световой режим леса. Л.: Наука, 1975. 227 с.
- Бабенко Т.С., Нагимов З.Я., Моисеев П.А. Закономерности роста деревьев и древостоев ели сибирской в высокогорьях Южного Урала (на примере г. Малый Ирмель). Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2008. 125 с.
- Богданов А.П., Алешко Р.А., Ильинцев А.С. Выявление взаимосвязи диаметра крон деревьев с различными таксационными показателями в северо-таежном лесном районе // Вопросы лесной науки. 2019. Т. 2. № 4. С. 1–10.
- Гриценко А.В., Кучерявый В.А., Томчук Р.И., Задорожный В.В. Крона дерева: промышленное и рекреационное использование. Львов: Вища школа, 1985. 168 с.
- Загребев В.В. Всеобщие таблицы хода роста нормальных сосновых древостоев // Современное лесоустройство и таксация леса: сб. науч. трудов. М.: ВНИИЛМ, 1974. Вып. 4. С. 61–107.
- Лузанов А.Г., Солодьяко А.С. Форма кроны и рассеянный свет // ИВУЗ. Лесной журнал. 1968. № 6. С. 29–33.
- Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. М.: Наука, 1971. 576 с.
- Молчанов А.Г. Баланс CO<sub>2</sub> в экосистемах сосняков и дубрав в разных лесорастительных зонах. Тула: Гриф и К, 2007. 284 с.
- Нагимов З.Я., Бабенко Т.С., Шевченко И.Г., Рахманов И.В., Моисеев П.А. Особенности роста и формирования фитомассы древостоев ели в высокогорьях Южного Урала (на примере г. Малый Ирмель) // Хвойные бореальной зоны, 2007. Т. XXIV. № 4–5. С. 427–430.
- Парамонов А.А., Третьяков С.В., Контев С.В. Таблицы хода роста нормальных ивовых древостоев таежной зоны северо-востока европейской части России // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2021. № 2. С. 17–27.
- Парамонов А.А., Усольцев В.А., Третьяков С.В., Контев С.В., Карабан А.А., Цветков И.В., Давыдов А.В., Цепордей И.С. Биомасса деревьев ивы и ее аллометрические модели в условиях Архангельской области // Леса России и хозяйство в них. 2022. № 4. С. 10–19. DOI: 10.51318/FRET.2022.27.41.002.
- Сеннов С.Н. О методике моделирования производительности // Моделирование и контроль производительности древостоев. Каунас: ЛитСХА, 1983. С. 44–46.



Усольцев В.А. Взаимосвязь некоторых таксационных элементов кроны и ствола у березы пушистой в Северном Казахстане // Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана. 1971. № 2. С. 80–84.

Усольцев В.А. Фитомасса модельных деревьев лесообразующих пород Евразии: база данных, климатически обусловленная география, таксационные нормативы. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2016. 336 с. URL: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/5696>

Усольцев В.А. Фитомасса модельных деревьев для дистанционной и наземной таксации лесов Евразии. Электронная база данных. 3-е доп. изд-е. Екатеринбург: Ботанический сад УрО РАН, Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2023. URL: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12451>

Усольцев В.А., Цепордей И.С., Норицин Д.В. Аллометрические модели биомассы деревьев лесообразующих пород Урала // Леса России и хозяйство в них. 2022. № 1. С. 4–14. DOI: 10.51318/FRET.2022.85.72.001.

Усольцев В.А., Цепордей И.С., Парамонов А.А., Третьяков С.В., Контев С.В., Карабан А.А., Цветков И.В., Давыдов А.В., Часовских В.П. Сравнительный мета-анализ аллометрических моделей биомассы быстрорастущих лиственных пород // Биосфера. 2023а. Т. 15(1). С. 7–20. DOI: 10.24855/biosfera.v15i1.789.

Усольцев В. А., Цепордей И. С., Часовских В.П. Модели для оценки биомассы деревьев лесообразующих видов по диаметру кроны в связи с использованием дронов // Хвойные бореальной зоны. 2023б. Т. 41(4). С. 300–305. DOI: 10.53374/1993-0135-2023-4-300-305.

Усольцев В.А., Цепордей И.С. Морфология кроны лесообразующих родов Евразии: аллометрия и ранжирование // Хвойные бореальной зоны. 2023в. Т. 41. № 6. С. 504–514.

Фалалеев Э.Н, Поляков В.С. Ход роста модальных древостоев пихты Ангарского района // Ход роста основных лесообразующих пород Сибири. Красноярск: СибТИ, 1975. С. 125.

Четыркин Е.М. Статистические методы прогнозирования. М.: Статистика, 1977. 200 с.

Aldred A.H., Alemdag I.S. Guidelines for forest biomass inventory. Information Report PI-X-77. Petawawa National Forestry Institute, Canadian Forestry Service, 1988. 133 p.

Ayhan H.O. Crown diameter: dbh relations in Scots pine // Arbor. 1974. Vol. 5. P. 15–25.

Baskerville G.L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass // Canadian Journal of Forest Research. 1972. Vol. 2(1). P. 49–53.

Bonnor G.M. Stem diameter estimates from crown width and tree height // Commonwealth Forestry Review. 1968. Vol. 47. P. 8–13.

Curtin R.A. Stand density and the relationship of crown width to diameter and height in *Eucalyptus obliqua* // Australian Forestry. 1964. Vol. 28(2). P. 91–105.

Dalponte M., Coomes D.A. Tree-centric mapping of forest carbon density from air-borne laser scanning and hyperspectral data // Methods in Ecology and Evolution. 2016. Vol. 7 (10). P. 1236–1245. DOI: 10.1111/2041-210X.12575.

*Dawkins H.C.* Crown diameters: their relation to bole diameter in tropical forest trees // *Commonwealth Forestry Review*. 1963. Vol. 42. P. 318–333.

*Deluzet M., Erudel T., Briottet X., Sheeren D., Fabre S.* Individual tree crown delineation method based on multi-criteria graph using geometric and spectral information: Application to several temperate forest sites // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. Article 1083. DOI: 10.3390/rs14051083.

*Duchauffour A.* L'aménagement de la Forêt de Compiègne // *Revue Eaux et Forêt*. 1903. Vol. 42. P. 65–78.

*Fischer F.J., Maréchaux I., Chave J.* Improving plant allometry by fusing forest models and remote sensing // *New Phytologist*. 2019. Vol. 223. P. 1159–1165. DOI: 10.1111/nph.15810.

*Freudenberg M., Magdon P., Nölke N.* Individual tree crown delineation in high-resolution remote sensing images based on U-Net // *Neural Computing and Applications*. 2022. Vol. 34. P. 22197–22207. DOI: 10.1007/s00521-022-07640-4.

*Fu L., Sun H., Sharma R.P., Lei Y., Zhang H., Tang S.* Nonlinear mixed-effects crown width models for individual trees of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) in south-central China // *Forest Ecology and Management*. 2013. Vol. 302. P. 210–220. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.03.036/.

*Gering L.R., May D.M.* The relationship of diameter at breast height and crown diameter for four species groups in Hardin County, Tennessee // *Southern Journal of Applied Forestry*. 1995. Vol. 19. P. 177–181.

*Gonzalez-Benecke C.A., Gezan S.A., Samuelson L.J., Cropper W.P., Leduc D.J., Martin T.A.* Estimating *Pinus palustris* tree diameter and stem volume from tree height, crown area and stand-level parameters // *Journal of Forestry Research*. 2014. Vol. 25. P. 43–52. DOI: 10.1007/s11676-014-0427-4.

*Gould S.* Allometry and size in ontogeny and phylogeny // *Biological Reviews*. 1966. Vol. 41. P. 587–640.

*Gülci S., Akay A.E., Gülci N., Tas I.* An assessment of conventional and drone-based measurements for tree attributes in timber volume estimation: A case study on stone pine plantation // *Ecological Informatics*. 2021. Vol. 63(4). Article 101303. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2021.101303.

*Guo Q., Su Y., Hu T.* Applications of LiDAR in biodiversity conservation, ecohydrology, and ecological process modeling of forest ecosystems // *LiDAR Principles, Processing and Applications in Forest Ecology* / Guo Q., Su Y., Hu T. (eds.). Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2023. P. 407–442. DOI: 10.1016/B978-0-12-823894-3.00013-X.

*Guttinger S.* The limits of replicability // *European Journal for Philosophy of Science*. 2020. Vol. 10. P. 1–17. DOI: 10.1007/s13194-019-0269-1.

*Hemery G.E., Savill P.S., Pryor S.N.* Applications of the crown diameter–stem diameter relationship for different species of broadleaved trees // *Forest Ecology and Management*. 2005. Vol. 215. P. 285–294. DOI: 10.1016/j.foreco.2005.05.016.

*Hernández-Cole J., Ortiz-Malavassi E., Moya R., Murillo O.* Evaluation of unmanned aerial vehicles (UAV) as a tool to predict biomass and carbon of *Tectona*

*grandis* in silvopastoral systems (SPS) in Costa Rica // Drones. 2021. Vol. 5(2). Article 47. DOI: 10.3390/drones5020047.

Hoffmann C.W., Usoltsev V.A. Tree-crown biomass estimation in forest species of the Ural and of Kazakhstan // Forest Ecology and Management. 2002. Vol. 158. P. 59–69. DOI: 10.1016/S0378-1127(00)00669-1.

Hosoda K, Iehara T. Aboveground biomass equations for individual trees of *Cryptomeria japonica*, *Chamaecyparis obtusa* and *Larix kaempferi* in Japan // Journal of Forestry Research. 2010. Vol. 15(5). P. 299–306. DOI: 10.1007/s10310-010-0192-y.

Jenkins J.C., Chojnacky D.C., Heath L.S., Birdsey R.A. Comprehensive database of diameter-based regressions for North American tree species. USDA Forest Service Northeastern Research Station. General Technical Report NE-319. 2004. URL: <http://www.fs.fed.us/ne>.

Jucker T., Caspersen J., Chave J., Antin C., Barbier N., Bongers F. et al. Allometric equations for integrating remote sensing imagery into forest monitoring programs // Global Change Biology. 2017. Vol. 23. P. 177–190. DOI: 10.1111/gcb.13388.

Jucker T., Fischer F. J., Chave J., Coomes D.A., Caspersen J., Ali A. et al. Tallo: a global tree allometry and crown architecture database // Global Change Biology. 2022. Vol. 28. P. 5254–5268. DOI: 10.1111/gcb.16302.

Kalliovirta J., Tokola T. Functions for estimating stem diameter and tree age using tree height, crown width and existing stand database information // Silva Fennica. 2005. Vol. 39(2). P. 227–248. DOI: 10.14214/sf.386.

Krajicek J.E., Brinkman K.A., Gingrich S.F. Crown competition – A measure of density // Forest Science. 1961. Vol. 7. P. 35–42.

Lacerda T.H.S., Miranda E.N., Lopes I.L., Fonseca G.R., França L.C., Gomide L.R. Feature selection by genetic algorithm in nonlinear taper model // Canadian Journal of Forest Research. 2022. Vol. 52(5). P. 769–779. DOI: 10.1139/cjfr-2021-0265.

Lei Y., Fu L., Affleck D.L.R., Nelson A.S., Shen C., Wang M., Zheng J., Ye Q., Yang G. Additivity of nonlinear tree crown width models: Aggregated and disaggregated model structures using nonlinear simultaneous equations // Forest Ecology and Management. 2018. Vol. 427. P. 372–382. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.06.013.

Liu S., Wang J., Jiang L. Assessment of potential prediction and calibration methods of crown width for Dahurian larch (*Larix gmelinii* Rupr.) in Northeastern China // Forests. 2023. Vol. 14(10). Article 2022. DOI: 10.3390/f14102022.

Lockhart B.R., Weih R.C., Smith K.M. Crown radius and diameter at breast height relationships for six bottomland hardwood species // Journal of the Arkansas Academy of Science. 2005. Vol. 59. P. 110–115. URL: <http://scholarworks.uark.edu/jaas/vol59/iss1/16>.

Lowman M.D., Schowalter T.D. Plant science in forest canopies – The first 30 years of advances and challenges (1980–2010) // New Phytologist. 2012. Vol. 194(1). P. 12–27. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2012.04076.x.

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

Mensah S., Pienaar O.L., Kunneke A., Du Toit B., Seydack A., Uhl E., Pretzsch H., Seifert T. Height-diameter allometry in South Africa's indigenous high forests: Assessing generic models performance and function forms // *Forest Ecology and Management*. 2018. Vol. 410. P. 1–11. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.12.030.

Monserud R.A., Sterba H. A basal area increment model for individual trees growing in even- and uneven-aged forest stands in Austria // *Forest Ecology and Management*. 1996. Vol. 80(1-3). P. 57–80. DOI: 10.1016/0378-1127(95)03638-5.

Muukkonen P., Mäkipää R. Biomass equations for European trees: Addendum // *Silva Fennica*. 2006. Vol. 40(4). P. 763–773. URL: <http://www.metla.fi/silvafennica/full/sf40/sf404763.pdf>.

Panagiotidis D., Abdollahnejad A., Surový P., Chiteculo V. Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery // *International Journal of Remote Sensing*. 2017. Vol. 38. P. 2392–2410. DOI: 10.1080/01431161.2016.1264028.

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

Rudge M.L.M., Levick S.R., Bartolo R.E., Erskine P.D. Modelling the diameter distribution of savanna trees with drone-based LiDAR // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13(7). Article 1266. DOI: 10.3390/rs13071266.

Russell M.B., Weiskittel A.R. Maximum and largest crown width equations for 15 tree species in Maine // *Northern Journal of Applied Forestry*. 2011. Vol. 28(2). P. 84–91. DOI: 10.1093/njaf/28.2.84.

Sharma R.P., Bílek L., Vacek Z., Vacek S. Modelling crown width–diameter relationship for Scots pine in the central Europe // *Trees*. 2017. Vol. 31(6). P. 1875–1889. DOI: 10.1007/s00468-017-1593-8.

Shi J., Feng Z., Liu J. Design and experiment of high precision forest resource investigation system based on UAV remote sensing images // *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2017. Vol. 33(11). P. 82–90. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.11.011.

Slavík M., Kuželka K., Modlinger R., Tomášková I., Surový P. UAV laser scans allow detection of morphological changes in tree canopy // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. Article 3829. DOI: 10.3390/rs12223829.

Sönmez T. Diameter at breast height – crown diameter prediction models for *Picea orientalis* // *African Journal of Agricultural Research*. 2009. Vol. 4(3). P. 215–219. URL: <http://www.academicjournals.org/AJAR>.

Štals T.A., Bardule A., Duminš K., Makovskis K., Lazdina D. Remote-sensed tree crown diameter as a predictor of stem diameter and above-ground biomass in *Betula pendula* Roth and *Populus tremuloides* Michx. × *Populus tremula* L. plantations // *Land*. 2023. Vol. 12. Article 2006. DOI: 10.3390/land12112006.

Sun Z., Wang Y., Pan L., Sun Y. Hegyi competition index decomposition to improve estimation accuracy of *Larix olgensis* crown radius // *Ecological Indicators*. 2022. Vol. 143. Article 109322. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109322.

Umeki K., Kikuzawa K. Patterns in individual growth, branch population dynamics, and growth and mortality of first-order branches of *Betula platyphylla* in northern Japan // Annals of Forest Science. 2000. Vol. 57. P. 587–598. DOI: 10.1051/forest:2000144.

Uzoh F.C.C., Oliver W.W. Individual tree diameter increment model for managed even-aged stands of ponderosa pine throughout the western United States using a multilevel linear mixed effects model // Forest Ecology and Management. 2008. Vol. 256. P. 438–445. DOI: 10.1016/j.foreco.2005.09.012.

Wagner F.H., Ferreira M.P., Sanchez A., Hirye M.C.M., Zortea M., Gloor E., Phillips O.L., de Souza Filho C.R., Shimabukuro Y.E., Aragão L.E.O.C. Individual tree crown delineation in a highly diverse tropical forest using very high resolution satellite images // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2018. Vol. 145. P. 362–377. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.09.013.

Wang C.-S., Zeng J., Hein S., Zhao Z., Guo J.-J., Zeng J. Crown and branch attributes of mid-aged *Betula alnoides* plantations in response to planting density // Scandinavian Journal of Forest Research. 2017. Vol. 32(8). P. 679–687. DOI: 10.1080/02827581.2016.1261936.

Wang J., Jiang L., Yan Y. The impacts of climate, competition, and their interactions on crown width for three major species in Chinese boreal forests // Forest Ecology and Management. 2022. Vol. 526(12). Article 120597. DOI: 10.1016/j.foreco.2022.120597.

West G.B., Brown J.H., Enquist B.J. A general model for the origin of allometric scaling laws in biology // Science. 1997. Vol. 276. P. 122–126. DOI: 10.1126/science.276.5309.122.

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

Westfall J.A., Nowak D.J., Henning J.G., Lister T.W., Edgar C.B., Majewsky M.A., Sonti N.F. Crown width models for woody plant species growing in urban areas of the U.S // Urban Ecosystems. 2020. Vol. 23. P. 905–917. DOI: 10.1007/s11252-020-00988-2.

Whitfield J. All creatures great and small // Nature. 2001. Vol. 413. P. 342–344. DOI: 10.1038/35096683.

Zarnoch S.J., Bechtold W.A., Stolte K.W. Using crown condition variables as indicators of forest health // Canadian Journal of Forest Research. 2004. Vol. 34. P. 1057–1070. DOI: 10.1139/x03-277

## References

Aldred A.H., Alemdag I.S. Guidelines for forest biomass inventory. Information Report PI-X-77. Petawawa National Forestry Institute; Canadian Forestry Service, 1988. 133 p.

Alekseev V.A. Light regime of the forest. L.; Nauka, 1975. 227 p. (In Russ.)

Ayhan H.O. Crown diameter: dbh relations in Scots pine. *Arbor*, 1974, vol. 5, pp. 15–25.

Babenko T.S., Nagimov Z.Ya., Moiseev P.A. Patterns of growth of trees and stands of Siberian spruce in the highlands of the Southern Urals (on the example of the town of Maly Iremel). Yekaterinburg; Ural State Forestry Engineering University, 2008. 125 p. (In Russ.)

Baskerville G.L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. *Canadian Journal of Forest Research*, 1972, vol. 2(1), pp. 49–53.

Bogdanov A.P., Aleshko R.A., Ilyintsev A.S. Identification of the relationship of the diameter of tree crowns with various taxation indicators in the North taiga forest area. *Questions of forest Science*, 2019, vol. 2(4), pp. 1–10 (In Russ.)

Bonnor G.M. Stem diameter estimates from crown width and tree height. *Commonwealth Forestry Review*, 1968, vol. 47, pp. 8–13.

Chetyrkin E.M. Statisticheskie metody prognozirovaniya (Statistical forecasting methods), M.; Statistika, 1977. 200 p. (In Russ.)

Curtin R.A. Stand density and the relationship of crown width to diameter and height in *Eucalyptus obliqua*. *Australian Forestry*, 1964, vol. 28(2), pp. 91–105.

Dalponte M., Coomes D.A. Tree-centric mapping of forest carbon density from air-borne laser scanning and hyperspectral data. *Methods in Ecology and Evolution*, 2016, vol. 7(10), pp. 1236–1245. DOI: 10.1111/2041-210X.12575.

Dawkins H.C. Crown diameters: their relation to bole diameter in tropical forest trees. *Commonwealth Forestry Review*, 1963, vol. 42, pp. 318–333.

Deluzet M., Erudel T., Briottet X., Sheeren D., Fabre S. Individual tree crown delineation method based on multi-criteria graph using geometric and spectral information: Application to several temperate forest sites. *Remote Sensing*, 2022, vol. 14, article 1083. DOI: 10.3390/rs14051083.

Duchaufour A. L'aménagement de la Forêt de Compiègne. *Revue Eaux et Forêt*, 1903, vol. 42, pp. 65–78.

Falaleev E.N., Polyakov V.S. The course of growth of modal fir stands of the Angarsk district. In: *The course of growth of the main forest-forming species of Siberia*. Krasnoyarsk: SibTI, 1975, p. 125. (In Russ.)

Fischer F.J., Maréchaux I., Chave J. Improving plant allometry by fusing forest models and remote sensing. *New Phytologist*, 2019, vol. 223, pp. 1159–1165. DOI: 10.1111/nph.15810.

Freudenberg M., Magdon P., Nölke N. Individual tree crown delineation in high-resolution remote sensing images based on U-Net. *Neural Computing and Applications*, 2022, vol. 34, pp. 22197–22207. DOI: 10.1007/s00521-022-07640-4.

Fu L., Sun H., Sharma R.P., Lei Y., Zhang H., Tang S. Nonlinear mixed-effects crown width models for individual trees of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) in south-central China. *Forest Ecology and Management*, 2013, vol. 302, pp. 210–220. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.03.036/.

Gering L.R., May D.M. The relationship of diameter at breast height and crown diameter for four species groups in Hardin County, Tennessee. *Southern Journal of Applied Forestry*, 1995, vol. 19, pp. 177–181.

Gonzalez-Benecke C.A., Gezan S.A., Samuelson L.J., Cropper W.P., Leduc D.J., Martin T.A. Estimating *Pinus palustris* tree diameter and stem volume from tree height, crown area and stand-level parameters. *Journal of Forestry Research*, 2014, vol. 25, pp. 43–52. DOI: 10.1007/s11676-014-0427-4.

Gould S. Allometry and size in ontogeny and phylogeny. *Biological Reviews*, 1966, vol. 41, pp. 587–640.

Grishchenko A.V., Kucheryavy V.A., Tomchuk R.I., Zadorozhny V.V. Tree crown: industrial and recreational use. Lviv; Vishcha shkola, 1985. 168 p. (In Russ.)

Gülci S., Akay A.E., Gülci N., Tas I. An assessment of conventional and drone-based measurements for tree attributes in timber volume estimation: A case study on stone pine plantation. *Ecological Informatics*, 2021, vol. 63(4), article 101303. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2021.101303.

Guo Q., Su Y., Hu T. Applications of LiDAR in biodiversity conservation, ecohydrology, and ecological process modeling of forest ecosystems. In: *LiDAR Principles, Processing and Applications in Forest Ecology* / Guo Q., Su Y., Hu T. (eds.). Academic Press; Cambridge, MA, USA, 2023, pp. 407–442. DOI: 10.1016/B978-0-12-823894-3.00013-X.

Guttinger S. The limits of replicability. *European Journal for Philosophy of Science*, 2020, vol. 10, pp. 1–17. DOI: 10.1007/s13194-019-0269-1.

Hemery G.E., Savill P.S., Pryor S.N. Applications of the crown diameter–stem diameter relationship for different species of broadleaved trees. *Forest Ecology and Management*, 2005, vol. 215, pp. 285–294. DOI: 10.1016/j.foreco.2005.05.016.

Hernández-Cole J., Ortiz-Malavassi E., Moya R., Murillo O. Evaluation of unmanned aerial vehicles (UAV) as a tool to predict biomass and carbon of *Tectona grandis* in silvopastoral systems (SPS) in Costa Rica. *Drones*, 2021, vol. 5(2), article 47. DOI: 10.3390/drones5020047.

Hoffmann C.W., Usoltsev V.A. Tree-crown biomass estimation in forest species of the Ural and of Kazakhstan. *Forest Ecology and Management*, 2002, vol. 158, pp. 59–69. DOI: 10.1016/S0378-1127(00)00669-1.

Hosoda K., Iehara T. Aboveground biomass equations for individual trees of *Cryptomeria japonica*, *Chamaecyparis obtusa* and *Larix kaempferi* in Japan. *Journal of Forestry Research*, 2010, vol. 15(5), pp. 299–306. DOI: 10.1007/s10310-010-0192-y.

Jenkins J.C., Chojnacky D.C., Heath L.S., Birdsey R.A. Comprehensive database of diameter-based regressions for North American tree species. USDA Forest Service Northeastern Research Station. General Technical Report NE-319; 2004. 47 p. URL: <http://www.fs.fed.us/ne>.

Jucker T., Caspersen J., Chave J., Antin C., Barbier N., Bongers F. et al. Allometric equations for integrating remote sensing imagery into forest monitoring programs. *Global Change Biology*, 2017, vol. 23, pp. 177–190. DOI: 10.1111/gcb.13388.

Jucker T., Fischer F. J., Chave J., Coomes D.A., Caspersen J., Ali A. et al. Tallo: a global tree allometry and crown architecture database. *Global Change Biology*, 2022, vol. 28, pp. 5254–5268. DOI: 10.1111/gcb.16302.

Kalliovirta J., Tokola T. Functions for estimating stem diameter and tree age using tree height, crown width and existing stand database information. *Silva Fennica*, 2005, vol. 39(2), pp. 227–248. DOI: 10.14214/sf.386.

Krajicek J.E., Brinkman K.A., Gingrich S.F. Crown competition – A measure of density. *Forest Science*, 1961, vol. 7, pp. 35–42.

Lacerda T.H.S., Miranda E.N., Lopes I.L., Fonseca G.R., França L.C., Gomide L.R. Feature selection by genetic algorithm in nonlinear taper model. *Canadian Journal of Forest Research*, 2022, vol. 52(5), pp. 769–779. DOI: 10.1139/cjfr-2021-0265.

Lei Y., Fu L., Affleck D.L.R., Nelson A.S., Shen C., Wang M., Zheng J., Ye Q., Yang G. Additivity of nonlinear tree crown width models: Aggregated and disaggregated model structures using nonlinear simultaneous equations. *Forest Ecology and Management*, 2018, vol. 427, pp. 372–382. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.06.013.

Liu S., Wang J., Jiang L. Assessment of potential prediction and calibration methods of crown width for Dahurian larch (*Larix gmelinii* Rupr.) in Northeastern China. *Forests*, 2023, vol. 14(10), article 2022. DOI: 10.3390/f14102022.

Lockhart B.R., Weih R.C., Smith K.M. Crown radius and diameter at breast height relationships for six bottomland hardwood species. *Journal of the Arkansas Academy of Science*, 2005, vol. 59, pp. 110–115. URL: <http://scholarworks.uark.edu/jaas/vol59/iss1/16>.

Lowman M.D., Schowalter T.D. Plant science in forest canopies – The first 30 years of advances and challenges (1980–2010). *New Phytologist*, 2012, vol. 194(1), pp. 12–27. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2012.04076.x.

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

Luzganov A.G., Solod'ko A.S. Crown shape and scattered light. *IVUZ. Forestry Journal*, 1968, no. 6, pp. 29–33. (In Russ.)

Mensah S., Pienaar O.L., Kunneke A., Du Toit B., Seydack A., Uhl E., Pretzsch H., Seifert T. Height-diameter allometry in South Africa's indigenous high forests: Assessing generic models performance and function forms. *Forest Ecology and Management*, 2018, vol. 410, pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.12.030.

Mitropolsky A.K. Technique of statistical computations. M.: Nauka, 1971. 576 p. (In Russ.)

Molchanov A.G. CO<sub>2</sub> balance in ecosystems of pine forests and oak forests in different forest zones. Tula; Grif and K, 2007. 284 p. (In Russ.)

Monserud R.A., Sterba H. A basal area increment model for individual trees growing in even- and uneven-aged forest stands in Austria. *Forest Ecology and Management*, 1996, vol. 80(1-3), pp. 57–80. DOI: 10.1016/0378-1127(95)03638-5.

Muukkonen P., Mäkipää R. Biomass equations for European trees: Addendum. *Silva Fennica*, 2006, vol. 40(4), pp. 763-773. URL: <http://www.metla.fi/silvafennica/full/sf40/sf404763.pdf>.

Nagimov Z.Ya., Babenko T.S., Shevchenko I.G., Rakhmanov I.V., Moiseev P.A. Features of growth and formation of phytomass of spruce stands in the highlands of the Southern Urals (on the example of the town of Maly Iremel). *Conifers of the boreal area*, 2007, vol. XXIV, iss. 4–5, pp. 427–430. (In Russ.)

Panagiotidis D., Abdollahnejad A., Surový P., Chiteculo V. Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery, *International Journal of Remote Sensing*, 2017, vol. 38, pp. 2392–2410. DOI: 10.1080/01431161.2016.1264028.



Paramonov A.A., Tretyakov S.V., Koptev S.V. Yield tables of normal willow stands of the taiga zone of the north-east of the European part of Russia. *Proceedings of the St. Petersburg Scientific Research Institute of Forestry*, 2021, No. 2, pp. 17–27. (In Russ.)

Paramonov A.A., Usoltsev V.A., Tretyakov S.V., Koptev S.V., Karaban A.A., Tsvetkov I.V., Davydov A.V., Tsepordey I.S. Biomass of willow trees and its allometric models in the conditions of the Arkhangelsk region. *Forests of Russia and the economy in them*, 2022, No. 4, pp. 10–19. DOI: 10.51318/FRET.2022.27.41.002. (In Russ.)

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

Rudge M.L.M., Levick S.R., Bartolo R.E., Erskine P.D. Modelling the diameter distribution of savanna trees with drone-based LiDAR. *Remote Sensing*, 2021, vol. 13(7), article 1266. DOI: 10.3390/rs13071266.

Russell M.B., Weiskittel A.R. Maximum and largest crown width equations for 15 tree species in Maine. *Northern Journal of Applied Forestry*, 2011, vol. 28(2), pp. 84–91. DOI: 10.1093/njaf/28.2.84.

Senov S.N. On the methodology of yield modeling // Modeling and monitoring the yield of stands. Kaunas: LitSHA, 1983, pp. 44–46. (In Russ.)

Sharma R.P., Bilek L., Vacek Z., Vacek S. Modelling crown width–diameter relationship for Scots pine in the central Europe. *Trees*, 2017, vol. 31(6), pp. 1875–1889. DOI: 10.1007/s00468-017-1593-8.

Shi J., Feng Z., Liu J. Design and experiment of high precision forest resource investigation system based on UAV remote sensing images. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, vol. 33(11), pp. 82–90. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.11.011.

Slavik M., Kuželka K., Modlinger R., Tomášková I., Surový P. UAV laser scans allow detection of morphological changes in tree canopy. *Remote Sensing*, 2020, vol. 12, article 3829. DOI: 10.3390/rs12223829.

Sönmez T. Diameter at breast height – crown diameter prediction models for *Picea orientalis*. *African Journal of Agricultural Research*, 2009, vol. 4(3), pp. 215–219. URL: <http://www.academicjournals.org/AJAR>.

Štals T.A., Bardule A., Dumīņš K., Makovskis K., Lazdina D. Remote-sensed tree crown diameter as a predictor of stem diameter and above-ground biomass in *Betula pendula* Roth and *Populus tremuloides* Michx. × *Populus tremula* L. plantations. *Land*, 2023, vol. 12, article 2006. DOI: 10.3390/land12112006.

Sun Z., Wang Y., Pan L., Sun Y. Hegyi competition index decomposition to improve estimation accuracy of *Larix olgensis* crown radius. *Ecological Indicators*, 2022, vol. 143, article 109322. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109322.

Umeki K., Kikuzawa K. Patterns in individual growth, branch population dynamics, and growth and mortality of first-order branches of *Betula platyphylla* in northern Japan. *Annals of Forest Science*, 2000, vol. 57, pp. 587–598. DOI: 10.1051/forest:2000144.

Usoltsev V.A. Interrelation of some taxation elements of the crown and stem of the *Betula pubescens* in Northern Kazakhstan. *Bulletin of Agricultural Science of Kazakhstan*, 1971, No. 2, pp. 80–84. (In Russ.)

Usoltsev V.A. Phytomass of model trees of forest-forming species of Eurasia: database, climatically determined geography, taxation standards. Yekaterinburg; Ural State Forest Engineering University, 2016. 336 p. URL: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/5696>. (In Russ.)

Usoltsev V.A. Single-tree biomass data for remote sensing and ground measuring of Eurasian forests: digital version. The third edition, enlarged. Yekaterinburg; Botanical Garden of Ural Branch of RAS, 2023 (CD-ROM). URL: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12451>. (In Russ.)

Usoltsev V.A., Tsepordey I.S., Noritsin D.V. Allometric models of single-tree biomass for forest-forming species of the Urals. *Forests of Russia and economy in them*, 2022, № 1, pp. 4–14. DOI: 10.51318/FRET.2022.85.72.001. (In Russ.)

Usoltsev V.A., Tsepordey I.S., Paramonov A.A., Tretyakov S.V., Koptev S.V., Karaban A.A., Tsvetkov I.V., Davydov A.V., Chasovskikh V.P. Comparative meta-analysis of allometric models of biomass of fast-growing hardwoods. *Biosphere*, 2023a, vol. 15(1), pp. 7–20. DOI: 10.24855/biosfera.v15i1.789. (In Russ.)

Usoltsev V.A., Tsepordey I.S., Chasovskikh V.P. Models for estimating biomass of forest-forming species by crown diameter as related to drone involving. *Conifers of the boreal area*, 2023b, vol. 41(4), pp. 300–305. DOI: 10.53374/1993-0135-2023-4-300-305. (In Russ.)

Usoltsev V.A., Tsepordey I.S. Crown morphology of forest-forming genera of Eurasia: allometry and ranking. *Conifers of the boreal area*, 2023c, vol. 41, no. 6. P. 504–514. (In Russ.)

Uzoh F.C.C., Oliver W.W. Individual tree diameter increment model for managed even-aged stands of ponderosa pine throughout the western United States using a multilevel linear mixed effects model. *Forest Ecology and Management*, 2008, vol. 256, pp. 438–445. DOI: 10.1016/j.foreco.2005.09.012.

Wagner F.H., Ferreira M.P., Sanchez A., Hirye M.C.M., Zortea M., Gloor E., Phillips O.L., de Souza Filho C.R., Shimabukuro Y.E., Aragão L.E.O.C. Individual tree crown delineation in a highly diverse tropical forest using very high resolution satellite images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, vol. 145, pp. 362–377. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.09.013.

Wang C.-S., Zeng J., Hein S., Zhao Z., Guo J.-J., Zeng J. Crown and branch attributes of mid-aged *Betula alnoides* plantations in response to planting density. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2017, vol. 32(8), pp. 679–687. DOI: 10.1080/02827581.2016.1261936.

Wang J., Jiang L., Yan Y. The impacts of climate, competition, and their interactions on crown width for three major species in Chinese boreal forests. *Forest Ecology and Management*, 2022, vol. 526(12), article 120597. DOI: 10.1016/j.foreco.2022.120597.

West G.B., Brown J.H., Enquist B.J. A general model for the origin of allometric scaling laws in biology. *Science*, 1997, vol. 276, pp. 122–126. DOI: 10.1126/science.276.5309.122.

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

Westfall J.A., Nowak D.J., Henning J.G., Lister T.W., Edgar C.B., Majewsky M.A., Sonti N.F. Crown width models for woody plant species growing in urban areas of the U.S. *Urban Ecosystems*, 2020, vol. 23, pp. 905–917. DOI: 10.1007/s11252-020-00988-2.

Whitfield J. All creatures great and small. *Nature*, 2001, vol. 413, pp. 342–344. DOI: 10.1038/35096683.

Zagreev V.V. Generic yield tables of normal pine stands. *Modern forest management and forest taxation* : collection of scientific works. М.: VNIILM, 1974, iss. 4, pp. 61–107. (In Russ.)

Zarnoch S.J., Bechtold W.A., Stolt K.W. Using crown condition variables as indicators of forest health. *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, vol. 34, pp. 1057–1070. DOI: 10.1139/x03-277.

Материал поступил в редакцию 22.11.2023

---

**Усольцев В.А., Цепордей И.С., Плюха Н.И.** Взаимосвязи диаметров ствола и кроны лесообразующих видов Евразии // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 250. С. 176–199. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.176-199

В связи с изменением климата и потенциальной возможностью его стабилизации с помощью управляемых лесов и оценки их углероддепонирующей способности, особую актуальность приобретает возможность оперативной оценки фитомассы и органического углерода лесного покрова. Технологии дистанционного зондирования лесов на основе беспилотных летательных аппаратов позволили получать значения параметров крон деревьев с максимально близкого расстояния, что обеспечивает высокую адекватность моделей для оценки фитомассы деревьев по диаметру кроны. Наряду с ними опубликованы тысячи аллометрических моделей для оценки фитомассы деревьев по диаметру ствола. Для их совмещения необходимо знание взаимосвязей диаметров ствола и кроны. По фактическим данным 3100 модельных деревьев для семи хвойных и 2470 деревьев для шестнадцати лиственных видов и родов (подродов) разработаны 23 аллометрические модели зависимости диаметра кроны от диаметра ствола и зависимости диаметра ствола от диаметра кроны, значимые на уровне  $t_{0.01}$  и выше. Первые предназначены для совмещения с опубликованными моделями фитомассы деревьев в связи с диаметром кроны, а вторые – для совмещения с опубликованными моделями фитомассы в связи с диаметром ствола. Выполнено ранжирование всех родов как по диаметру кроны, так и по диаметру ствола с последующим ранговым регрессионным анализом, включающим взаимозависимость двух ранговых распределений 23 родов. Установлена отрицательная связь ранговых распределений родов по диаметру кроны и по диаметру ствола, в то время как зависимость фактических данных диаметра ствола от диаметра кроны имеет прямо пропорциональный характер. Таким образом,

взаимосвязь диаметра кроны с диаметром ствола может быть как отрицательной, так и положительной, в зависимости от того или иного приложения и контекста.

**Ключевые слова:** фитомасса деревьев, дистанционное зондирование крон, аллометрические модели, рекурсивный принцип.

**Usoltsev V.A., Tsepordey I.S., Plyukha N.I.** Interrelations of stem and crown diameters of forest-forming species of Eurasia. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2024, iss. 250, pp. 176–199 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.176-199

Due to climate change and the potential possibility of its stabilization with the help of managed forests and assessment of their carbon depositing capacity, the possibility of operational assessment of phytomass and organic carbon of forest cover is of particular relevance. Remote sensing of forests based on unmanned aerial vehicles made it possible to obtain the parameters of tree crowns from as close a distance as possible, which ensures high adequacy of models for assessing the phytomass of trees by crown diameter. Along with them, thousands of allometric models have been published to estimate the phytomass of trees by stem diameter. To combine them, it is necessary to know the interrelationships of the stem and crown diameters. When using the empirical data of 3,100 model trees for seven coniferous and 2,470 trees for sixteen deciduous species and genera (subgenera), 23 allometric models of crown diameter versus stem diameter and stem diameter versus crown diameter have been developed, significant at the level of  $t_{001}$  and higher. The first ones are designed to be combined with published models of phytomass of trees in connection with the crown diameter, and the second ones are designed to be combined with published models of phytomass in connection with the stem diameter. All genera were ranked both by crown diameter and stem diameter, followed by rank regression analysis, including the interdependence of two rank distributions of 23 genera. A negative relationship has been established between the rank distributions of genera by crown diameter and stem diameter, while the dependence of the empirical data of stem diameter on crown diameter is of positive relationship. Thus, the relationship of the crown diameter with the stem diameter can be either negative or positive, depending on a particular application and context.

**Key words:** phytomass of trees, remote sensing of crowns, allometric models, recursive principle.

---

**УСОЛЬЦЕВ Владимир Андреевич** – заслуженный лесовод России, профессор кафедры лесной таксации и лесоустройства Института леса и природопользования Уральского государственного лесотехнического университета, главный научный сотрудник Ботанического сада УрО РАН; научный сотрудник Уральского государственного экономического университета, доктор сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 3668-6843.

620100, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: Usoltsev50@mail.ru

**USOLTSEV Vladimir A.** – DSc (Agriculture), professor of the Department of Forest Taxation and Forest Management, Ural State Forest Engineering University, chief researcher at the Botanical Garden, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, scientist of the Ural State Economic University. SPIN-code: 3668-6843.

620100. Sibirskiy Trakt str. 37. Yekaterinburg, Russia. E-mail: Usoltsev50@mail.ru

**ЦЕПОРДЕЙ Иван Степанович** – старший научный сотрудник Ботанического сада УрО РАН, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 3853-7684.

620144, ул. 8 Марта, д. 202а. г. Екатеринбург, Россия. E-mail: ivan.tsepordey@yandex.ru

**TSEPORDEY Ivan S.** – PhD (Agriculture), senior researcher at Botanical Garden of Ural Branch of RAS. SPIN-code: 3853-7684.

620144. 8 Marta str. 202a. Yekaterinburg. Russia. E-mail: ivan.tsepordey@yandex.ru

**ПЛЮХА Николай Иванович** – аспирант кафедры лесной таксации и лесоустройства Уральского государственного экономического университета.

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

**PLYUKHA Nikolay I.** – PhD student of the Department of Forest Taxation and Forest Management at the Ural State Economic University.

620100. Sibirskiy trakt str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: nikeskript@mail.ru

**Н.В. Примаков**

**ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ УГОДИЙ  
В АГРОЛЕСОЛАНДШАФТАХ  
НА ПРОДУКТИВНОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР**

*Введение.* 2022 год характеризуется большим количеством катаклизмов. Засуха на Европейском и других континентах приводит к недобору урожая. Из данных доклада совместного исследовательского центра ЕК «Засуха в Европе – июль 2022 года» недостаток влаги и температурная нагрузка приводят к снижению урожайности сельскохозяйственных культур. Результаты засухи отразились на таких странах, как Россия, Испания, Италия, Португалия, Румыния, Франция, Венгрия, Германия, Словения, Польша, Хорватия и др. Между тем проблему изучения данного явления и выработки мероприятий по предотвращению его распространения изучают несколько веков [Павловский, 1982; Abbas et al., 2017; Bachmair et al., 2015; Climate Change, 2021; Cano et al., 2022; Hombegowda et al., 2020; Pillow et al., 2021].

В России наиболее известные труды представлены в работах Докучаева. Большой вклад в изучение этого явления представлены в работах [Ерусалимский, Рожков, 2017; Науменко и др., 2005]. Все большее количество исследователей высказывают мнение о комплексном подходе к решению данной проблемы [Панов, 2021; Примаков, 2021; Примаков, 2007; Примаков, 2019; Шипилова, 2022]. Одним из составляющих звеньев рассматриваемого подхода является определение оптимального соотношения между сельскохозяйственными угодьями, что в свою очередь приведет к снижению развития неблагоприятных явлений в агроландшафтах, а следовательно, и повышению урожайности сельскохозяйственных культур.

Агролесомелиорация оказывает комплексное мелиоративное влияние в агролесоландшафтах, адаптирует термический и гидрологический режимы полей, имеет длительное воздействие при своевременном уходе за защитными лесными насаждениями [Беляев, Кулик, 2022; Кулик и др., 2019; Рулев, Пугачева, 2019; Чеплянский и др., 2022; Siminski, 2016; Singh et al., 2022]. Нами для исследования влияния соотношения сельскохозяйственных угодий Краснодарского края на распределение полей разного уровня плодородия были проведены исследования в 2022 году. Для проведения исследования были выбраны районы: Динской, Северский и Мостовской.

*Цель исследования* – изучение влияния соотношения угодий в агроландшафтах на продуктивность сельскохозяйственных культур на территории Краснодарского края с применением программы «Агроном Онлайн» на базе сервиса СкайСкаут.

*Материалы и методика исследования.* Перед выбором районов исследования нами было рассмотрено агролесомелиоративное районирование территории Краснодарского края, изучено состояние угодий агроландшафтов районов по литературным источникам и статистическим данным. Для анализа распределения площадей полей разного уровня плодородия в выбранных районах в агроландшафтах с использованием программы «Агроном Онлайн» на базе сервиса СкайСкаут строились карты с выделением зон плодородия: низкая, средняя и высокая. Выделение зон плодородия осуществлялось по нормализованному вегетационному индексу NDVI. Кривая отражения имеет максимум в инфракрасной области и минимум в красных областях спектра электромагнитного излучения. Анализировались снимки за 9 летней период для культуры озимая пшеница.

*Результаты исследований.* Динской район располагается в центральной части Краснодарского края, относится к первому агролесомелиоративному району. Площадь района составляет 136,2 тыс. га. Основными почвами являются черноземы выщелочные среднегумусные и малогумусные сверхмощные и мощные. Среднее содержание питательных элементов в почве: гумуса 3,3%, подвижного фосфора 435 мг/кг, обменного калия 3,4 мг/кг.

Применение программного продукта «Агроном Онлайн» позволило сформировать карту-схему по ранжированию зон плодородия полей Динского района (рис. 1). Из представленного графического изображения (рис. 1) распределения зон плодородия полей следует, что в данном районе преобладают поля с средней степенью плодородия.

Северский район расположен в юго-западной части Краснодарского края, относится ко второму агролесомелиоративному району. Площадь района составляет 212 тыс. га. Почвенный покров преимущественно представлен черноземами выщелоченными уплотненными. Среднее содержание питательных элементов в почве: гумуса 3,1%, подвижного фосфора 46 мг/кг, обменного калия 363 мг/кг.

Формирование карты-схемы по ранжированию зон плодородия полей Северского района представлено на рис. 2. Из рисунка следует, что наибольшее количество зон продуктивности района относится также к средней.



Рис. 1. Карта-схема зон плодородия полей Динского района

Fig. 1. Map-diagram of the fertility zones of the fields of the Dinsky district

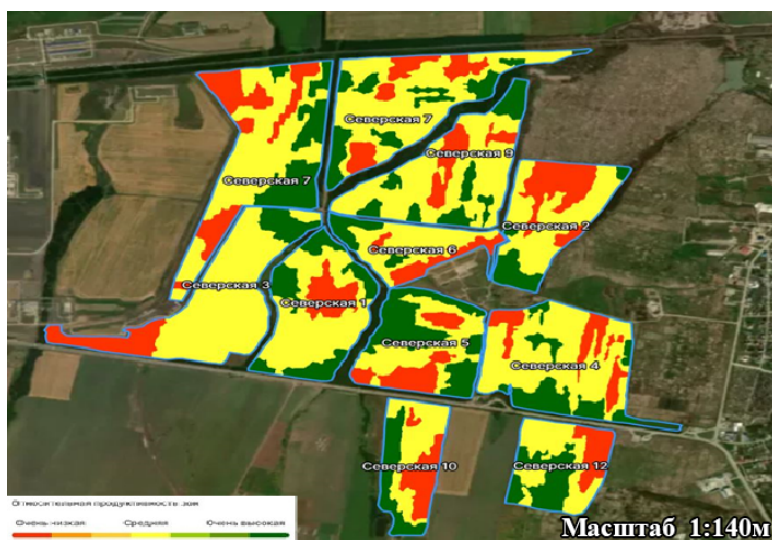


Рис. 2. Карта-схема зон плодородия полей Северского района

Fig. 2. Map-diagram of the fertility zones of the fields of the Sever'sky district



Мостовской район расположен на юге Краснодарского края, относится к третьему агролесомелиоративному району. Площадь района составляет 136,2 тыс. га. Основными почвами являются черноземы, которые представлены карбонатами, выщелочными, слабовыщелочными, уплотненными и слитыми видами. Среднее содержание питательных элементов в почве: гумус 2,5%, подвижного фосфора 402 мг/кг, обменного калия 4,5 мг/кг.

Карта-схема по ранжированию зон плодородия полей Мостовского района представлена на рис. 3. Из рисунка следует, что наибольшее количество зон продуктивности района относится к средней. Из представленного графического изображения распределения зон плодородия полей следует, что в данном районе преобладают поля с средней степенью плодородия.

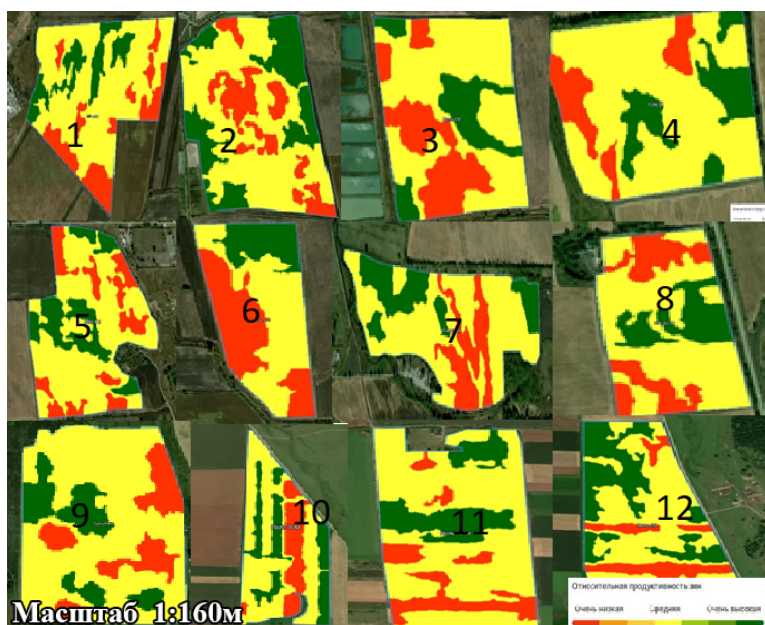


Рис. 3. Карта-схема зон плодородия полей Мостовского района

Fig. 3. The map-scheme of the zones of fertility of the fields of the Mostovskiy district

Средние значения соотношения площадей полей зон разного плодородия представлены в табл. 1. Из таблицы следует, что в среднем по региону количество плодородных зон пашни составляет 46,09%, низко плодородных 25,68%, высокоплодородные земли занимают 28,23%. Динамика изменения средних значений зон плодородия пашни по районам исследований колеблется от 0,35 до 6,62%.

Таблица 1

**Среднее значение соотношения площадей полей зон разного плодородия**  
**The average value of the ratio of the areas of fields of zones of different fertility**

Наименование административного района	Высокоплодородные, %	Среднеплодородные, %	Низкоплодородные, %
Динской	28,52	48,42	23,06
Северский	29,63	41,80	28,56
Мостовской	26,54	48,07	25,38
Среднее	28,23	46,09	25,68

Наименьший процент среднеплодородных земель на основе полученных данных приходится на Мостовской район. Самый высокий процент площади с низким плодородием представлен в Северском районе. Площади с высоким уровнем плодородия отмечаются в Северском районе. Динской район обладает наименьшим показателем территорий с низким плодородием и максимальным процентом территорий со средним плодородием. В Мостовском районе среднее значение плодородия находится между двумя показателями объектов изучения.

Защитная лесистость пашни это отношение площади лесных насаждений к общей площади территории выраженная в процентах. Стабильными считаются агролесоландшафты с защитной лесистостью более 50% и слабой менее 15%. Урожайность сельскохозяйственных культур зависит также и от общей лесистости района. Влияние защитной лесистости на урожайность озимой пшеницы представлена в табл. 2. Из таблицы следует, что полевые угодья Краснодарского края во всех агролесомелиоративных районах имеют низкую среднюю защитную лесистость, которая колеблется по районам исследований от 1,11 до 3,12%. Средняя урожайность по районам исследований составила 50,7 ц/га, наиболее низкие показатели представлены в Северском районе и составили 43,9 ц/га.

Таблица 2

**Влияние защитной лесистости на урожайность озимой пшеницы**  
**The effect of protective forest cover on the yield of winter wheat**

Наименование административного района	Площадь пашни района, га	Площадь лесополос, га	Защитная лесистость пашни, %	Урожайность, ц/га
Динской	88240	2757	3,12	56,5
Северский	53469	601,38	1,11	43,9
Мостовской	55605	1122	2,01	51,7
Среднее	197314	4480,38	2,08	50,7

Урожайность сельскохозяйственных культур является важным показателем плодородия агроландшафтов. Проведенные многолетние статистические исследования по определению связи между урожайностью озимой пшеницы по годам и лесистостью по агролесомелиоративным районам (рис. 4) выявили линейную зависимость. Более тесная связь отмечается для Северского района (вторая агролесомелиоративная зона), где уравнение регрессии имеет вид  $y = 1,6622x - 3307,9$  при  $R^2 = 0,5745$ . Очень слабая зависимость выявлена для Мостовского района (третья агролесомелиоративная зона), где уравнение регрессии имеет вид  $y = 0,9296x - 1822,7$ , при  $R^2 = 0,1233$ .

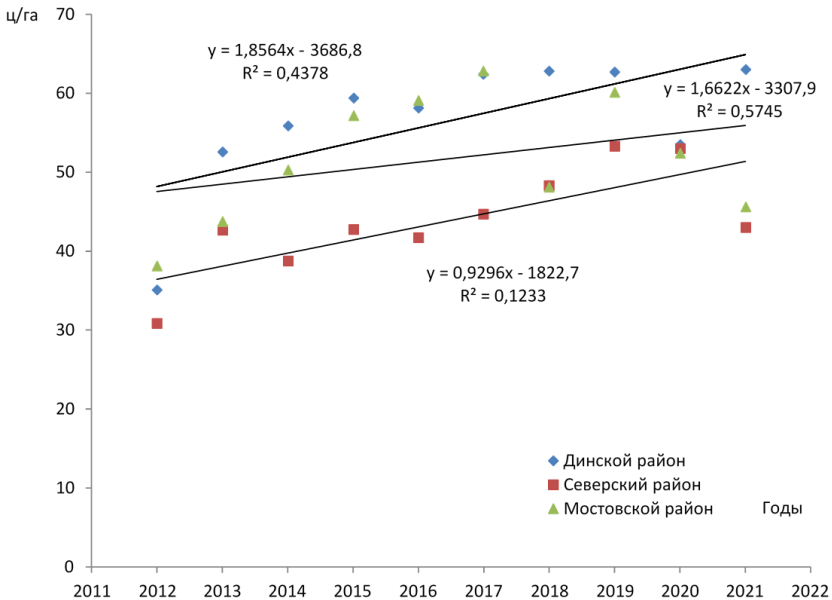


Рис. 4. Годовая динамика урожая озимой пшеницы в разных агролесомелиоративных районах Краснодарского края

Fig. 4. Annual dynamics of winter wheat harvest in different agroforestry areas of Krasnodar Krai

**Заключение.** В результате исследований установлено, что более высокий процент категории плодородных зон для всех агролесомелиоративных районов относится к средней категории и составляет 46,09% от общей площади пашни. Изменение средних значений зон плодородия колеблется от 0,35 до 6,62 % по районам. Во втором агролесомелиоративном районе

Краснодарского края (Северский район) отмечается большой процент земель с высоким уровнем плодородных земель 29,63%. В этом районе наблюдается также более высокий процент лесистости пашни – 3,12. Анализ плодородия агролесоландшафтов выявил линейную зависимость на всех вариантах исследований. Более тесная связь урожайности озимой пшеницы (2010–2022 гг.) и защитной лесистостью пашни отмечается для Северского района, уравнение регрессии для которого имеет вид  $y = 1,6622x - 3307,9$  при  $R^2 = 0,5745$ .

Таким образом, из представленных результатов исследований следует, что для повышения продуктивности (плодородия) на территории Краснодарского края необходимо дополнительно создать полезащитные лесные насаждения. Выбор соотношения угодий осуществлять, применяя адаптивно-ландшафтный подход. Данный подход будет способствовать получению дополнительной сельскохозяйственной продукции, а также формированию оптимальной лесистости, сохранению, улучшению экологии сельскохозяйственных земель АПК региона.

*Конфликт интересов.* Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

### **Библиографический список**

Беляев А.И., Кулик К.Н. Агролесомелиорация – основа экологически безопасного и экономически эффективного сельского хозяйства // Научно-агрономический журнал. 2022. № 2(117). С. 7–10.

Ерусалимский В.И., Рожков В.А. Многофункциональная роль защитных лесных насаждений // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2017. Вып. 88. С. 121–137.

Кулик А.В., Воронина В.П., Узолин А.И. Опыт формирования агролесомелиоративной системы на правом берегу среднего Дона с целью повышения продуктивности агроэкосистем // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2019. № 3 (55). С. 142–152. DOI: 10.32786/2071-9485-2019-03-18.

Науменко В.П., Науменко Е.Г., Примаков Н.В. Основы лесного почвоведения: учеб. пособие для вузов. Новочеркасск: НГМА, 2005. 233 с.

Павловский Е.С. Экологическая роль защитных лесонасаждений в лесостепных ландшафтах : тез. докл. конф. по основным проблемам теории и практики агролесомелиорации. Волгоград, 1982. С. 58.

Панов В.И. Оптимизация соотношения основных ландшафтных угодий (кластеров) в бассейновом агроэколандшафте степного засушливого пояса России // Научно-агрономический журнал. 2021. № 2(113). С. 6–17. DOI: 10.34736/FNC.2021.113.2.001.6-17

Примаков Н.В. Изменчивость лесоводственных характеристик полезащитных лесных насаждений Краснодарского края // ИВУЗ. Лесной журнал. 2021. № 1. С. 60–68. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-60-68.

Примаков Н.В. Почвопреобразующее воздействие лесных насаждений степной зоны: монография. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального ун-та, 2007. 171 с.

Примаков Н.В. Состояние лесных фитоценозов склоновых земель Краснодарского края // ИВУЗ. Лесной журнал. 2019. № 3. С. 55–63. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.3.55

Рулев А.С., Пугачева А.М. Формирование новой парадигмы агролесомелиорации // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89. № 5. С. 495–501.

Чеплянский И.Я., Турчин Т.Я., Ермолова А.С. Дистанционный мониторинг государственных защитных лесных полос степной зоны Европейской части России // ИВУЗ. Лесной журнал. 2022. № 3. С. 44–59. URL: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-44-59>

Шутилова Е.В. Роль защитного лесоразведения в обеспечении продовольственной и экологической безопасности // Актуальные вопросы землепользования и управления недвижимостью: сб. статей IV Национальной научно-практической конференции / отв. ред. Е.А. Акулова. Екатеринбург, 2022. С. 229–234.

Abbas F., Rizwan M., Ehsan S., Hama H.M., Bakhat H.F., Fahad S., Cerdà A., Farhad W. Agroforestry: a sustainable environmental practice for carbon sequestration under the climate change scenarios-a review // Environmental Science and Pollution Research. 2017. Vol. 24, no. 12. P. 11177–11191.

Bachmair S., Kohn I., Stahl K. Exploring the link between drought indicators and impacts // Natural hazards and earth system Sciences. 2015. Vol. 15. P. 1381–1397.

Cano N.M., Nyangito M.M., Wasonga O.V., Kironchi G. Agroforestry practices and factors influencing their adoption by communities in the drylands of eastern Kenya // Agroforestry Systems. 2022. Vol. 96, no. 8. P. 1225–1235.

Climate Change 2021. Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Switzerland. 2021. p. 32. URL: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_SPM\\_final.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf)

Hombegowda H.C., Köhler M., Röhl A., Hölscher D. Tree species and size influence soil water partitioning in coffee agroforestry // Agroforestry Systems. 2020. Vol. 94, no. 1. P. 137–149.

Pillow K., Liu A., Kinda C., Njagi T. Factors affecting adaptation to climate change through agroforestry in Kenya // Land. 2021. Vol. 10, no. 4.

Siminski A., Dos santos K.L., Wendt Ju.G.N. Rescuing agroforestry as strategy for agriculture in southern Brazil // Journal of Forestry Research. 2016. Vol. 27, no. 4. P. 739–746.

Singh V., Raj A., Jhariya M.K., Thakur Sh. Economic evaluation of agroforestry and non-agroforestry systems in eastern Uttar Pradesh, India. Vegetos. 2022. Vol. 35, no. 3. P. 810–815.

## References

Abbas F., Rizwan M., Ehsan S., Hama H.M., Bakhat H.F., Fahad S., Cerdà A., Farhad W. Agroforestry: a sustainable environmental practice for carbon sequestration under the climate change scenarios-a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, vol. 24, no. 12, pp. 11177–11191.

Bachmair S., Kohn I., Stahl K. Exploring the link between drought indicators and impacts. *Natural hazards and earth system Sciences*, 2015, vol. 15, pp. 1381–1397.

Belyaev A.I., Kulik K.N. Agroforestry is the basis of environmentally safe and economically efficient agriculture. *Scientific and Agronomic journal*, 2022, no. 2(117), pp. 7–10. (In Russ.)

Cano N.M., Nyangito M.M., Wasonga O.V., Kironchi G. Agroforestry practices and factors influencing their adoption by communities in the drylands of eastern Kenya. *Agroforestry Systems*, 2022, vol. 96, no. 8, pp. 1225–1235.

Cheplyansky I.Ya., Turchin T.Ya., Ermolova A.S. Remote monitoring of state protective forest strips of the steppe zone of the European part of Russia. *IVUZ. Lesnoj zhurnal*, 2022, no. 3, pp. 44–59. URL: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-44-59>. (In Russ.)

Climate Change 2021. Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Switzerland. 2021, p. 32. URL: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_SPM\\_final.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf)

Erusalimskii V.I., Rozhkov V.A. The Multifunctional Role of Protective Forest Plantations. *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2017, iss. 88, pp. 121–137. URL: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-88-121-137>. (In Russ.)

Hombegowda H.C., Köhler M., Röhl A., Hölscher D. Tree species and size influence soil water partitioning in coffee agroforestry. *Agroforestry Systems*, 2020, vol. 94, no. 1, pp. 137–149.

Kulik A.V., Voronina V.P., Mozolin A.I. The experience of forming an agroforestry system on the right bank of the Middle Don in order to increase the productivity of agroecosystems. *Proceedings of the Nizhnevolzhsky agrouniversitetskiy complex: Science and higher professional education*, 2019, no. 3 (55), pp. 142–152. DOI: 10.32786/2071-9485-2019-03-18. (In Russ.)

Naumenko V.P., Naumenko E.G., Primakov N.V. Fundamentals of forest soil science: textbook. manual for universities. Novocherkassk: NGMA, 2005. 233 p. (In Russ.)

Panov V.I. Optimization of the ratio of the main landscape lands (clusters) in the basin agroecolandscape of the steppe arid belt of Russia. *Scientific and Agronomic Journal*, 2021, no. 2(113), pp. 6–17. DOI: 10.34736/FNC.2021.113.2.001.6-17. (In Russ.)

Pavlovsky E.S. Ecological Role of Protective Forest Plantations in Forest Agrarian Landscapes. *Proceedings of the Conference on the Main Issues of the Theory and Practice of Agroforestry*. Volgograd, 1982, p. 58. (In Russ.)

Pillow K., Liu A., Kinda C., Njagi T. Factors affecting adaptation to climate change through agroforestry in Kenya. *Land*, 2021, vol. 10, no. 4.

Primakov N.V. Condition of the Slope Land Forest Phytocenosis in Krasnodar Krai. *IVUZ. Lesnoy Zhurnal*, 2019, no. 3, pp. 55–63. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.3.55. (In Russ.)

Primakov N.V. Soil-forming effect of forest plantations of the steppe zone. Monograph. Rostov-on-Don: Publishing House of the Southern Federal University of Rostov-on-Don, 2007. 171 p. (In Russ.)

Primakov N.V. Variability of Silvicultural Characteristics of Forest Shelterbelts in Krasnodar Krai. *IVUZ. Lesnoy Zhurnal*, 2021, no. 1, pp. 60–68. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-60-68. (In Russ.)

Rulev A.S., Pugacheva A.M. Formation of a new agroforestry paradigm. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2019, vol. 89, no. 5, pp. 495–501.

Shipilova E.V. The role of protective afforestation in ensuring food and environmental safety. *Topical issues of land use and real estate management*: collection of articles of the IV National Scientific and Practical Conference. Editor-in-chief E.A. Akulova. Yekaterinburg, 2022, pp. 229–234. (In Russ.)

Siminski A., Dos santos K.L., Wendt Ju.G.N. Rescuing agroforestry as strategy for agriculture in southern Brazil. *Journal of Forestry Research*, 2016, vol. 27, no. 4, pp. 739–746.

Singh V., Raj A., Jhariya M.K., Thakur Sh. Economic evaluation of agroforestry and non-agroforestry systems in eastern Uttar Pradesh, India. *Vegetos*, 2022, vol. 35, no. 3, pp. 810–815.

Материал поступил в редакцию 27.09.2023

---

**Примаков Н.В.** Влияние соотношения угодий в агролесоландшафтах на продуктивность сельскохозяйственных культур // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 250. С. 200–211. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.200-211

Недостаток влаги и высокая температура приводят к снижению урожайности сельскохозяйственных культур. Решение данной проблемы по мнению ряда исследователей реализуется в комплексном подходе, важным звеном которого является агролесомелиорация. Нами для исследования влияния соотношения сельскохозяйственных угодий Краснодарского края на плодородие почв в агролесоландшафтах были проведены исследования в 2022 году. Исследования проводились по общепринятым методикам. Состояние угодий агроландшафтов районов оценивалось по литературным источникам и статистическим данным. Выделение зон плодородия осуществлялось по нормализованному вегетационному индексу NDVI. Цель исследований – изучение влияния соотношения угодий в агролесоландшафтах на продуктивность сельскохозяйственных культур на территории Краснодарского края с применением программы «Агроном Онлайн» на базе сервиса СкайСкаут. В результате исследований установлено, что более высокий процент категорий

плодородных зон для всех агролесомелиоративных районов относится к средней категории и составляет 46,09% от общей площади пашни региона. Во втором агролесомелиоративном районе Краснодарского края (Северский район) отмечается больший процент земель с высоким уровнем плодородных земель 29,63%. В этом районе наблюдается также более высокий процент лесистости пашни – 3,12. Анализ плодородия агролесоландшафтов выявил линейную зависимость на всех вариантах исследований. Более тесная связь урожайности озимой пшеницы (2010–2022 гг.) и защитной лесистостью пашни отмечается для Северского района, уравнение регрессии для которого имеет вид  $y = 1,6622x - 3307,9$  при  $R^2 = 0,5745$ . Таким образом, из представленных результатов исследований следует, что для повышения продуктивности (плодородия) на территории Краснодарского края необходимо дополнительно создать полевые защитные лесные насаждения. Выбор соотношения угодий осуществлять, применяя адаптивно-ландшафтный подход. Данный подход будет способствовать получению дополнительной сельскохозяйственной продукции, а также формированию оптимальной лесистости, сохранению, улучшению экологии сельскохозяйственных земель АПК региона.

**Ключевые слова:** агролесомелиорация, плодородие, урожайность, защитная лесистость, лесные полосы, соотношение угодий, продуктивность.

**Primakov N.V.** Influence of the ratio of land in agroforest landscapes on the productivity of agricultural crops. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2024, iss. 250, pp. 200–211 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.200-211

Lack of moisture and high temperature lead to a decrease in crop yields. According to a number of researchers, the solution to this problem is implemented in an integrated approach, an important link of which is agroforestry. To study the effect of the ratio of agricultural land in the Krasnodar Territory on soil fertility in agroforestry landscapes, we conducted research in 2022. The research was conducted according to generally accepted methods. The condition of the lands of the agricultural landscapes of the districts was assessed according to literary sources and statistical data. The allocation of fertility zones was carried out according to the normalized vegetation index NDVI. The purpose of the research is to study the influence of the ratio of land in agroforestry landscapes on the productivity of crops in the Krasnodar Territory using the Agronomist Online program based on the Sky Scout service. As a result of the research, it was found that a higher percentage of the fertile zone category for all agroforestry areas belongs to the middle category and accounts for 46.09% of the total arable land area of the region. In the second agroforestry district of the Krasnodar Territory (Seversky district), there is a higher percentage of land with a high level of fertile land of 29.63%. In this area, there is also a higher percentage of arable land cover – 3.12. The analysis of the fertility of agroforestry landscapes revealed a linear dependence on all research options. A closer relationship between the



yield of winter wheat (2010–2022) and the protective forest cover of arable land is noted for the Seversky district, the regression equation for which has the form  $y = 1.6622x - 3307.9$  with  $R^2 = 0.5745$ . Thus, it follows from the presented research results that in order to increase productivity (fertility) in the Krasnodar Territory, it is necessary to additionally create protective forest plantations. The choice of the land ratio should be carried out using an adaptive landscape approach. This approach will contribute to obtaining additional agricultural products, as well as the formation of optimal forest cover, conservation, and improvement of the ecology of agricultural lands in the agro-industrial complex of the region.

**Key words:** agroforestry, fertility, productivity, protective forest cover, forest strips, land ratio, productivity.

---

**ПРИМАКОВ Николай Владимирович** – доцент, кандидат сельскохозяйственных наук: Кубанского государственного университета<sup>1</sup>; Кубанского государственного аграрного университета имени И.Т. Трубилина<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-9225-024X. SPIN-код: 1475-1077. WOS Researcher ID ABD-8930-2021

<sup>1</sup> 350040, ул. Ставропольская, д. 149, г. Краснодар, Россия. E-mail: nik-primakov@yandex.ru

<sup>2</sup> 350044, ул. Калинина, д. 13, г. Краснодар, Россия. E-mail: nik-primakov@yandex.ru

**PRIMAKOV Nikolay V.** – PhD (Agricultural), Associate Professor: <sup>1</sup>Kuban State University; <sup>2</sup>Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin ORCID: 0000-0001-9225-024X. SPIN-code: 1475-1077. WOS Researcher ID ABD-8930-2021

<sup>1</sup>350040. Stavropol str. 149. Krasnodar. Russia. E-mail: nik-primakov@yandex.ru

<sup>2</sup>350044. Kalinina str. 13. Krasnodar. Russia. E-mail: nik-primakov@yandex.ru

**Т.В. Двадцатова, Т.В. Изотова, И.А. Мельничук, В.В. Часовская**

**ПОЧВЕННЫЕ УСЛОВИЯ И СОСТОЯНИЕ  
ЗЕЛЕННЫХ НАСАЖДЕНИЙ  
ЮЖНО-ПРИМОРСКОГО ПАРКА В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ**

*Введение.* Данная работа посвящена исследованию изменения состояния зеленых насаждений, произрастающих на городских намывных грунтах. В Санкт-Петербурге одним из примеров крупного парка на намывных территориях, расположенного на берегу Финского залива, является Южно-Приморский парк [Часовская, 2005].

Для освоения новых территорий одной из тенденций в современном строительстве являются намывные территории. Намывные территории успешно используются в крупных городах Европы, Азии, США. Данный способ применяется для развития прибрежных зон. Примером создания озелененных территорий является парк MIA в Катаре площадью 25 гектаров на набережной в городе Доха [Benrong, Chenchen, Di et al., 2013; Sengupta, Chen, Meadows, 2017; Абубакирова, 2023]. Намыв территорий актуален для Санкт-Петербурга и решает проблему с недостатком земельных ресурсов. Территории, созданные способом намыва, используются как для объектов инфраструктуры и новых жилых массивов, так и для объектов ландшафтной архитектуры, создают новые парки, скверы и т. д. [Максимов, Абакумов, 2015; Павловский, 2019; Уварова, Павлова, 2023].

Намывы юго-западной периферии города, представлены как жилыми районами, например, «Балтийская жемчужина», так и озелененными территориями – северная часть Южно-Приморского парка [Суворова, Веретеникова, 2023].

Крупные парки относятся к зеленым насаждениям общего пользования и играют важную роль в поддержании экологического каркаса. Так для Южно-Приморского парка наличие насаждений и водных объектов определяет его в качестве ядра в формировании водно-зеленого каркаса района и города в целом. Через линейное озеленение вдоль Петергофского шоссе Южно-Приморский парк связывается с другими крупными парками – ядрами экологического каркаса (Александрино, Полежаевский, Знаменка), формируя таким образом крупный элемент экокаркаса Петербурга.

Исследование городских почв и грунтов является перспективным направлением для крупных городских парков, в связи с тем, что почвенный баланс влияет на биоразнообразие, развитие растений, устойчивость городских насаждений [Angers, Caron, 1998; Капелькина, 2010; Polyakov et al., 2020; Гончарова, Семенюк, Стома, 2021; Bakhmatova, Matunyan, Sheshukova, 2022; Shikhova, 2005]. Почвенные условия изменяются под влиянием хозяйственной деятельности человека в городских условиях, и эти изменения формируют почвы, которые сильно отличаются от почв в естественных природных системах [Scharenbroch, Lloyd, Johnson-Maynard, 2005].

*Цель исследования:* проследить динамику изменения почв Южно-Приморского парка и связь почвенных характеристик с состоянием зеленых насаждений.

*Задачи исследования:*

- изучить текущие почвенные характеристики;
- проследить динамику изменения почвенных характеристик;
- оценить состояние насаждений парка;

*Объект и методика исследования.* Объект исследования – ЗНОП № 8080 Южно-Приморский парк. Находится в Красносельском районе, в южной части Санкт-Петербурга. Парк граничит: с севера с улицей Маршала Захарова, с востока – с улицей Доблести, с юга – с дублером Петергофского шоссе, с запада – с Дудергофским каналом.

Парк относится к категории насаждений общего пользования. На 2024 год площадь парка составляет 90,0619 га<sup>1</sup>. Территория парка имеет прямоугольную конфигурацию, вытянута с севера на юг. Восточная граница неровная, поскольку вдоль улицы Доблести в границы парка не входит ряд объектов (парковка, Церковь святителя Иоанна Милостливого, отдельно стоящие здания с хозяйственными постройками, дом 35 к. 1 по улице Доблести с рестораном).

Южно-Приморский парк создавался в 1960–1970 годах и до 1991 года назывался парком имени В.И. Ленина. Главной особенностью парка является то, что он был запроектирован и построен на намывных территориях. В проектном задании в определённой мере был использован мировой опыт строительства зелёных насаждений на намывных грунтах и внесены некоторые коррективы в технологию создания парка на столь своеобразных субстратах.

---

<sup>1</sup> Закон Санкт-Петербурга «О зеленых насаждениях общего пользования» (с изм. на 21.12.2023 г.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/8458668> (дата обращения: 17.01.2024).

По своим лесорастительным условиям и происхождению парк делится на две части, сильно различающиеся по характеристикам.

1-я часть – северная заложена в 1960 г. Построена на намывных грунтах.

2-я часть – южная принята от Стрельнинского парклесхоза в 1974 году, расположена на уступах террас Финского залива, которая возвышается над уровнем моря на 8–10 м и находится под охраной КГИОП, так как в прошлом, XVIII–XIX вв., эта часть состояла из целого ряда отдельных парков, разбитых при богатых усадьбах и дачах Петербургской аристократии (бывшие дачи Миниха, Воронцова, Демидова) [Аксельрод, Васнина, Демидова, 1981].

В парке относительно редкая сеть дорог и аллей, обеспечивающая передвижение по основным направлениям, свободный доступ посетителей, а также технического транспорта для посещения и обслуживания любого участка парка. Схема решения трассировки дорожек построена на сочетании диагональных, осевых и кольцевых направлений.

Главная парадная магистраль пересекает территорию по осевой, превращаясь у аттракционов, в две аллеи. Кольцевой трёхкилометровый маршрут соединяет все зоны и сектора, пересекает различно организованные ландшафты, подводит к разнообразным видовым точкам в пределах парка.

По функциональному назначению юго-восточная часть парка подразделяется на следующие сектора и группы: памятный (мемориальный) сектор, зона спортивных сооружений, зона тихого отдыха и административно-хозяйственная зона. Проведение чётких границ, отделяющих один сектор от другого, невозможно. По размещению различных устройств они тесно переплетены друг с другом, поэтому определение площадей каждого в какой-то мере условно.

Композиция парка представлена геометрически регулярной планировкой парадных ансамблей со свободными, естественными пейзажами широко открытых луговых ландшафтов с лесными массивами и рощами.

В основу парковых композиций был заложен принцип контраста организованных, чётких объёмов зелени различной характеристики, как по форме, так и ассортименту пород деревьев с живописно размещёнными группами или отдельными деревьями с развитой неформованной кроной.

Используется широкий ассортимент древесно-кустарниковых пород. В парке имеется два типа газонов: партерный и обыкновенный. Парк имеет культурную, эстетическую и оздоровительную значимость. Вместимость парка 20–25 тыс. чел.

Сбор почвенных образцов проводился в 1974, 2004 и 2023 годах. Почвенные разрезы закладывались примерно в одних и тех же местах. В 2024 году пробные площади для изучения состояния насаждений закладывались там же, где и почвенные разрезы.

Агрохимический анализ полученных образцов почвы проводился по общепринятым методикам: величина pH определялась потенциометрически; содержание органического вещества (гумуса) определялось методом мокрого сжигания по Тюрину; содержание нитратов определялось дисульфифеновым методом (метод Грандваля-Ляжу); содержание подвижного фосфора определялось по методу Кирсанова; содержание подвижного калия определялось по методу Пейве [Александрова, Найденова, 1967; Крейер, 2005].

*Результаты исследования и их обсуждение.* В 2024 году на территории Южно-Приморского парка было заложено три почвенных разреза, которые разместились в точках, где разрезы закладывались в 1974 и 2004 годах на намывной части парка [Часовская, 2007]. Описания разрезов приведены в табл. 1. Схема парка с указанием точек заложения почвенных разрезов и закладки пробных площадей по разным годам исследований приведена на рис. 1.

Таблица 1

**Описание почвенных разрезов, заложенных в Южно-Приморском парке Санкт-Петербурга в 2024 году**

**Description of the soil sections laid in the Yuzhno-Primorskiy Park of St. Petersburg in 2024**

Разрез 1		Разрез 2		Разрез 3	
Уд (0-3)	Дернина, среднеразложившийся, злаки	Уд (0-4)	Дернина	Уд (0-3)	Дернина
Уh (3-22)	Насыпной, темно-бурый, рыхлый, крупно комковатый, супесчаный, переход ясный	Уh (4-30)	Гумусированный, насыпной, темно-бурый, крупнокомковатый, рыхлый, супесчаный, корни, камни, переход в нижележащий горизонт ясный	Уh (3-17)	Насыпной, темно-серый, крупно-комковатый, рыхлый, супесчаный, корни, переход явный
У2 Fe (22-78)	Насыпной, серый, плитчатый, плотноватый, суглинистый, Fe, переход явный	У2 Fe (30-75)	Насыпной, светло-серый, плотноватый, плитчатый, суглинистый, Fe, переход постепенный	У2 Fe (17-80)	Насыпной, серый, плитчато-комковатый, плотноватый, суглинистый, Fe, постепенный переход
У3 (78-100)	Насыпной, сизый, плитчатый, плотный, суглинистый	У3 (75-95)	Насыпной, серый, плитчатый, плотный, суглинистый, постепенный	У3 (80-100)	Насыпной, светло-сизый, плитчатый, плотный, суглинистый
Урбанозем среднemoshный среднедерновой, среднегумусированный, суглинистый, на намывных грунтах		Урбанозем среднemoshный среднедерновой, хорошо гумусированный, суглинистый, на намывных грунтах		Урбанозем среднemoshный среднедерновой, среднегумусированный, суглинистый, на намывных грунтах	

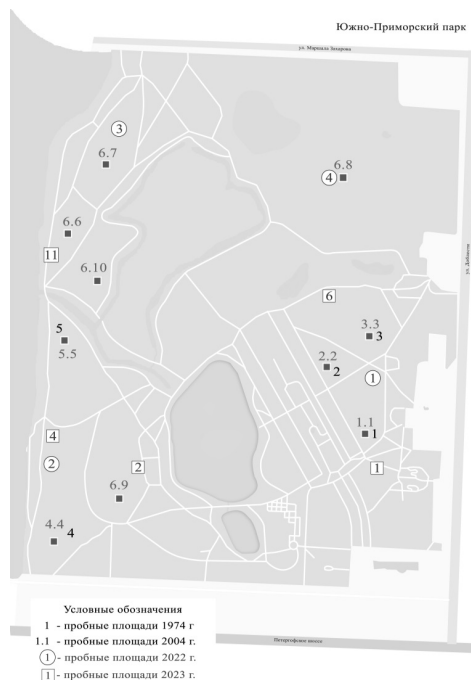


Рис. 1. Схема Южно-Приморского парка с указанием точек заложения почвенных разрезов и закладки пробных площадей

Fig. 1. The scheme of the South-Primorsky Park with the indication of the points of laying of soil sections and laying of test areas

При сравнении с разрезами предыдущих исследований (2004 год) было отмечено следующее: переход от горизонта У2 к горизонту У3 начинает размываться, становится постепенным, следовательно, идет взаимодействие верхних горизонтов с нижним намывным слоем, и это взаимодействие во времени становится все более проявленным. При этом переход от Ун к У2 выражен ясно, то есть верхний постоянно подсыпaeмый слой с подстилающим его горизонтом смешивается слабо. Это можно объяснить тем, что горизонт У2 постепенно уплотняется, приобретает плитчатую структуру и не способен к смешиванию с более легким вышележащим насыпным горизонтом супесчаного механического состава. Горизонт У3 имеет плотную плитчатую структуру, которую невозможно разделить на отдельные горизонты, как это было в исследованиях 1974 и 2004 гг.

По исследованиям Капелькиной Л.П. (1974) году почвы Южно-Приморского парка были недостаточно обеспечены гумусом в нижних горизонтах, хорошо обеспечены в верхних – насыпных. Среднее содержание гумуса в верхнем насыпном горизонте сильно падает в нижележащем намывном горизонте. Изменение углерода по профилю выражено резко. Азотом почвы парка также были обеспечены недостаточно, причем распределение содержания азота по профилю шло аналогично содержанию гумуса. Соотношение углерода и азота также изменялось по профилю аналогично содержанию гумуса. При этом в горизонте  $U_{2nc}$  этот показатель часто оказывался выше, чем в самом верхнем горизонте  $U_{1nc}$ . При наличии горизонта  $U_{3nm}$ , в последнем соотношении C:N увеличивалось, если процесс оглеения не был ярко выраженным.

Реакция почвы изменялась слабо – от слабокислой (6,0) до близкой к нейтральной (6,7). По профилю кислотность постепенно падала, но в целом реакция среды оставалась близкой к нейтральной. Гидролитическая кислотность – очень низкая. В большинстве случаев в нижних горизонтах гидролитическая кислотность ниже 1 мг-экв. на 100 г почвы, выше – в верхнем (насыпном) горизонте и в намывных горизонтах  $U_{3nm}$ . Наиболее высокая сумма обменных оснований отмечалась в верхнем горизонте и в намывных горизонтах  $U_{3nm}$ . При этом вся почва достаточно и хорошо обеспечена основаниями, степень насыщенности практически во всех случаях выше 75 мг-экв. на 100 г почвы. Исключение – почвы, где в намывных горизонтах наблюдался сильный процесс глееобразования, степень насыщенности основаниями снижалась меньше 70 мг-экв. на 100 г почвы.

Обеспеченность почв парка подвижными формами калия от очень низкой до средней. Поскольку содержание  $K_2O$  в почве зависит от содержания в ней глинистых частиц, то увеличение содержания калия в нижних горизонтах свидетельствует об утяжелении состава почв вниз по профилю или его миграции по профилю (калий хорошо вымывается). По обеспеченности подвижными формами фосфора почвы парка можно отнести к высокообеспеченным. Распределение содержания подвижных форм фосфора по профилю различно, что объясняется неоднократным внесением удобрений.

Анализ изменений показывает, что по сравнению с 1976 годом в почвах парка возросло содержание как гумуса, так и азота. При этом увеличение содержания азота – более существенное, чем гумуса, о чем свидетельствует изменение соотношения C:N.

Реакция почвы изменилась в более кислую сторону, так как в парке производят подсыпку из плохо разложившегося торфа. Гидролитическая кислотность по всему профилю изменилась.

Таблица 2

**Динамика изменения химических показателей почвы  
Южно-Приморского парка Санкт-Петербурга**

**Dynamics of changes in soil chemical parameters  
Yuzhno-Primorskiy Park of St. Petersburg**

Год исследований *)	Горизонт, глубина взятия образца, см	Содержание, %			Гидроли- тическая кислот- ность	Сумма обмен- ных ос- нований	Степень насыщен- ности основа- ниями, %	pH		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
		Угле- род (C), %	Азот (N), %	C:N				соле- вой	вод- ный	мг на 100 г почвы	
					мг-экв. на 100 г почвы						
1974	1–15	1,78	0,107	16,6	0,44	3,7	96,9	6,8	7,3	10,0	6,5
2004	U <sub>1nc</sub>	5,40	0,340	15,8	4,00	22,5	84,9	5,8	6,2	14,0	3,6
2022	3–30 Uh**										
	CB	7,26	7,19	1,00	–	–	–	–	7,89	5,63	4,00
	CHB	6,07	2,62	6,13	–	–	–	–	6,62	6,79	4,00
	TB	6,61	2,13	3,10	–	–	–	–	7,49	11,29	4,00
	THB	6,83	1,29	5,29	–	–	–	–	8,41	11,22	4,00
1974	15–30	0,38	0,019	20,0	0,32	8,3	94,1	6,6	7,0	7,5	4,8
2004	U <sub>2nc</sub>	0,70	0,100	7,0	0,90	12,3	93,1	5,9	6,4	12,6	3,6
1974	30–52	0,33	0,017	19,4	0,40	8,6	95,2	6,5	6,9	10,0	4,0
2004	U <sub>3nm</sub>	0,50	0,080	6,2	0,30	11,4	97,4	5,9	6,5	13,0	3,6
1974	52–62	0,33	0,017	19,4	0,30	2,6	97,3	6,9	7,2	10,0	4,8
2004	U <sub>4nm</sub>	0,40	0,06	6,6	0,3	9,0	97,6	5,9	6,0	13,0	3,6
1974	62–92	0,32	0,014	22,8	0,40	5,4	97,2	7,0	7,8	7,5	7,0
2004	U <sub>5nm</sub>	0,40	0,060	6,7	0,30	10,0	97,0	6,4	7,4	5,3	3,6

\*) 1974 г. – по исследованиям Капелькиной Л.П.; 2004 г. – по исследованиям Часовской В.В.; 2023 г. – по исследованиям Двадцатовой Т.В. [Богданова, Двадцатова, Мельничук, 2023].

\*\*) Точки отбора образцов (размещения разрезов): СВ – освещенный, вытоптан-  
ный; СНВ – освещенный, невытоптаный; ТВ – теневой, вытоптаный; ТНВ – теневой,  
невытоптаный.



Сумма обменных оснований за 30 лет увеличилась очень существенно, хотя в целом обеспеченность (степень насыщенности основаниями) несколько снизилась, но очень незначительно.

Обеспеченность подвижными формами калия заметно снизилась, так как этот хорошо растворимый в воде элемент легко вымывается из почвы. Обеспеченность подвижными формами фосфора – наоборот – существенно увеличилась, что объясняется внесением фосфоросодержащих удобрений.

Следует отметить, что сильнее всего изменения заметны в самом верхнем горизонте. Поскольку за счет регулярной насыпки грунта и работ по улучшению почвенного плодородия гумусовый горизонт за 20 лет увеличился почти в два раза, поэтому в 2022 году для изучения агрохимических показателей образцы брались только из верхнего горизонта – корнеобитаемого слоя [Бубнова, Вагизов, Двадцатова и др., 2022].

Освещенность участка и степень вытоптанности напочвенного покрова никак не сказываются на плодородии верхнего горизонта. Почвы с теневых участков имеют более кислую реакцию, на них также более высокое содержание фосфора, то есть на более освещенных местах растения интенсивнее потребляют фосфор. Содержание калия во всех образцах низкое, поскольку калийные подкормки проводятся реже, а элемент легко вымывается в нижние горизонты.

*Анализ древесно-кустарниковой растительности Южно-Приморского парка.* Данные по видовому разнообразию древесных растений в Южно-Приморском парке за 2014 и 2023 годы приведены в табл. 3. Инвентаризация 2014 года, проведенная Бабашкиной И.Ю. под руководством Т.В. Изотовой, охватывала всю территорию парка. В 2023 году для оценки состояния насаждений закладывались (Даянанда М. под руководством Двадцатовой Т.В.) пробные площади (14 пробных площадей).

В Южно-Приморском парке по результатам проведенного в 2014 году (Изотова Т.В.) обследования преобладали такие семейства как берёзовые *Betulaceae*, буковые *Fagaceae*, ивовые *Salicaceae*, тогда как липовые *Tiliaceae*, кленовые *Aceraceae* и ильмовые *Ulmaceae* в меньшем процентном соотношении. Остальные семейства составляют менее 5%.

В Южно-Приморском парке насчитывалось 50 видов деревьев, из которых хвойные представлены всего девятью видами. Лиственные деревья в парке занимали значительную часть – 94%. По отношению к лиственным, хвойных деревьев всего 6%. Таким образом, видовой состав лиственных пород достаточно разнообразен, а хвойных деревьев мало.

Таблица 3

## Ассортимент древесной растительности Южно-Приморского парка

## Assortment of woody vegetation of the South-Primorsky Park

№ п/п	Русское / латинское* название	Количество деревьев			
		2014		2023	
		шт.	%	шт.	%
1	Липа мелколистная <i>Tilia cordata</i> Mill.	2632	9	68	23,94
2	Липа крупнолистная <i>Tilia platyphyllos</i> Scop.	1088	4	27	9,51
3	Клен остролистный <i>Acer platanoides</i> L.	2917	9	10	3,52
4	Клён татарский <i>Acere tataricum</i> L.	162	<1	—	—
5	Клён ясенелистный <i>Acere negundo</i> L.	14	<1	—	—
6	Клён Гиннала <i>Acere ginnala</i> Maxim.	25	<1	—	—
7	Клён красный <i>Acere rubrum</i> L.	5	<1	—	—
8	Клён ложно-платановый <i>Acere pseudoplatanus</i> L.	77	<1	—	—
9	Вяз гладкий <i>Ulmus laevis</i> Pall.	1189	4	24	8,45
10	Вяз шершавый <i>Ulmus glabra</i> Huds.	1419	5	2	0,70
11	Боярышник мягковатый <i>Crataegus submollis</i> Sarg.	27	<1	—	—
12	Вишня обыкновенная <i>Cerasus vulgaris</i> Mill.	9	<1	—	—
13	Груша обыкновенная <i>Pyrus communis</i> L.	1	<1	—	—
14	Рябина обыкновенная <i>Sorbus aucuparia</i> L.	850	3	6	2,11
15	Рябина промежуточная <i>Sorbus intermedia</i> (Ehrh.)Pers.	14	<1	—	—
16	Черемуха обыкновенная <i>Padus avium</i> Mill.	722	2	—	—
17	Черёмуха виргинская <i>Padus virginiana</i> (L.)	12	<1	—	—

Продолжение табл. 3

№ п/п	Русское / латинское* название	Количество деревьев			
		2014		2023	
		шт.	%	шт.	%
18	Яблоня домашняя <i>Malus domestica</i> (Suckow) Borkh.	50	<1	1	0,35
10	Яблоня лесная <i>Malus sylvestris</i> Mill.	15	<1	–	–
20	Яблоня ягодная <i>Malus baccata</i> (L.)	94	<1	–	–
21	Лиственница сибирская <i>Larix sibirica</i> Ledeb.	857	3	6	2,11
22	Лиственница европейская <i>Larix decidua</i> Mill.	38	<1	–	–
23	Ель колючая <i>Picea pungens</i> Engelm.	237	<1	–	–
24	Ель колючая ф. голубая <i>Picea pungens</i> Engelm. f. <i>glauca</i>	33	<1	–	–
25	Ель сербская <i>Picea omorika</i> (Pančić) Purk.	33	<1	–	–
26	Сосна обыкновенная <i>Pinus sylvestris</i> L.	303	1	–	–
27	Сосна сибирская кедровая <i>Pinus sibirica</i> L.	2	<1	–	–
28	Пихта сибирская <i>Abies sibirica</i> Ledeb.	225	<1	–	–
29	Дуб черешчатый <i>Quereus robur</i> L.	4891	16	49	17,25
30	Дуб красный <i>Quereus rubra</i> L.	15	<1	–	–
31	Береза пушистая <i>Betula pubescens</i> Ehrh.	1612	5	–	–
32	Берёза повислая <i>Betula pendula</i> Roth.	1112	4	23	8,10
33	Ольха чёрная <i>Alnus glutinosa</i> (L.) Gaertn.	2517	8	4	1,41
34	Ольха серая <i>Alnus incana</i> (L.) Moench	370	1	6	2,11

Окончание табл. 3

№ п/п	Русское / латинское* название	Количество деревьев			
		2014		2023	
		шт.	%	шт.	%
35	Ясень пенсильванский <i>Fraxinus pennsylvanica</i> Marshall.	687	2	—	—
36	Ясень зелёный <i>Fraxinus lanceolata</i> Borkh.	5	<1	—	—
37	Ясень обыкновенный <i>Fraxinus excelsior</i> L.	74	<1	10	3,52
38	Ива белая <i>Salix alba</i> L.	154	<1	5	1,76
39	Ива вавилонская <i>Salix babylonica</i> L.	2	<1	7	2,46
40	Ива ломкая <i>Salix fragiles</i> L.	2120	8	8	2,82
41	Ива козья <i>Salix caprea</i> L.	827	3	22	7,75
42	Ива серебристая <i>Salix pycnostachya</i> Andersson	97	<1	—	—
53	Ива пятитычинковая <i>Salix pentandra</i> L.	38	<1	—	—
44	Осина обыкновенная <i>Populus tremula</i> L.	1154	4	2	0,70
45	Осина пирамидальная <i>Populus tremula</i> L. <i>fastigiata</i>	11		—	—
46	Тополь белый <i>Populus alba</i> L.	274		3	1,06
47	Тополь итальянский <i>Populus italic</i> (Du Roi) Moench	44		—	—
48	Тополь берлинский <i>Populus x berolinensis</i>	1446		—	—
49	Каштан конский обыкновенный <i>Aesculus hippocastanum</i> L.	60	<1	1	0,35
50	Туя западная <i>Thuja occidentalis</i> L.	5	<1	—	—
	Итого	30565	100	284	100

\*) Для удобства формирования сводной таблицы латинские названия даны по инвентаризации 2014 года.

Наибольшее распространение имели: дуб черешчатый *Quercus robur* L. (16%), липа мелколистная *Tilia cordata* Mill. (9%), клен остролистный *Acer platanoides* L. (9%), ива ломкая *Salix fragiles* L. (8%), ольха черная *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. (8%), тополя *Populus* (7%), береза повислая *Betula pendula* Roth. (4%), береза пушистая *Betula pubescens* Ehrh. (5%), вяз гладкий *Ulmus laevis* Pall. (5%), вяз шершавый *Ulmus glabra* Huds. (5%), осина *Populus tremula* L. (4%), остальные породы составляли от 3% до 1% и менее. Хвойные в основном ель колючая (1%) и пихта сибирская (1%).

Возрастная структура древесной растительности выглядела следующим образом: до 15 лет – 2,6%, от 15 до 25 лет – 24,9%, свыше 25 лет – 72,5%. Выявлено 200 деревьев в возрасте свыше 100 лет. Таким образом, от исторических посадок сохранилось лишь небольшое количество деревьев.

По типам посадок преобладали групповые и одиночные посадки, аллейные и массивы – меньше. Массивы представлены недостаточно.

По данным инвентаризация на пробных площадях (Даянанда М., Двадцатова Т.В.) 2023 года ассортимент насаждений на пробных площадях представлен 21 видом деревьев.

Лиственные деревья представлены 20 видами, хвойные – одним видом. Наибольшую долю составляет липа мелколистная *Tilia cordata* Mill. – 24%, на втором месте – дуб черешчатый *Quercus robur* L. – 17%, на третьем месте – липа крупнолистная *Tilia platyphyllos* Scop. – 10%. Достаточно представлены вяз гладкий *Ulmus laevis* Pall., береза повислая *Betula pendula* Roth. и ива козья *Salix caprea* L. – составляют по 8%. К прочим видам относятся 15 наименований деревьев, в том числе каштан конский обыкновенный *Aesculus hippocastanum* L., рябина обыкновенная *Sorbus aucuparia* L., тополь дрожащий *Populus tremula* L., – вместе они составляют 25% от общего числа деревьев на пробных площадях.

Липа крупнолистная *Tilia platyphyllos* Scop. в Санкт-Петербурге зимует плохо. Тот факт, что она оказалась среди преобладающих пород при исследованиях 2023 года, можно объяснить тем, что одна из пробных площадок для перечета была заложена в массиве липы крупнолистной, поскольку пробные площадки старались закладывать возможно близко к местам почвенных разрезов. А вот ива козья *Salix caprea* L. – местный неприхотливый вид, не требовательный к почвам, переносящий избыточное увлажнение, быстрорастущий. Эта ива легко осваивает неудобные для других растений территории и даже способна вытеснять их, что со временем и происходит, так как десять лет назад ее доля в составе насаждений не превышала 3%. Что касается хвойных деревьев, то они не исчезли. Просто они были выса-

жены единично, в качестве отдельных композиционных акцентов, либо в оформлении входной зоны, и шансов попасть в пробную площадь у них не было. Исключение составила лиственница сибирская *Larix sibirica* Ledeb., которой изначально было высажено довольно много и даже в 2014 году она составляла 3%.

Данные по видовому разнообразию кустарниковых растений в Южно-Приморском парке за 2014 и 2023 годы приведены в табл. 4.

Таблица 4

**Ассортимент кустарниковой растительности Южно-Приморского парка****Assortment of shrubby vegetation of the South-Primorsky Park**

№ п/п	Русское / латинское* название	Количество кустарников			
		2014		2023	
		шт.	%	шт.	%
1	Снежноягодник белый <i>Symphoricarpos albus</i> var. <i>laevigatus</i> S.F.Blake	1705	2	–	–
2	Жимолость татарская <i>Lonicera tatarica</i> L.	2300	3	–	–
3	Спирея иволжистая <i>Spiraea salicifolia</i> L.	1309	2	–	–
4	Спирея дубравколистная <i>Spiraea chamaedrifolia</i> L.	6313	9	–	–
5	Роза морщинистая <i>Rosa rugosa</i> Thunb.	8542	11	1	2,04
6	Роза собачья <i>Rosa canina</i> L.	98	<1	–	–
7	Роза колючейшая <i>Rosa spinosissima</i> L.	309	<1	–	–
8	Рябинник рябинолистный <i>Sorbaria sorbifolia</i> (L.) A.Braun.	1301	2	–	–
9	Айва японская <i>Cydonia japonica</i> (Thunb.)	88	<1	1	2,04
10	Боярышник сибирский <i>Crataegus sanguinea</i> Pall.	6365	9		
11	Боярышник обыкновенный <i>Crataegus rhipidophylla</i> Gand.	406	<1	5	10,20
12	Боярышник перистонадрезанный <i>Crataegus pinnatifida</i> Bunge	21	<1	6	12,24

Продолжение табл. 4

№ п/п	Русское / латинское* название	Количество кустарников			
		2014		2023	
		шт.	%	шт.	%
13	Черноплодная рябина <i>Aronia mitschurinii</i> A.K.Skv & Yu.K.Maitulina	1194	2	–	–
14	Ирга круглолистная <i>Amelanchier ovalis</i> Medikus.	352	<1	–	–
15	Кизильник блестящий <i>Cotoneaster acutifolius</i> Turcz.	2285	3	2	4,08
16	Пузыреплодник калинолистный <i>Physocarpus opulifolius</i> (L.) Maxim.	225	<1	1	2,04
17	Дерен кроваво-красный <i>Swida sanguinea</i> (L.) Opiz	2356	3	–	–
18	Дёрен сибирский <i>Cornus alba</i> L.	1666	2	–	–
19	Дёрен белый <i>Swida alba</i> (L.) Opiz.	1754	2	9	18,37
20	Смородина альпийская <i>Ribes alpinum</i> L.	8281	11	–	–
21	Смородина золотистая <i>Ribes aureum</i> Pursh.	4555	8	2	4,08
22	Сирень венгерская <i>Syringa josikaea</i> J. Jacq.	3418	4	–	–
23	Сирень обыкновенная <i>Syringa vulgaris</i> L.	2465	3	–	–
24	Калина гордовина <i>Viburnum lantana</i> L.	106	<1	–	–
25	Калина обыкновенная <i>Viburnum opulus</i> L.	1052	1	2	4,08
26	Можжевельник обыкновенный <i>Juniperus communis</i> L.	26	<1	–	–
27	Лох серебристый <i>Elaeagnus commutate</i> Pursh.	320	<1	–	–
28	Ива чернеющая (Ива кольская) <i>Salix myrsinifolia</i> Salisb.	2007	3	–	–
29	Ива серая (пепельная) <i>Salix cinerea</i> L.	12	<1	3	6,12

Окончание табл. 4

№ п/п	Русское / латинское* название	Количество кустарников			
		2014		2023	
		шт.	%	шт.	%
30	Ива пятитычинковая <i>Salix pentandra</i> L.	–	–	3	6,12
31	Ива трехтычинковая <i>Salix triandra</i> L.	23	<1	6	12,24
32	Ива мирзинолистная <i>Salix myrsinifolia</i> Salisb.	29	<1	4	8,16
33	Барбарис Тунберга <i>Berberis thunbergii</i> DC.	403	<1	–	–
34	Барбарис обыкновенный <i>Berberis vulgaris</i> L.	4490	7	–	–
35	Барбарис обыкновенный пурпурный <i>Berberis vulgaris</i> subsp. <i>vulgaris</i>	3526	4	–	–
36	Бузина красная <i>Sambucus racemosa</i> L.	890	1	–	–
37	Чубушник венечный <i>Philadelphus coronaries</i> L.	1563	2	1	2,04
38	Облепиха крушиновидная <i>Hippophae rhamnoides</i> L.	–	–	3	6,12
39	Карагана кустарниковая <i>Caragana frutex</i> (L.) K.Koch.	160	<1	–	–
40	Карагана жёлтая <i>Caragana arborescens</i> Lam.	5645		–	–
	Итого	77560	100	49	100

Примечание. \*) Для удобства формирования сводной таблицы латинские названия даны по инвентаризации 2014 года.

Кустарники в Южно-Приморском парке представлены следующими семействами: розоцветные *Rosaceae*, крыжовниковые *Grossulariaceae*, барбарисовые *Berberidaceae* – преобладали, тогда как бобовые *Fagaceae*, маслиновые *Oleaceae* и кизиловые *Cornaceae* в меньшем процентном соотношении. Остальные же семейства составляли менее 5%. Можно считать, что ассортимент кустарников был достаточно разнообразным.

На 2014 год кустарников в парке насчитывалось 38 видов, наиболее распространены: смородина альпийская *Ribes alpinum* L. (11%), роза мор-



щинистая *Rosa rugosa* Thunb. (11%), боярышник сибирский *Crataegus sanguinea* Pall. (9%), спирея дубровколистная *Spirae achamaedrifolia* L. (9%), смородина золотистая *Ribes aureum* Pursh. (8%), барбарис обыкновенный *Berberis vulgaris* L. (7%), барбарис обыкновенный ф. краснолистная *Berberis vulgaris* Regel f. *Atropurpurea* (4%), сирень венгерская *Syringa josikaea* J. Jacq. (4%), остальные виды составляют 3% и менее. Видовой состав лиственных кустарников достаточно разнообразен.

Больше всего занимали умереннорастущие (49%), чуть меньше – быстрорастущие (47%), медленнорастущие – всего 4%.

Свободнорастущие кустарники (групповые и одиночные посадки) составляли 62,7% от общего количества, в живой изгороди – 37,3%.

Кустарники в возрасте от 10 до 20 лет составляли 73,6% от общего количества, до 5 лет – 26,3%. Преобладали дикорастущие виды ивняка.

По данным инвентаризации на пробных площадях (Даянанда М., Двадцатова Т.В.) 2023 года ассортимент насаждений на пробных площадях представлен 15 видами кустарников, сорта растений отсутствуют.

Кустарники представлены лиственными видами – всего 15 наименований. Наибольшую долю составляет дерен белый *Cornus alba* L. – 19%, боярышник перистонадрезанный *Crataegus pinnatifida* Bunge, и ива трёхтычинковая *Salix triandra* L. – по 12%. Достаточно представлены боярышник обыкновенный *Crataegus rhipidophylla* Gand. – 10%, ива мирзинолистная *Salix myrsinifolia* Salisb. – 8%, а также ива пепельная *Salix cinerea* L., ива пятитычинковая *Salix pentandra* L. и облепиха крушиновидная *Hippophae rhamnoides* L. – составляют по 6%. К прочим видам относятся 7 наименований кустарников, в том числе роза морщинистая *Rosa rugosa* Thunb., смородина золотистая *Ribes aureum* Pursh., пузыреплодник калинолистный *Physocarpus opulifolius* (L.) Maxim.

Следует отметить, что за прошедшие десять лет появились новые виды кустарников: облепиха крушиновидная *Hippophae rhamnoides* L. и ива пятитычинковая *Salix pentandra* L. Если первый вид мог быть занесен в процессе рекреации, то второй – аборигенный вид из группы так называемых «пионерных», который самостоятельно заселяет удобные для него места. Эту иву не пугают ни бедные и уплотненные почвы, ни избыточное увлажнение. Она прекрасно себя чувствует на намывных грунтах и осваивает их одной из первых.

Таким образом, среди деревьев преобладают 4 широколиственных вида – дуб черешчатый *Quereus robur* L., вяз гладкий *Ulmus laevis* Pall., липа мелколистная *Tilia cordata* Mill., клен остролистный *Acer platanoides* L.,

среди кустарников виды, которые используются для озеленения территории – дерен белый *Cornus alba* L., боярышник перистонадрезанный *Crataegus pinnatifida* Bunge, боярышник обыкновенный *Crataegus rhipidophylla* Gand., а также виды свойственные для данного региона и способные произрастать на почвах с высоким уровнем увлажнения – ива трёхтычинковая *Salix triandra* L., ива мирзинолистная *Salix myrsinifolia* Salisb., ива пепельная *Salix cinerea* L., ива пятитычинковая *Salix pentandra* L.

При оценке насаждений проводился анализ соотношения деревьев и кустарников в насаждениях Южно-Приморского парка, поскольку это нормируемый показатель. Для сравнения взяли данные 2014 года (Изотова Т.В., Бабашкина И.Ю.) и данных пробных площадок на 2023 год (Даянанда М., Двадцатова Т.В.). По данным анализа соотношения деревьев и кустарников меньше нормы. На всей территории парка произрастает 30565 деревьев и 77 560 кустарников, таким образом фактическое соотношение составляет 1 : 2,54, что меньше нормативного на 7,56. По данным полевых исследований на пробных площадях произрастает 284 дерева и 49 кустарников, таким образом фактическое соотношение составляет 1 : 0,17, что меньше нормативного на 9,83. Данные представлены в табл. 5.

Таблица 5

**Соотношение деревьев и кустарников в насаждениях  
«Южно-Приморского парка»**

**The ratio of trees and shrubs in the plantings of the Yuzhno-Primorskiy Park**

Год инвентаризации	Количество, шт.		Соотношение	
	деревьев	кустарников	фактическое	нормативное
2014 год (по данным Изотовой Т.В. и Бабашкиной И.Ю.)	30565	77560	1 : 2,54	1 : 10
2023 год (по данным Даянанды М. и Двадцатовой Т.В.)	284	49	1 : 0,17	1 : 10

Таким образом, соотношение деревьев и кустарников ниже нормативов, независимо от способа исследования – сплошной пересчет или по пробным площадям. Распределение деревьев и кустарников по площади отличается в разных частях парка. Северная часть парка изначально устраивалась на площади с существующими естественными насаждениями, которые в ходе благоустройства оказались мало затронуты, поэтому там складывается ощущение «леса», древостоя с небольшим количеством кустарников. В южной части, которая благоустраивалась более тщательно,

деревья представлены в основном по периметру территории, вдоль дорожек и площадок, в виде небольших групп и солитеров на газоне; кустарники при этом также в основном также представленными рядовыми посадками (живыми изгородями) по периметру территории, вдоль дорожек и площадок. В любом случае доля кустарников сильно не доходит до рекомендуемых нормативами значений.

По данным исследований определено, что наибольшее число деревьев находится в состоянии «сильно ослабленные» – 29,23%; при этом в категории «без признаков ослабления» – 26,06%, «ослабленные» – 25,35%, «усыхающие» – 13,38%, «сухостой текущего года» – 5,63%, «сухостой прошлых лет» – 0,35%. Наибольшее число кустарников находится в «хорошем состоянии» – 57,14%, в категории «удовлетворительное состояние» – 20,41%, в «неудовлетворительном состоянии» – 22,45%. Данные представлены в табл. 6.

Таблица 6

**Распределение деревьев и кустарников по категориям состояния  
в Южно-Приморском парке Санкт-Петербурга**

**Distribution of trees and shrubs by category of condition  
in the South-Primorsky Park of St. Petersburg**

Год исследования	Категории состояния деревьев с указанием признаков						Категории состояния кустарников		
	1 Без признаков ослабления	2 ослабленные	3 сильно ослабленные	4 усыхающие	5 сухостой текущего года	6 сухостой прошлых лет	1 категория	2 категория	3 категория
2014	19312	1973	1115	43	–	–	29334	59	9
%	85,4	9,2	5,2	0,2	–	–	99,6	0,2	0,12
2023	74	72	83	38	16	1	28	10	11
%	26,06	25,35	29,23	13,38	5,63	0,35	57,14	20,41	22,45

В 2014 году категория состояния определялась только для преобладающих видов деревьев и кустарников. В основном 3 и 4 категории состояния приходились на иву ломкую *Salix fragiles* L., клён остролистный *Acer platanoides* L., липу мелколистную *Tilia cordata* Mill. Основной причиной ослабленных и усыхающих деревьев были названы намывные грунты, ко-

торые имеют повышенную плотность препятствующую распространению и росту корневых систем. Считалось, что на намывных грунтах, в силу их значительно большей плотности, посадочные ямы следует предусматривать также значительно большего размера, чем это предписано СНиП, так как плотные стенки посадочных ям лишают растения необходимой площади питания.

По исследованиям 2023 года на пробных площадях был выявлен даже сухостой. В благоустроенной части парка это отдельные деревья или группы вязов, что связано с распространением «голландской» болезни ильмовых в нашем городе.

Основными факторами, влияющими на состояние насаждений, на 2023 год указываются:

- гидрологические режим почв парка, в том числе длительное временное подтопление территории в осенний и весенний периоды в различных частях парка (переуплотненные нижние горизонты почв затрудняют отток избыточных вод),
- антропогенные нагрузки, неравномерное распределение по территории посетителей, количество которых за последние 10 лет существенно возросло;
- атмосферное загрязнение – значительный рост интенсивности автотранспорта,
- недостаточный объем и кратность проведения работ по уходу за территориями,
- рекреационное воздействие: обламывание ветвей, обдир коры, механические повреждения, нанесение надписей на стволы деревьев, разведение открытого огня для проведения пикника,
- повреждение насаждений болезнями и заболеваниями в силу снижения общей устойчивости.

В площадь пробных площадей не вошел такой вид деревьев, как ель обыкновенная, но были выявлены повреждения, которые сильно заметны и снижает в целом визуальное восприятие пространства. В юго-восточной части возле входных зон, где ель обыкновенная представлена в виде одиночных посадок или небольших групп, выявлено усыхание хвои и усыхание нижних ветвей. Вдоль западной и восточной границ зоны аттракционов ель обыкновенная представлена также в виде одиночных посадок или небольших групп, но кроме усыхания хвои и усыхания нижних ветвей, дополнительно выявлены однобокость формирования кроны, угнетение роста развития дерева.

*Заключение.* Почвообразовательный процесс в городских условиях идет не только на естественных материнских породах, но на территориях, полученных путем намыва, где в роли материнской породы выступает намывный грунт. Исследования показывают, что намывные грунты в Южно-Приморском парке изначально сохраняли слоистое строение в виде отдельных горизонтов, соответствующих этапам намыва, но за тридцать лет произошло сильное уплотнение грунтов, в результате чего собственно намывной грунт теперь представляет собой единый плотный суглинистый слой с плитчатой структурой. Вышележащие слои формируются в результате хозяйственной деятельности человека, в связи с чем мощность верхнего гумусированного горизонта существенно выросла.

Агрохимические показатели в нижних горизонтах не претерпели сильных изменений в отличие от верхнего горизонта, который постоянно подвергается воздействию человека. В целом плодородие корнеобитаемого слоя хозяйственные службы стараются поддерживать на уровне, отвечающем потребностям растительности.

Состояние насаждений в Южно-Приморском парке в настоящее время в значительной мере оценивается как ослабленное. Однако уплотнение намывного горизонта является далеко не самой главной причиной, хотя и влияет на гидрологический режим территории, приводя к застою влаги и даже подтоплению в весенний и осенний периоды, что, конечно, тоже приводит к ослаблению насаждений. Но главная причина ухудшения состояния древесно-кустарниковой растительности все-таки в увеличении рекреационной нагрузки и ухудшении экологического состояния города в целом. Так одной из причин выщелачивания верхнего горизонта можно назвать постоянно ведущуюся застройку, но не столько строительный мусор, сколько известковая строительная пыль, беспрепятственно распространяющаяся по всему городу. К сожалению, вопросами загрязнения окружающей среды именно строительной пылью сейчас практически никто не занимается.

Крупные по площади парки, такие как Южно-Приморский, требуют более внимательного отношения к мероприятиям, направленным на улучшение почвенного плодородия, и стандартного комплекса мероприятий по уходам за насаждениями. При этом желательно усилить периферийное озеленение, разработать структуру периметральных посадок для защиты как растительности, так и почв от заноса загрязняющих веществ со стороны городской застройки.

*Сведения о финансировании исследования.* Исследования выполнены в рамках проекта «Газон как индикатор состояния устойчивой городской среды и адаптации к изменениям климата», поддержанного Российским научным фондом.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-26-20120(<https://rscf.ru/project/22-26-20120/>) и гранта Санкт-Петербургского научного фонда в соответствии с соглашением от «14» апреля 2022 г. № 31/2022.

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

### **Библиографический список**

*Аксельрод В.И., Васнина Н.Н., Демидова Д.А.* Сады и парки Ленинграда. Л.: Лениздат, 1981. 239 с.

*Абубакирова Н.Н.* Эффективность проектов развития намывных территорий (на примере Санкт-Петербурга): направление 21.04.02 «Землеустройство и кадастры»: выпускная квалификационная работа (магистратура). СПб., 2023. 78 с.

*Александрова Л.Н., Найденова О.А.* Лабораторно-практические занятия по почвоведению. Л.: Колос, 1967. 350 с.

*Богданова Л.С., Двадцатова Т.В., Мельничук И.А., Субота М.Б., Яковлев А.А.* Почвенные условия газонов на объектах зеленых насаждений общего пользования города Санкт-Петербурга в различных микроклиматических условиях // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. Вып. 245. С. 175–190. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.245.175-190

*Бойцова О.В.* Историко-градостроительное преобразование намывных территорий в Санкт-Петербурге и их развитие с учетом особенностей правового регулирования // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: сб. ст. VIII Междунар. науч.-практич. конф.: в 4 ч. Пенза, 15.12.2017 г. Ч. 1. Пенза: «Наука и Просвещение» (ИП Гуляев Г.Ю.), 2017. С. 285–289.

*Бубнова А.Б., Вагизов М.Р., Двадцатова Т.В., Крюковский А.С., Мельничук И.А.* Применение беспилотных летательных аппаратов и наземных методов исследований для изучения изменения видового состава газонов в различных экологических условиях при воздействии рекреационной нагрузки (на примере Обуховского сквера, Санкт-Петербург) // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 240. С. 64–83. DOI 10.21266/2079-4304.2022.240.64-83.

*Гончарова О.Ю., Семенюк О.В., Стома Г.В.* Исследование почв на урбанизированных территориях: анализ методических аспектов и подходов (на примере г. Москвы) // Вестник Московского университета. Сер. 17 «Почвоведение». 2021. № 4. С. 4–12.

*Капелькина Л.П.* Загрязнители в почвах мегаполисов. Проблемы и парадоксы нормирования // Экология городских территорий. 2010б. № 3. 13 с.

*Капелькина Л.П.* Некоторые экологические аспекты мелиорации земель // Региональная экология. 2010а. 4 (30). С. 40–43.

*Капелькина Л.П.* Характеристика намывных грунтов Финского залива в связи с использованием их под озеленение: автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. Л.: ГЛТА, 1974. 19 с.

Крейер К.Г. [и др.] Практикум по агрохимическому анализу почв: учеб. пособие. СПб.: СПбГУ, 2005. 88 с.

Павловский А.А., Менжулин Г.В. Изменения климата и оценка перспективы использования в Петербургском градостроении искусственных намывных территорий // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2019. № 593. С. 70–84.

Суворова А.А., Веретенникова К.В. Роль намывных территорий в развитии Санкт-Петербурга // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2023. № 11-4 (86). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-namuvnyh-territoriy-v-razvitiy-sankt-peterburga> (дата обращения: 20.02.2024).

Уварова Е.Л., Павлова В.А. Комплексная организация намывных территорий в Санкт-Петербурге // Вестник СГУГиТ. 2023. Т. 28, № 3. URL: <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2023-28-3-92-108>.

Часовская В.В. Исследование химических свойств намывных грунтов Финского залива // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2005. № 10. С. 147–149.

Часовская В.В. Формирование почвы на намывных грунтах в урбоэкосистемах: автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. СПб.: СПбГЛТУ, 2007. 18 с.

Angers D.A., Caron J. Plant-induced changes in soil structure: processes and feedbacks // Biogeochemistry. 1998. 42. P. 55–72.

Bakhmatova K.A., Matynyan N.N., Sheshukova A.A. Anthropogenic soils of urban parks // Eurasian Soil Science. 2022. Vol. 55, no. 1. P. 64–80.

Benrong P., Chenchen L., Di J. et al. Modeling the total allowable area for coastal reclamation: A case study of Xiamen, China // Ocean & Coastal Management. 2013. No. 76. P. 38–44. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2013.02.015.

Maximova E., Abakumov E. Alluviated soils of the Saint-Petersburg city // Biological Communications. 2015. No. 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/alluviated-soils-of-the-saint-petersburg-city> (дата обращения: 16.01.2024).

Polyakov V. et al. Ecotoxicological state and pollution status of alluvial soils of St. Petersburg, Russian Federation // Soil Science Annual. 2020. Vol. 71, no. 3. P. 221–235.

Scharenbroch B.C., Lloyd J.E., Johnson-Maynard J.L. Distinguishing urban soils with physical, chemical, and biological properties // Pedobiologia. 2005. Vol. 49, no. 4. P. 283–296.

Sengupta Dh., Chen R., Meadows M. Building beyond land: An overview of coastal land reclamation in 16 global megacities // Applied Geography. 2017. P. 90. DOI: 10.1016/j.apgeog.2017.12.015.

Shikhova N.S. Monitoring the physical condition of urban soils in connection with landscaping problems // Siberian Ecological Journal. 2005. Vol. 5. P. 899–907.

## References

Abubakirova N.N. Effectiveness of projects for the development of alluvial territories (on the example of St. Petersburg): direction 04/21/02 «Land management and cadastres»: final qualification work (master's degree). St. Petersburg, 2023. 78 p. (In Russ.)

Alexandrova L.N., Naidenova O.A. Laboratory and practical classes in soil science. L.: Kolos, 1967. 350 p. (In Russ.)

Angers D.A., Caron J. Plant-induced changes in soil structure: processes and feedbacks. *Biogeochemistry*, 1998, 42, pp. 55–72.

Axelrod V.I., Vasnina N.N., Demidova D.A. Gardens and parks of Leningrad. L.: Lenizdat, 1981. 239 p. (In Russ.)

Bakhmatova K.A., Matynyan N.N., Sheshukova A. A. Anthropogenic soils of urban parks. *Eurasian Soil Science*, 2022, vol. 55, no. 1, pp. 64–80.

Benrong P., Chenchen L., Di J. et al. Modeling the total allowable area for coastal reclamation: A case study of Xiamen, China. *Ocean & Coastal Management*, 2013, no. 76, pp. 38–44. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2013.02.015.

Bogdanova L.S., Dvadsatova T.V., Melnichuk I.A., Subota M.B., Yakovlev A.A. Soil conditions of lawns on public green spaces of the city of St. Petersburg in various microclimatic conditions. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2023, iss. 245, pp. 175–190. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.245.175-190. (In Russ.)

Boytsova O.V. Historical and urban planning transformation of alluvial territories in St. Petersburg and their development taking into account the peculiarities of legal regulation. *Fundamental and applied scientific research: current issues, achievements and innovations*: collection of articles of the VIII International Scientific and Practical Conference: in 4 parts. Penza, December 15, 2017, part 1. Penza: «Science and Education» (IP Gulyaev G.Yu.), 2017, pp. 285–289. (In Russ.)

Bubnova A.B., Vagizov M.R., Dvadsatova T.V., Kryukovsky A.S., Melnichuk I.A. Application of unmanned aerial vehicles and ground-based research methods to study changes in the species composition of lawns in different ecological conditions under the influence of recreational load (by the example of Obukhovsky square, St. Petersburg). *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2022, iss. 240, pp. 64–83. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.240.64-83. (In Russ.)

Chasovskaya V.V. Investigation of chemical properties of alluvial soils of the Gulf of Finland. *Actual problems of the forest complex*, 2005, no. 10, pp. 147–149. (In Russ.)

Chasovskaya V.V. Soil formation on alluvial soils in urban ecosystems: abstract of the dissertation of the Candidate of Agricultural Sciences: 06.03.03. St. Petersburg: SPbGLTU, 2007. 18 p. (In Russ.)

Goncharova O.Yu., Semeniyuk O.V., Stoma G.V. Soil research in urbanized territories: analysis of methodological aspects and approaches (using the example of Moscow). *Bulletin of the Moscow University. Series 17 «Soil Science»*, 2021, no. 4, pp. 4–12. (In Russ.)

Kapelkina L.P. Characteristics of alluvial soils of the Gulf of Finland in connection with their use for landscaping: Abstract of the diss. for the degree of Candidate of Agricultural Sciences. (06.01.03) / Leningr. forestry engineering. Academy of Sciences named after S.M. Kirov. L., 1974. 19 p. (In Russ.)

Kapelkina L.P. Pollutants in the soils of megacities. Problems and paradoxes of rationing. *Ecology of urban areas*, 2010b, no. 3. 13 p. (In Russ.)



Kapelkina L.P., Some environmental aspects of land reclamation. *Regional ecology*, 2010a, 4 (30), pp. 40–43. (In Russ.)

Kreyer K.G. [et al.] Workshop on agrochemical soil analysis: textbook. stipend. St. Petersburg: St. Petersburg State University, 2005. 88 p. (In Russ.)

Maximova E., Abakumov E. Alluviated soils of the Saint-Petersburg city. *Biological Communications*, 2015, no. 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/alluviated-soils-of-the-saint-petersburg-city> (accessed January 16, 2024).

Pavlovsky A.A., Menzhulin G.V. Climate change and assessment of the prospects for the use of artificial alluvial territories in St. Petersburg urban planning. *Proceedings of the Main Geophysical Observatory named after A.I. Voeikov*, 2019, no. 593, pp. 70–84. (In Russ.)

Polyakov V. et al. Ecotoxicological state and pollution status of alluvial soils of St. Petersburg, Russian Federation. *Soil Science Annual*, 2020, vol. 71, no. 3, pp. 221–235.

Scharenbroch B.C., Lloyd J.E., Johnson-Maynard J.L. Distinguishing urban soils with physical, chemical, and biological properties. *Pedobiologia*, 2005, vol. 49, no. 4, pp. 283–296.

Sengupta Dh., Chen R., Meadows M. Building beyond land: An overview of coastal land reclamation in 16 global megacities. *Applied Geography*, 2017, p. 90. DOI: 10.1016/j.apgeog.2017.12.015.

Shikhova N.S. Monitoring the physical condition of urban soils in connection with landscaping problems. *Siberian Ecological Journal*, 2005, vol. 5, pp. 899–907.

Suvorova A.A., Veretennikova K. V. The role of alluvial territories in the development of St. Petersburg. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*, 2023, no. 11-4 (86). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/r> (In Russ.)

Uvarova E.L., Pavlova V.A. Integrated organization of reclaimed territories in St. Petersburg. *Vestnik SSUGT*, 2023, vol. 28, no. 3. URL: <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2023-28-3-92-108>. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 27.03.2023

---

**Двадцатова Т.В., Изотова Т.В., Мельничук И.А., Часовская В.В.** Почвенные условия и состояние зеленых насаждений Южно-Приморского парка в Санкт-Петербурге // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 250. С. 212–237. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.212-237

Статья посвящена изучению современного состояния почвы и насаждений Южно-Приморского парка в Санкт-Петербурге. Парк создан на намывных грунтах и на сегодняшний день является одним из крупнейших элементов водно-зеленого каркаса Петербурга. Авторы проследили динамику формирования почвенного слоя (по данным 1974, 2004 и 2024 гг.). Выявлено, что происходит постепенное уплотнение нижних намывных горизонтов, что плохо сказывается на гидрологических условиях территории. При этом верхние – насыпные – горизонты постепенно увеличивают свою мощность и удерживают плодородие за

счет постоянной хозяйственной деятельности человека. Видовое разнообразие древесно-кустарниковой растительности изменилось несущественно: утрачены некоторые декоративные виды, высаженные единично; отмечено появление аборигенных видов, устойчивых к неблагоприятным условиям среды, в первую очередь, к уплотнению почв и избыточному увлажнению. Состояние насаждений имеет тенденцию к ухудшению – общее ослабление растений по причине возросшей рекреационной нагрузки.

**Ключевые слова:** почва, состояние насаждений, Южно-Приморский парк.

**Dvadtsatova T.V., Izotova T.V., Melnichuk I.A., Chasovskaya V.V.** Soil conditions and the state of the green spaces of the Yuzhno-Primorskiy Park in St. Petersburg. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2024, iss. 250, pp. 212–237 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.212-237

The article focuses on studying the current condition of the soil and plantings in Yuzhno-Primorskiy Park in St. Petersburg. The park was created on reclaimed soils and is currently one of the largest elements of St. Petersburg's water-green framework. The authors tracked the dynamics of soil layer formation (based on data from 1974, 2004, and 2024). It was found that there is a gradual compaction of the lower reclaimed horizons, which negatively affects the hydrological conditions of the area. At the same time, the upper – filled – horizons are gradually increasing in thickness and retaining fertility due to continuous human activity. The species diversity of woody and shrub vegetation has changed insignificantly: some ornamental species, planted singly, have been lost; there has been an emergence of indigenous species that are resistant to adverse environmental conditions, primarily to soil compaction and excessive moisture. The condition of the plantings tends to deteriorate – an overall weakening of plants due to increased recreational load.

**Key words:** soil, condition of plantings, South Primorsky Park.

---

**ДВАДЦАТОВА Татьяна Владимировна** – старший преподаватель кафедры декоративного растениеводства Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. ORCID: 0000-0001-6621-6080. SPIN-код: 4328-6337.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: tv@20va.ru

**DVADTSATOVA Tatiana V.** – Senior Lecturer of the Department of Decorative Plant Growing, St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0000-0001-6621-6080. SPIN-code: 4328-6337.

194021. Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: tv@20va.ru

**ИЗОТОВА Татьяна Владимировна** – доцент кафедры декоративного растениеводства Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат сельскохозяйственных наук. ORCID: 0000-0001-8969-4792. SPIN-код: 9923-2838.

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

**IZOTOVA Tatiana V.** – PhD (Agriculture), Associate Professor of the Department of Decorative Plant Growing, St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0000-0001-8969-4792. SPIN-code: 9923-2838.

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

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

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

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

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

**ЧАСОВСКАЯ Виктория Валерьевна** – доцент кафедры почвоведения Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент. ORCID: 0009-0008-6384-2068. SPIN-код: 1248-6230. vika0578@mail.ru.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: vika0578@mail.ru.

**CHASOVSKAYA Viktoriya V.** – PhD (Agriculture), Associate Professor of the Department of Soil Science, St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0009-0008-6384-2068. SPIN-код: 1248-6230.

194021. Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: vika0578@mail.ru.

## 2. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ЛЕСОЗАГОТОВОК

---

УДК 621.865.8:625.8:630\*36

С.Е. Анисимов, Е.М. Царев, К.П. Рукомойников, И.С. Анисимов,  
Н.С. Анисимов, В.Е. Макаров

### МНОГОЗВЕННЫЙ КОМБИНИРОВАННЫЙ МАНИПУЛЯТОР ДЛЯ РУБОК УХОДА ЗА ЛЕСОМ

*Введение.* На сплошных рубках и рубках ухода по сортиментным технологиям непосредственно у пня возможны три принципиально отличающиеся группы способов заготовки сортиментов: во-первых, группа способов, основанная на принципе действия скандинавских харвестерных машин; во-вторых, способы с протаскиванием ствола через процессорную головку вниз с использованием собственного веса; в-третьих, варианты сортиментной обработки деревьев сверху вниз.

Сущность способа обработки деревьев сверху вниз заключается в многоступенчатой раскряжке деревьев по высоте, заканчивающейся отделением дерева от пня [Анисимов, 2000; Анисимов, Мазуркин, 2003]. Для этого необходимо оснастить валочно-пакетирующую машину специальным многозвенным комбинированным манипулятором (рис. 1).

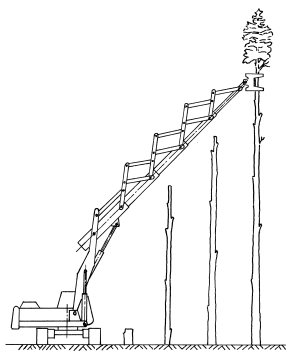


Рис. 1. Валочно-пакетирующая машина со специальным манипулятором  
Fig. 1. The felling-bagging machine with a special manipulator

*Материалы и методика исследования.* Целью исследований является создание многозвенного комбинированного манипулятора с выдвиганием рабочего органа до 18 м при проведении рубок прореживания и проходных и 12,5 м – при сплошных рубках [Алябьев и др., 2020; Шегельман, Будник, 2011; Швец, 2009] (рис. 2). Для пояснения рис.2 использованы следующие условные обозначения: 1 – центр поворота платформы валочно-пакетирующей машины (ВПМ), 2 – пасака, 3 – граница рабочей зоны манипулятора для обоих волоков, 4 – верхняя граница высоты поднятия манипулятора, 5 – теоретический график изменения высоты срезки с грузовым моментом манипулятора 270 кН·м для ВПМ типа ЛП-19В, 6 – первая ступень срезки верхней части деревьев с кроной, 7 – вторая ступень срезки двух частей растущего дерева (верхняя часть с кроной, а затем сортимент длиной 5-6 м), 8 – третья (нижняя) ступень срезки комлевых сортиментов с оставлением пней.

В ходе исследований были проанализированы пути решения поставленной задачи. Рассмотрен вариант изменения длины рукояти сменного манипуляторного оборудования [Бартенев и др., 2011; Кононович и др., 2015; Патент..., 2021; Huang и Yao, 1999; Xu и др., 2020; Kong и Gosselin, 2001; Матвеевко, 2021].

Предложена конструкция многозвенного комбинированного манипулятора, структурно-компоновочная схема которого, представлена на рис. 3,а) и его модель (рис. 3 б), выполненная в масштабе 1:10.

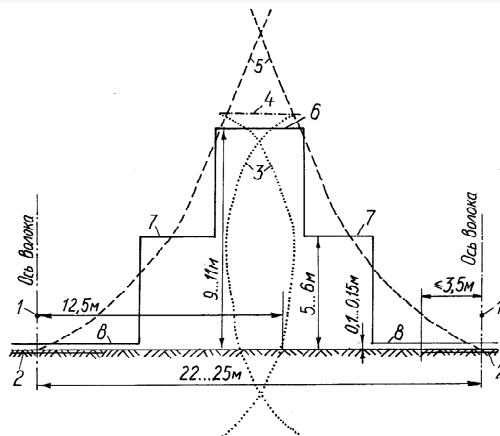


Рис. 2. Схема выдвигания рабочего органа при сплошных рубках и рубках ухода

Fig. 2. The scheme of the extension of the working body in continuous logging and care cabins

Многозвенный комбинированный манипулятор состоит из стрелы 1, подъем и опускание которой осуществляется гидроцилиндром 2. Телескопическая рукоять включает в себя неподвижное основание 3, подвижные секции шарнирно-сочлененной фермы 4, 5 и 6. Динамическое изменение длины осуществляется за счет поворотных 11 и толкающих рычагов 9, 10. Гидроцилиндр 12 осуществляет поворот корпуса телескопической рукояти 3 и срезающего органа 13 в вертикальной плоскости. Механизм совмещения движения рукояти и выдвижения срезающего органа состоит из тяги 8 и гуська стрелы 7. Дополнительные звенья 14, образуют с звеньями 9 пантографные механизмы выдвижения подвижных звеньев телескопической рукояти.

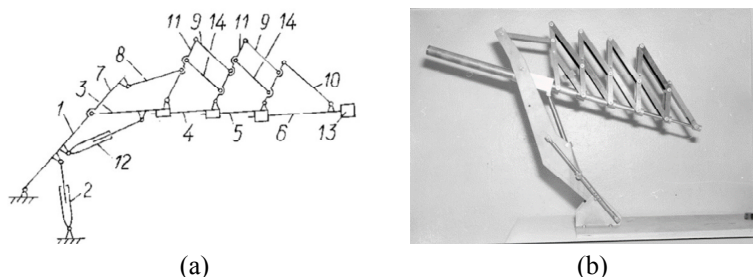


Рис. 3. Многозвенный комбинированный манипулятор:

- (а) кинематическая схема манипулятора с пантографными механизмами;
- (б) модель многозвенного комбинированного манипулятора

Fig. 3. Multi-link combined manipulator: (a) kinematic diagram of a manipulator with pantograph mechanisms; (b) model of a multi-link combined manipulator

Проектирование манипуляторного оборудования состоит из нескольких этапов [Алябьев и др., 2020; Черник, Смирнов, 2009; Huynh и др., 2020; Karkalos и др., 2017; Nof, 1999].

Рассмотрим данные этапы проектирования применительно к предложенной конструкции многозвенного комбинированного манипулятора.

1. Постановка задачи поиска технического решения. В настоящее время рубки ухода в молодняках (осветления и прочистки) выполняются вручную с использованием топоров и моторных кусторезов. В то же время ежегодно нарастают объемы работ на рубках ухода (прореживания и проходных рубках), увеличиваются площади естественных хвойно-лиственных молодняков. Поэтому, при проведении этих рубок, одной из задач лесного машиностроения становится создание маневренных работоспособных манипуляторов со значительным вылетом рабочего органа.

2. Техническое задание на проектирование. Исходя из технических возможностей транспортно-технологического модуля лесозаготовительной машины, например, валочно-пакетирующей машины ЛПП-19В, необходимо серийный шарнирно-сочлененный манипулятор с вылетом до 10 м модульно оснастить многозвенным комбинированным манипулятором с вылетом до 18 м, для обеспечивающим обработку лиственных деревьев на пасаках шириной не менее 25 м, грузоподъемностью 8 кН и грузовым моментом 144 кН·м.

3. Разработка компоновочно-кинематической схемы как минимум для трех случаев: на максимальном вылете манипулятора; на промежуточном вылете манипулятора; на минимальном вылете манипулятора.

4. Структурный анализ манипулятора проводится для проверки работоспособности манипулятора в целом.

*Результаты исследования.* При проведении структурного анализа конструкции манипулятора были сделаны следующие допущения [Ермалицкий, 2010; Полетайкин, Иванов, 2017; Jagdish, 2011]:

- звенья механизма являются абсолютно твердыми телами;
- отсутствуют зазоры в подвижных соединениях звеньев;
- не учитывается собственная степень свободы захватно-срезающего устройства;
- движение рассматривается без учета боковых колебаний, только в вертикальной плоскости и совершает сложное плоско – параллельное движение.

Примем следующие условные обозначения: ВППК – вращательная пара пятого класса; ПППК – поступательная пара пятого класса.

Были проведены и экспериментальные исследования предложенной конструкции манипулятора.

Для эксперимента использовалась модель манипулятора (масштаб 1:10). Для возможности быстрого изменения положения конструкции шарнирно-сочлененной фермы и ее фиксации использовался раздвижной стержень со ступенчатым фиксатором (шаг фиксации 5 мм), имитирующий работу гидроцилиндров манипулятора.

Изменение положения координаты конца телескопической рукояти модели манипулятора фиксировалось на фоне масштабной сетки [Добрачев и др., 2008; Емтыль, 2002; Ермалицкий, 2010].

Структурно-кинематическая схема предложенного многозвенного комбинированного манипулятора представлена на рис. 4. Число, класс и вид каждой кинематической пары представлен в табл. 1.

В целом данный манипулятор имеет 41 кинематическую пару пятого класса, из них 34 – вращательных и 7 – поступательных.

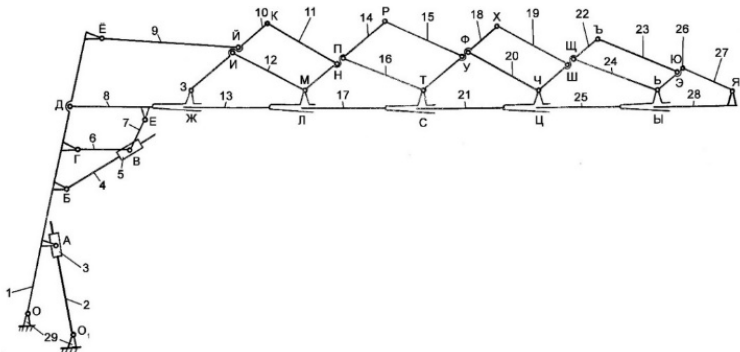


Рис. 4. Структурно-кинематическая схема многосвязного комбинированного манипулятора; 1...28 – звенья манипулятора  
Fig. 4. Structural and kinematic scheme of a multi-link combined manipulator; 1...28 – links of the manipulator

Таблица 1

Кинематические пары  
Kinematic pairs

$A_1 (2,3) - \text{ПППК}$	$B (4,5) - \text{ПППК}$	$Ж (8,13) - \text{ПППК}$
$Л (13,17) - \text{ПППК}$	$С (17,21) - \text{ПППК}$	$Ц (21,25) - \text{ПППК}$
$Ы (25,28) - \text{ПППК}$	$A_2 (1,3) - \text{ВППК}$	$О (1,29) - \text{ВППК}$
$О_1 (2,29) - \text{ВППК}$	$Б (1,4) - \text{ВППК}$	$Г (1,6) - \text{ВППК}$
$B_1 (5,6) - \text{ВППК}$	$B_2 (5,7) - \text{ВППК}$	$B_3 (6,7) - \text{ВППК}$
$Е (7,8) - \text{ВППК}$	$Д (1,8) - \text{ВППК}$	$Ё (1,9) - \text{ВППК}$
$З (8,10) - \text{ВППК}$	$И (10,12) - \text{ВППК}$	$Й (9,10) - \text{ВППК}$
$К (10,11) - \text{ВППК}$	$М_1 (12,13) - \text{ВППК}$	$М_2 (12,14) - \text{ВППК}$
$М_3 (13,14) - \text{ВППК}$	$Н (11,14) - \text{ВППК}$	$П (14,16) - \text{ВППК}$
$Р (14,15) - \text{ВППК}$	$Т_1 (16,18) - \text{ВППК}$	$У (16,18) - \text{ВППК}$
$Т_2 (16,17) - \text{ВППК}$	$Т_3 (17,18) - \text{ВППК}$	$Ф (18,20) - \text{ВППК}$
$Х (18,19) - \text{ВППК}$	$Ч_1 (20,21) - \text{ВППК}$	$Ч_2 (20,22) - \text{ВППК}$
$Ч_3 (21,22) - \text{ВППК}$	$Ш (19,22) - \text{ВППК}$	$Щ (22,24) - \text{ВППК}$
$Ъ (22,23) - \text{ВППК}$	$Ы_1 (24,25) - \text{ВППК}$	$Ы_2 (24,26) - \text{ВППК}$
$Ы_3 (25,26) - \text{ВППК}$	$Э (23,26) - \text{ВППК}$	$Ю (26,27) - \text{ВППК}$
$Я (27,28) - \text{ВППК}$		

Примечание: в скобках указаны номера звеньев, образующих кинематическую пару. Причем кинематические пары А и В образуют несколько пар:  $A_1, A_2, B_1, B_2, B_3, M_1, M_2, M_3, T_1, T_2, T_3, Ч_1, Ч_2, Ч_3, Ы_1, Ы_2, Ы_3$ .



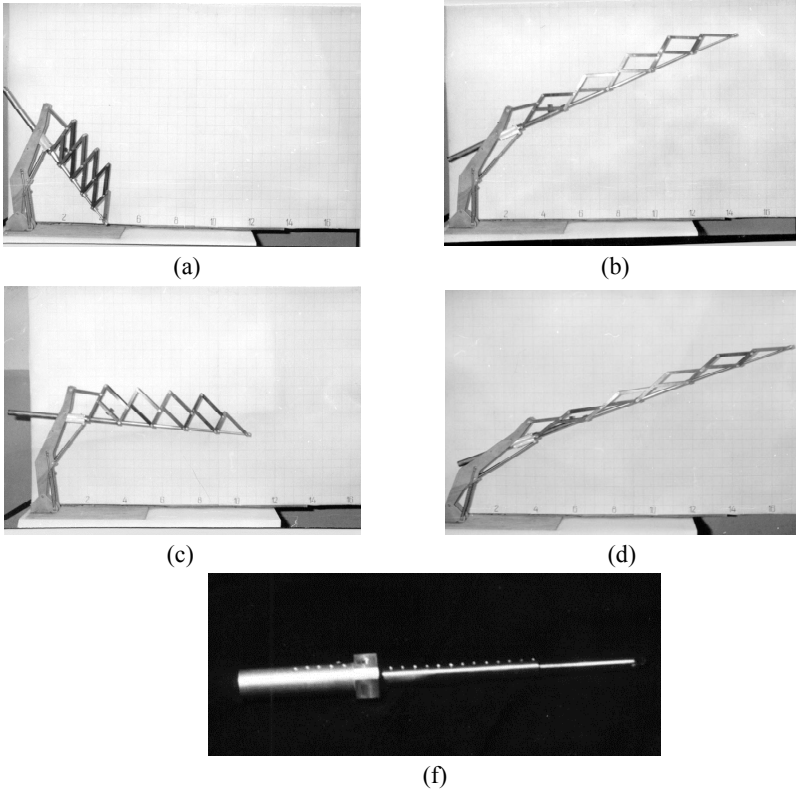


Рис. 5. Фрагменты структурных исследований модели многозвенного комбинированного манипулятора: (а) – минимальный вылет; (b), (c) – промежуточные вылеты; (d) – максимальный вылет; (f) – раздвижной стержень (имитация гидроцилиндра)

Fig. 5. Fragments of structural studies of the multi-link combined manipulator model: (a) – minimum departure; (b), (c) – intermediate departures; (d) – maximum departure; (f) – sliding rod (imitation of a hydraulic cylinder)

Определим число степеней свободы манипулятора по формуле Чебышева:

число степеней свободы данного манипулятора равно:

$$W = 3 \cdot 28 - 2 \cdot 41 = 2. \quad (2)$$

То есть, рассматриваемая кинематическая цепь данного манипулятора обладает двумя степенями свободы, что соответствует числу приводов, обеспечивающих работоспособность данного манипулятора.

Фото фрагментов структурных исследований модели манипулятора представлены на рис. 5. Результаты экспериментальных наблюдений на модели сведены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты экспериментальных структурных исследований  
на модели многозвенного комбинированного манипулятора**

**The results of experimental structural studies on the model  
of a multi-link combined manipulator**

№ отверстия	Вылет манипулятора, м	Величина выдвижения раздвижного стержня, мм
1	4,8	5
2	6,0	10
3	7,2	15
4	8,4	20
5	9,6	25
6	10,8	30
7	12,0	35
8	13,2	40
9	14,4	45
10	15,6	50
11	16,8	55
12	18,0	60

*Заключение.* Подводя итоги описанным выше результатам, можно отметить, что в настоящее время в машиностроении при проектировании манипуляторов лесных машин (в частности, телескопических и комбинированных) для выдвижения рабочего (или исполнительного) органа на значительное расстояние свыше 12,5 м используются гидроцилиндры и канатно-блочные системы. Общими недостатками которых является то, что транспортно-энергетический модуль не является унифицированным, а требует его модернизации, усложнения. А использование шарнирно-сочлененной фермы в качестве механизма выдвижения подвижных секций создает условия для увеличения вылета манипулятора с сохранением транспортно-энергетического модуля унифицированным.

На основе проведенных структурных анализов кинематических схем многозвенных комбинированных манипуляторов было найдено решение конструкции шарнирно-сочлененной фермы телескопической рукояти манипулятора за счет добавления дополнительных рычагов, образующих пантографные механизмы выдвижения подвижных секций.

Структурный анализ показал, что предложенная структура манипулятора с пантографным механизмом выдвижения подвижных секций телескопической рукояти является работоспособной. При работе манипулятора описанной конструкции обеспечивается вылет рабочего органа манипулятора на заданную длину (18 м) и требуемая точность доставки рабочего органа в заданное место. Длины выдвижения секций рукояти одинаковы при различных значениях вылета (1,2 м);

*Вклад авторов.* Статья подготовлена с равной долей участия всех авторов.

*Сведения о финансировании исследования.* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-26-00129, <https://rscf.ru/project/24-26-00129/>

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

### Библиографический список

Алябьев А.Ф., Котиев Г.О., Караваев А.М. Разработка требований назначения к технологическому оборудованию лесной погрузочно-транспортной машины // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2020. № 164. С. 86–100.

Анисимов С.Е. Обоснование конструкции и параметров манипулятора машины для рубок прореживания и проходных: дисс. ... канд. техн. наук. Йошкар-Ола, 2000. 240 с.

Анисимов С.Е., Мазуркин П.М. Многозвенные манипуляторы: научное издание / М-во образования Рос. Федерации, Мар. гос. техн. ун-т. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2003. 73 с.

Бартенев И.М., Емтыль З.К., Татаренко А.П., Драпалюк М.В., Попиков П.И., Бухтояров Л.Д. Гидроманипуляторы и лесное технологическое оборудование. М.: ООО «ФЛИНТА», 2011. 408 с.

Добрачев А.А., Раевская Л.Т., Швец А.В. Исследование кинематики работы звеньев манипулятора в обобщенном виде // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2008. № 3. С. 118–121.

Емтыль З.К. Совершенствование кинематики, динамики и конструкции лесопромышленных гидроманипуляторов: дисс. ... д-ра техн. наук. Воронеж, 2002. 439 с.

Ермалицкий А.А. Результаты экспериментальных исследований процесса погрузки сортиментов навесными гидроманипуляторами // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2010. № 2. С. 65–70.

Кононович Д.А., Мохов С.П., Арико С.Е., Голякевич С.А. Особенности конструкционного исполнения технологического оборудования лесных погрузочно-транспортных машин // Труды БГТУ. 2015. № 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. № 2(175). С. 59–62.

Матвеев В.И. Погрузочно-разгрузочный манипулятор // Инновационное развитие подъемно-транспортной техники: матер. Всерос. науч.-практич. конференции, Брянск, 27–28 мая 2021 года, Брянск: БГТУ, 2021. С. 93–100.

Патент № 2768059 РФ, МПК В66С 23/44. Кран-манипулятор с расширенной зоной действия: № 2021127721 / И.А. Несмиянов, М.Е. Николаев, В.В. Жога; заявл. 20.09.2021; опублик. 23.03.2022.

Полетайкин В.Ф., Иванов С.Г. Расчетная схема технологического оборудования лесных машин. Лесной и химический комплексы – проблемы и решения : сб. матер. по итогам Всерос. науч.-практич. конференции. Красноярск: СибГТУ, 2017. С. 256–258.

Черник А.В., Смирнов Н.А. Кинематический и динамический расчёт сбалансированного манипулятора методами САПР // Механики XXI века. 2009. № 8. С. 71–74.

Швец А.В. Обоснование основных параметров манипулятора для лесной промышленности // Леса России в XXI веке: матер. Первой Междунар. науч.-практич. интернет-конференции, Санкт-Петербург, 30 июня 2009 года. СПб.: СПбГЛТУ, 2009. С. 222–225.

Шегельман И.Р., Будник П.В. Обоснование вылета манипулятора и режимов работы валочно-трелевочно-процессорной машины // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2011. № 4(117). С. 81–83.

Huang Z., Yao Y.L. A new closed-form kinematics of the generalized 3-dof spherical parallel manipulator // Robotica. 1999. Vol. 17, no. 5. P. 475–485.

Huynh H. et al. Modelling the dynamics of industrial robots for milling operations // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2020. Vol. 61. P. 16.

Jagdish Dr., Prajapati M. et al. Synthesis of Parallel Mechanism Based Robot Manipulators from Structural Point of View // International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST). 2011. Vol. 3, no. 2. P. 1228–1232.

Karkalos N.E., Markopoulos A.P., Dossis M.F. Optimal model parameters of inverse kinematics solution of a 3r robotic manipulator using and models // International journal of manufacturing, materials, and mechanical engineering. 2017. Vol. 7, no. 3. P. 20–40.

Kong X., Gosselin C. Generation of parallel manipulators witch three translational degrees of freedom based on screw theory // Proceedings of 2001 CCToMMSyn-posium on Mechanisms, Machines and Mechatronics. Saint-Hubert, Montreal, Canada. 2001.

Nof S. Y. Handbook of Industrial Robotics. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1999. P. 1378.

Xu P. et al Novel hybrid robot and its processes for precision polishing of freeform surfaces // Precision Engineering. 2020. Vol. 64. P. 53–62.

## References

Alyabiev A.F., Kotiev G.O., Karavaev A.M. Development of destination requirements for technological equipment for a forest loading and transport vehicle. *Politematicheskij setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University], 2020, no. 164, pp. 86–100. URL: <https://doi.org/10.21515/1990-4665-164-006> (In Russ.)

Anisimov S.E. Substantiation of the design and parameters of the machine manipulator for thinning and walk-through fellings: Cand. Sci. Diss. Yoshkar-Ola, 2000. 240 p. (In Russ.)

Anisimov S.E., Mazurkin P.M. Multi-link manipulators: scientific publication / Ministry of Education Ros. Federation, Mar. state tech. un-t. Yoshkar-Ola: MarSTU, 2003. 73 p. (In Russ.)

Bartenev I.M., Emtyl Z.K., Tatarenko A.P., Drapalyuk M.V., Popikov P.I., Bukhtoyarov L.D. Hydraulic manipulators and forest processing equipment. M.: Limited Liability Company «FLINTA», 2011. 408 p. (In Russ.)

Chernik A.V., Smirnov N.A. Kinematic and dynamic calculation of a balanced manipulator by CAD methods. *Mechanics of the XXI century*, 2009, no. 8, pp. 71–74. (In Russ.)

Dobrachev A.A., Raevskaia L.T., Shvets A.V. Study of the kinematics of the operation of the manipulator links in a generalized form. *Lesnoj vestnik* [Forestry Bulletin], 2008, no. 3, pp. 118–121. (In Russ.)

Emtyl Z.K. Improvement of kinematics, dynamics and design of forestry hydraulic manipulators: Doc. Sci. Diss. Voronezh, 2002. 439 p. (In Russ.)

Ermalitsky A.A. The results of experimental studies of the process of loading assortments by mounted hydraulic manipulators. *Works BSTU: Forest and wood industry*, 2010, no. 2, pp. 65–70. (In Russ.)

Huang Z., Yao Y.L. A new closed-form kinematics of the generalized 3-dof spherical parallel manipulator. *Robotica*, 1999, vol. 17, no. 5, pp. 475–485.

Huynh H. et al. Modelling the dynamics of industrial robots for milling operations. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, vol. 61, p. 16.

Jagdish Dr., Prajapati M. et al. Synthesis of Parallel Mechanism Based Robot Manipulators from Structural Point of View. *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, 2011, vol. 3, no. 2, pp. 1228–1232.

Karkalos N.E., Markopoulos A.P., Dossis M.F. Optimal model parameters of inverse kinematics solution of a 3r robotic manipulator using models. *International journal of manufacturing, materials, and mechanical engineering*, 2017, vol. 7, no. 3, pp. 20–40.

Kong X., Gosselin C. Generation of parallel manipulators with three translational degrees of freedom based on screw theory, *Proceedings of 2001 CCToMMSyn-posium on Mechanisms, Machines and Mechatronics*. Saint-Hubert, Montreal, Canada, 2001.

Kononovich D.A., Mokhov S.P., Ariko S.E., Golyakevich S.A. Features of the structural design of the technological equipment of forest loading and transport vehicles. *Works BSTU: Forest and wood industry*, 2015, no. 2 (175), pp. 59–62. (In Russ.)

Matveenko V.I. Loading and unloading manipulator. *Innovative development of material handling equipment: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference*, Bryansk, May 27–28, 2021, 2021. pp. 93–100. (In Russ.)

Nesmiyanov I.A., Nikolaev M.E., Zhoga V.V. Extended reach crane. Patent RF, no. RU 2768059 C1, 2021. (In Russ.)

Nof S.Y. Handbook of Industrial Robotics. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1999, p. 1378.

Poletaykin V.F., Ivanov S.G. Settlement scheme of processing equipment of forest cars. *Forest and chemical complexes – problems and solutions: Collection of materials on the results of the All-Russian scientific and practical conference*. Krasnoyarsk: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Publ., 2017, pp. 256–258. (In Russ.)

Shegelman I. R., Budnik, P.V. Justification of the departure of the manipulator and the modes of operation of the feller-logging-processor machine. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta [Scientific notes of Petrozavodsk State University]*, 2011, no. 4(117), pp. 81–83. (In Russ.)

Shvets A.V. Justification of the main parameters of the manipulator for the timber industry. *Forests of Russia in the 21st century: materials of the First international scientific and practical Internet conference*, St. Petersburg, June 30, 2009, pp. 222–225. (In Russ.)

Xu P. et al Novel hybrid robot and its processes for precision polishing of freeform surfaces. *Precision Engineering*, 2020, vol. 64, pp. 53–62.

Материал поступил в редакцию 01.02.2024

---

**Анисимов С.Е., Царев Е.М., Рукомойников К.П., Анисимов И.С., Анисимов Н.С., Макаров В.Е.** Многозвенный комбинированный манипулятор для рубок ухода за лесом // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 250. С. 238–251. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.232-251

В статье рассмотрены варианты модернизации конструкции манипулятора лесозаготовительной машины для реализации способа обработки деревьев сверху вниз путем многоступенчатой раскряжевки деревьев по высоте, заканчивающейся отделением дерева от пня. Целью исследований являлась разработка и анализ конструкции многозвенного комбинированного манипулятора с выдвижением рабочего органа на расстояние достигающее 18 м. Были предложены конструкции манипулятора с модернизацией шарнирно-сочлененной фермы путем ввода дополнительных звеньев и образованием пантографных механизмов. Показаны структурно-кинематические схемы двух вариантов многозвенных комбинированных манипуляторов. Представлены экспериментальные модели

предложенных конструкций многозвенных комбинированных манипуляторов с изменением их длины. Приводятся фотографии физических моделей экспериментальных манипуляторов, собранных для доказательства полученных теоретических результатов. Для эксперимента использовались модели манипуляторов масштабом 1:10. Для возможности быстрого изменения положения конструкции шарнирно-сочлененной фермы и ее фиксации использовался раздвижной стержень со ступенчатым фиксатором (шаг фиксации 5 мм), имитирующий работу гидроцилиндров манипулятора. На основе проведенных структурных анализов кинематических схем многозвенных комбинированных манипуляторов было найдено решение конструкции шарнирно-сочлененной фермы телескопической рукояти манипулятора за счет добавления дополнительных рычагов, образующих пантографные механизмы выдвижения подвижных секций. Путем математических расчетов доказано, что использование шарнирно-сочлененной фермы в качестве механизма выдвижения подвижных секций создает условия для увеличения вылета манипулятора с сохранением транспортно-энергетического модуля унифицированным без применения дополнительных гидроцилиндров и канатно-блочных систем. Структурный анализ показал, что предложенная структура манипулятора с пантографным механизмом выдвижения подвижных секций телескопической рукояти является работоспособной.

**Ключевые слова:** многозвенный манипулятор, комбинированный манипулятор, шарнирно-сочлененная ферма, структурный анализ, сортиментная технология.

**Anisimov S.E., Carev E.M., Rukomojnikov K.P., Anisimov I.S., Anisimov N.S., Makarov V.E.** Multi-link combination manipulator for care thinning. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2024, iss. 250, pp. 238–251 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.238-251

The article considers options for modernizing the design of the manipulator of a logging machine to implement a method of processing trees upside down by multi-stage bucking of trees in height, ending with the separation of the tree from the stump. The purpose of the research was to develop and analyze the design of a multi-link combined manipulator with the extension of the working body to a distance of more than 18 m. Manipulator designs were proposed with the modernization of the articulated truss by introducing additional links and the formation of pantograph mechanisms. The structural and kinematic schemes of two variants of multi-link combined manipulators are shown. Experimental models of the proposed designs of multi-link combined manipulators with a change in their length are presented. Photographs of physical models of experimental manipulators collected to prove the theoretical results are presented. Models of manipulators with scale of 1:10 were used for the experiment. For the possibility of quickly changing the position of the articulated truss structure and fixing it, a sliding rod with a stepped retainer (fixing

step of 5 mm) was used, simulating the operation of the manipulator hydraulic cylinders. Based on the structural analyses of kinematic schemes of multi-link combined manipulators, a solution was found to the design of the articulated truss of the telescopic arm of the manipulator by adding additional levers forming pantographic mechanisms for extending movable sections. It is proved by mathematical calculations that the use of an articulated truss as a mechanism for extending movable sections creates conditions for increasing the output of the manipulator while maintaining a unified transport and energy module without the use of additional hydraulic cylinders and rope-block systems. Structural analysis has shown that the proposed structure of the manipulator with a pantograph mechanism for extending the movable sections of the telescopic handle is workable.

**Keywords:** multi-link manipulator, combined manipulator, articulated truss, structural analysis, assortment technology.

---

**АНИСИМОВ Сергей Евгеньевич** – доцент Поволжского государственного технологического университета, кандидат технических наук. SPIN-код: 4102-7819. ORCID: 0000-0003-3332-0927,

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

**ANISIMOV Sergey E.** – PhD (Technical), Associate Professor, Volga State University of Technology. SPIN-code: 4102-7819. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3332-0927>.

424000. Lenin sq. 3. Yoshkar-Ola. Russia. E-mail: anisimovsevolgatech@mail.ru

**ЦАРЕВ Евгений Михайлович** – профессор кафедры лесопромышленных и химических технологий Поволжского государственного технологического университета, доцент, доктор технических наук. SPIN-код: 3117-8576. ORCID: 0000-0001-5695-3028.

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

**TSAREV Evgeny M.** – DSc (Technical), Professor of the Department of Forestry and Chemical Technologies of the Volga State University of Technology. SPIN-code: 3117-8576. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5695-3028>.

424000. Lenin sq. 3. Yoshkar-Ola. Russia. E-mail: carevEM@volgatech.net

**РУКОМОЙНИКОВ Константин Павлович** – профессор кафедры лесопромышленных и химических технологий Поволжского государственного технологического университета, доктор технических наук, доцент. SPIN-код: 9119-8261. ORCID: 0000-0002-9956-5081.

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



**RUKOMOJNIKOV Konstantin P.** – DSc (Technical), Professor of the Department of Forestry and Chemical Technologies of the Volga State University of Technology, Associate Professor. SPIN-code: 9119-8261. ORCID: 0000-0002-9956-5081.

424000. Lenin sq. 3. Yoshkar-Ola. Russia. E-mail: rukomojnikovkp@volgatech.net

**АНИСИМОВ Илья Сергеевич** – студент Поволжского государственного технологического университета. ORCID: 0000-0002-9528-8988.

424000, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия. E-mail: kukri-machete-00@mail.ru

**ANISIMOV Ilya S.** – student of the Volga State University of Technology. ORCID: 0000-0002-9528-8988.

424000. Lenin sq. 3. Yoshkar-Ola. Russia. E-mail: kukri-machete-00@mail.ru

**АНИСИМОВ Никита Сергеевич** – студент Поволжского государственного технологического университета. ORCID: 0000-0001-8465-261X.

424000, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия. E-mail: nikita\_anisimov2000@mail.ru

**ANISIMOV Nikita S.** – student of the Volga State University of Technology. ORCID: 0000-0001-8465-261X.

424000. Lenin sq. 3. Yoshkar-Ola. Russia. E-mail: nikita\_anisimov2000@mail.ru

**МАКАРОВ Владимир Евгеньевич** – заместитель директора института механики и машиностроения Поволжского государственного технологического университета,. ORCID: 0000-0003-2564-0832.

424000, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия. E-mail: ooo.mcps.13@mail.ru

**MAKAROV Vladimir E.** – Deputy Director of the Institute of Mechanics and Mechanical Engineering of the Volga State University of Technology. ORCID: 0000-0003-2564-0832.

424000. Lenin sq. 3. Yoshkar-Ola. Russia. E-mail: ooo.mcps.13@mail.ru

**Ф.В. Свойкин, Н.С. Королько, С.А. Угрюмов, К.В. Россихин**

## **ПОСТРОЕНИЕ ТРАССЫ КАНАТНОЙ ДОРОГИ МАТЕМАТИЧЕСКИ-ПРОГРАММНЫМИ МЕТОДАМИ**

*Введение.* В условиях новой экономической реальности традиционные методы лесозаготовок, основанные на использовании многооперационных лесозаготовительных машин, работающих по скандинавской сортиментной технологии, становятся менее эффективными или даже неприменимыми по ряду причин [Svoikin F., Zhuk, Svoikin V., Ugryumov, Bacherikov, Iniesta, Ryapukhin, 2023]. Отмечается, что отечественные разработки в области снегоболотоходной техники, применяемой в других секторах сырьевой промышленности, могут представлять собой альтернативу. Однако в настоящее время производственные мощности компаний, специализирующихся на снегоболотоходах, сосредоточены на удовлетворении потребностей нефтегазовой отрасли [Кацадзе, Свойкин Ф., Свойкин В., Угрюмов, 2022].

С учетом потребностей отрасли в простых и экономичных решениях, требующих минимальной квалификации персонала, канатная трелёвка становится одним из наиболее перспективных методов транспортировки древесины на труднодоступных лесосеках [Svoykin F., Svoikin V., Sokolova, Voinash, Ariko, 2023]. Она дополняет канатно-рельсовые и узкоколейные железные дороги, предоставляя эффективное решение для таких сложных природно-производственных условий арендной базы лесопользователей РФ [Katsadze, Birman, Svoikin F., Korolko, Ugryumov, 2019; Svoikin F., Sokolova, Lokshtanov, 2020; Svoikin F., Korolko N., Korolko A., Borozna and Sorokin, 2024; Кацадзе, Бирман, Свойкин Ф., Свойкин В., Угрюмов, Королько, Шошин, 2020]. При этом, монтаж канатной трелёвки оказывается одной из наиболее трудоёмких операций. При сплошных рубках применяется веерный метод разработки лесосеки для минимализации перемещения основной установки.

При использовании канатной-трелевочной установки усовершенствованного типа, с шарнирно-сочленённой кареткой [Svoikin V., Svoikin F., Vokhmyanin, Zotenko, Alekseeva, 2021; Svoikin F., Sokolova, Korolko N. and Shoshin, 2020; Свойкин В., Королько Н., Свойкин В., Угрюмов, Кретинин,

Тарабан, 2022], благодаря возможности совершения поворотов возникает возможность разработки лесосек сложной (непрямолинейной) формы, в том числе предназначенных для выборочной (селективной) рубки. В таком случае возникает необходимость выбора направления волоков, их длины и количества.

*Цель работы.* Построение оптимального маршрута представляет собой сложную задачу из-за неопределенности, связанной с вероятностями различных физических состояний информационного поля, т. е. уникальном распределении древостоя на каждом лесном участке ввиду сложности и неоднородности как рельефа местности, так лесных насаждений в совокупности с почвенно-грунтовыми условиями. Для решения этой многофакторной задачи с использованием программных методов требуется разработать математическую модель, которая определит оптимальный путь от точки *A* (местоположение КТУ «начальное») через промежуточные поворотные опоры, охватывающие необходимые зоны разработки участка, и заканчивающийся в точке *B* (местоположение конечной опоры или местоположения КТУ «конечное»).

При построении маршрута в условиях риска и неопределенности принятия решений лицом, принимающим решение (ЛПР), при наличии сложных природно-производственных условий задача существенно усложняется. Поэтому для её решения необходимо обратиться к современным исследованиям математиков в данном направлении.

Математические методы универсальны, однако для их применения необходимо корректно поставить задачу, для чего необходим учёт специфических особенностей изучаемой лесной экосистемы как сложного биогеоценоза.

Постановка такой многофакторной задачи является существенным и ответственным этапом, влияющим на выбор метода решения, такой метод можно разделить на несколько последовательных стадий:

1. Установление границы подлежащей оптимизации системы, т. е. представление системы в виде некоторой изолированной части реального мира. В настоящей работе исследованию подлежит система в виде рабочего пространства участка леса, назначенного и отведенного в рубку. В него также могут включаться необходимые логистические подъездные пути. Лесосека может быть изначально разбита на пасеки, в пределах которых и будет рассматриваться прокладка и трассировка маршрута. Ввиду технической возможности осуществления поворотов, наиболее рационально использовать комплексный подход программными методами, благодаря которым возможно создать всю схему разработки такой лесосеки.

2. Определение показателя эффективности, на основе которого можно оценить характеристики системы. В случае прокладки трасс КТУ показателем эффективности является трудоёмкость прокладки трассы.

3. Выбор внутрисистемных независимых переменных, которые должны адекватно описывать условия функционирования системы, т. е. максимально приблизить модель к реальному процессу путём учёта дополнительных функций ограничения. Применимость такой модели в конечном итоге будет выявлена практикой.

4. Построение модели, которая описывает взаимосвязи между переменными задачи и отражает влияние независимых переменных на значение показателя эффективности. Процесс построения системы является самым трудоёмким и требует четкого понимания специфических особенностей рассматриваемой системы.

К практическим целям реализации построенной модели стоит отнести создание и доработку экспериментальной модели КТУ с целью описания процесса поиска оптимальных размерно-качественных характеристик каретки и поворотного башмака.

*Методика исследования.* Существует несколько методов для решения оптимизационных задач, но не все из них подходят для выбора оптимального маршрута. Один из наиболее универсальных и понятных – метод полного перебора. Однако его применимость ограничена задачами целочисленного программирования с небольшим количеством переменных и строгими граничными условиями. В практических задачах этот метод редко используется [Андреев, Герасимов, 1999].

Для выбора метода решения необходимо описать характерные особенности задачи прокладки оптимальной трассы КТУ:

1. Задача представляет из себя  $n$ -шаговый процесс принятия решений.
2. Определена для любого числа шагов и имеет независимую от них структуру.
3. Заданы параметры, описывающие состояние оптимальности системы, независимые от числа шагов.

Для решения задач с названными особенностями применим метод динамического программирования [Нильсон, 1973].

Опишем алгоритм решения задач методом динамического программирования:

1. Выбираем параметры, характеризующие состояние  $s$  управляемой системы перед каждым шагом.
2. Разбиваем операцию на шаги.

3. Определяем набор шаговых управлений  $u_i$  для каждого шага и налагаемые на них ограничения.

4. Определяем, какой выигрыш носит на  $i$  шаге управления  $u_i$ , если перед этим система была в состоянии  $s$ , т. е. записываем функцию выигрыша:

$$W_i = f_i(s, u_i). \quad (1)$$

5. Определяем, как изменится состояние  $s$  системы  $S$  под влиянием управления  $u_i$  на  $i$  шаге – она переходит в новое состояние:

$$s' = \varphi_i(s, u_i). \quad (2)$$

6. Записываем основное рекуррентное уравнение динамического программирования, выражающее условный оптимальный выигрыш:

$$W_i(s) = \max(f_i(s, u_i) + W_i + 1(\varphi_i(s, u_i))). \quad (3)$$

7. Производим условную оптимизацию последнего  $m$  шага, задавая множеством состояний  $s$ , из которых можно за один шаг прийти до конечного состояния, вычисляя для каждого из них условный оптимальный выигрыш  $Wm(s) = \max(f_m(s, u_i))$ , и находим условное оптимальное управление  $u_m(s)$ , для которого этот максимум достигается.

8. Производим условную оптимизацию  $(m - 1)$  шага по п.6 алгоритма, полагая в ней  $i = (m - 1), (m - 2), \dots$  и для каждого из этих шагов указываем условное оптимальное управление  $u_i(s)$ , при котором достигается максимум функции. На первом шаге состояние системы не варьируется:

$$W^* = W_1(s_0). \quad (4)$$

9. Производим безусловную оптимизацию управления, считывая соответствующие рекомендации на каждом шаге: берем найденное оптимально управление на первом шаге  $u_1^* = u_1(s_0)$ ; изменяем состояние системы по 6-му шагу; для вновь найденного состояния находим оптимальное управление на втором шаге  $u_2^*$  и т. д. до конца процесса.

Существует альтернативный метод перебора. Алгоритм  $A^*$  – алгоритм упорядоченного перебора, в котором используется оценочная функция

$$\hat{f}(n) = \hat{g}(n) + \hat{h}(n), \quad (5)$$

где  $\hat{h}$  – эвристическая функция;  $g(n) = k(s, n)$  – стоимость оптимального пути из начальной вершины  $s$  до некоторой произвольной вершины  $n$ .

Для оценки оптимальности принимаем факт, что каждый путь имеет стоимость, достижение минимальной стоимости в заданных условиях

будет являться критерием оптимальности, т. е.  $f(n)$  – стоимость оптимального пути, при условии, что он проходит через вершину  $n$ . Сумма действительной стоимости оптимального пути от вершины  $n$  до какой-нибудь из целевых вершин. Нижней границей стоимости пути из точки  $S$  в конечную точку  $N$  является прямая. При использовании алгоритма  $A^*$ , когда процесс поиска достигает некоторой вершины, то оказывается, что оптимальный путь к ней уже найден.

При применении вероятностного метода математического моделирования первым этапом получения оптимального решения является:

- Установление границы подлежащей оптимизации системы – т. е. из лесного массива выделяем отдельный участок, лесосеку, на которой требуется решить задачу поиска оптимального маршрута. Кроме того, на лесосеке с разными характеристиками древостоя по плотности, необходимо выделить изомерные участки.

- Определение показателя эффективности, т. е. выявление характеристики системы на основе которого можно выявить наилучший проект или множество наилучших условий функционирования системы. В случае определения трассы канатной дороги наиболее верным технологическим фактором будет минимальная сумма углов поворотов трассы, что обеспечит максимальную скорость прохождения и устойчивость каретки КТУ.

Для соблюдения ограничений, вызванных необходимостью соблюдения ширины трассы, следует осуществить закладывание половины необходимой ширины трассы в диаметр деревьев (препятствий), которые необходимо обойти.

Естественное распределение деревьев подчиняется закону Пуассона. Среднее расстояние между деревьями является производной полноты лесного массива [Коробов, 2010; Scott and Edwin, 1991; Svoykin F., Svoykin V., Zagidullin, Latypova, Sokolova, Garbuzova, 2024; Dallas, 1991; Hedin, 1996; Svoykin F., Zhuk, Svoykin V., Borozna, Taraban, Kretinin, Uglova, 2024]:

$$P_n(k) = \frac{\lambda^k}{k!} \exp(-\lambda), \quad (6)$$

где  $k$  – число событий (число встреч);  $\lambda$  – параметр распределения,

$$\lambda = \frac{l}{l_{cp}}. \quad (7)$$

Для преобразования лесного массива в математический вид необходимо создать из участка сетчатую структуру, с условно равномерным рас-

пределением деревьев, при которой среднее расстояние между деревьями  $l_{\text{ср}}$  является диаметром вписанной окружности. Для создания изотропной системы точки пересечения окружностей соединяются в трёх/шести угольники, получая сотовую модель, представленную на рис. 1.

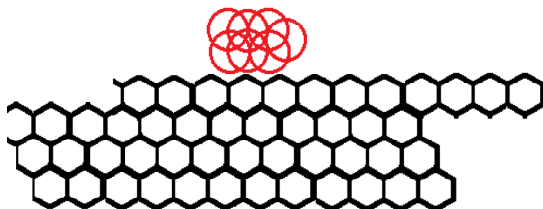


Рис. 1. Сотовая модель ячеек

Fig. 1. Cellular cell model

При неравномерном распределении деревьев по лесосеке применяется деление её на кластеры. В каждом кластере определяется среднее расстояние между деревьями, так как это расстояние является размером ячейки для определенного числа встреч.

В случае удаления части деревьев в ходе выборочной или санитарной рубки, среднее расстояние между деревьями будет пропорционально увеличиваться в зависимости от интенсивности рубки.

Примером этого метода может служить лесосека квартала (квадрата) 4 в Приморском участковом лесничестве Курортного лесничества (Санкт-Петербургское государственное казенное учреждение «Курортный лесопарк», находящееся в ведении Комитета по благоустройству Санкт-Петербурга). Этот лесной массив относится к категории защитных городских лесов. В данном случае планируется проведение санитарно-оздоровительных мероприятий в форме выборочной санитарной рубки. Учитывая криволинейные границы участка, совпадающие с границами выдела, а также сильную заболоченность участка, предположим невозможность применения колёсной техники; в таком случае наиболее эффективным вариантом является использование канатной трелевочной установки с возможностью маневрирования.

Выдел 39 квартала 4 Приморского участкового лесничества Курортного лесничества обладает следующими таксационными характеристиками: площадь  $S$  – 4,5 га; породный состав лесных насаждений: 6Е2Ос2Б+С; тип леса: КС; возраст, лет: 90, 75, 75, 70; бонитет, класс: 1; полнота: 0,6; запас древесины на 1 гектаре, средний: 311 м<sup>3</sup>; средний диаметр, см: Е – 32; С, Б – 28, Ос – 36.

Общий вид лесосеки после обработки картографических данных и данных аэрофотосъемки с выделением деревьев, подлежащих рубке (треугольник) и остающихся (окружность), приведён на рис. 2.

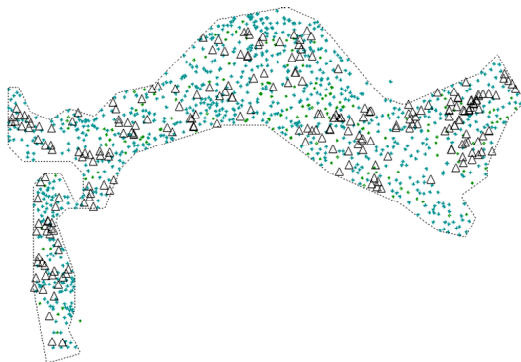


Рис. 2. Общий вид лесосеки

Fig. 2. General view of the cutting area

Для создания кластерной модели лесосеки необходимо определить базовый размер ячеек, т. е.  $l_{cp}$ , которое рассчитывается из площади выдела и количества деревьев.

Число деревьев  $N$ , шт., определяется по формуле

$$N = \frac{Z}{V_{d_{cp}}}, \quad (8)$$

где  $N$  – число деревьев, шт.;  $Z$  – запас,  $m^3$ ;  $V_{d_{cp}}$  – объем одного дерева средней толщины,  $m^3$ .

В результате расчетов по формуле (8) получаем объем,  $V_d$ ,  $m^3$ , по породам:  $B_{28} - 0,68 m^3$ ;  $C_{28} - 0,68 m^3$ ;  $E_{32} - 0,96 m^3$ ;  $O_{36} - 1,16 m^3$ .

В результате вычислений получаем значение  $N$ :

$$N = \frac{311}{0,6 \cdot 0,96 + 0,2 \cdot 1,16 + 0,2 \cdot 0,68} = 327 \text{ шт./га.}$$

Среднее расстояние между деревьях при однородном распределении деревьев по выделу

$$L_{cp} = \frac{S}{N}. \quad (9)$$



В результате вычислений получаем значение  $l_{\text{ср}}$ :

$$l_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{10\,000}{327}} = 5,53 \text{ м.}$$

При проведении выборочной или санитарной выборочной рубки средней интенсивности 33% среднее расстояние между деревьями пропорционально увеличится  $5,53 \times 1,33 = 7,36$ . Для демонстрации методики будем использовать величину среднего расстояния.

На основании формул закона распределения деревьев (6,7) осуществляется построение диаграммы вероятностей числа встреч с препятствиями (деревьями) на различных расстояниях при фиксированном значении среднего расстояния ( $l_{\text{ср}} = 5,53 \text{ м}$ ), представленный на рис. 3.

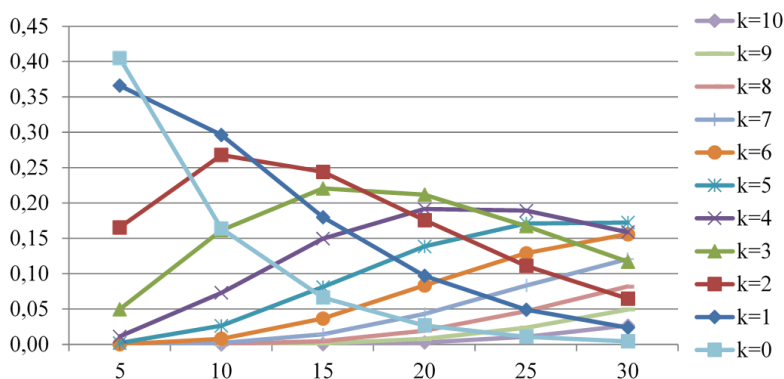


Рис. 3. Диаграммы вероятностей числа встреч с препятствиями (деревьями) на различных расстояниях при фиксированном значении среднего расстояния ( $l_{\text{ср}} = 5,53 \text{ м}$ )

Fig. 3. Probability diagrams of the number of encounters with obstacles (trees) at various distances at a fixed value of the average distance ( $l_{\text{ср}} = 5,53 \text{ м}$ )

На рис. 3 ось  $x$  – протяженность прямолинейного участка, м; ось  $y$  – вероятность ( $p$ ) встречи  $k$  препятствий.

Данными для графика является табл. 1 зависимости вероятностей числа встреч с препятствиями (деревьями) от различных расстояний при фиксированном значении среднего расстояния ( $l_{\text{ср}} = 5,53 \text{ м}$ ).

Таблица 1

**Вероятности числа встреч с препятствиями (деревьями) на различных расстояниях при фиксированном значении среднего расстояния ( $l_{cp} = 5,53$  м)**

**Probabilities of the number of encounters with obstacles (trees) at different distances at a fixed value of the average distance**

Вероятность	Расстояние между препятствиями, м					
	5	10	15	20	25	30
$Pn(k) \ k = 0$	0,405	0,164	0,066	0,027	0,011	0,004
$Pn(k) \ k = 1$	0,366	0,296	0,180	0,097	0,049	0,024
$Pn(k) \ k = 2$	0,165	0,268	0,244	0,176	0,111	0,065
$Pn(k) \ k = 3$	0,050	0,162	0,221	0,212	0,168	0,117
$Pn(k) \ k = 4$	0,011	0,073	0,150	0,192	0,189	0,159
$Pn(k) \ k = 5$	0,002	0,026	0,081	0,139	0,171	0,172
$Pn(k) \ k = 6$	0,000	0,008	0,037	0,084	0,129	0,156
$Pn(k) \ k = 7$	0,000	0,002	0,014	0,043	0,083	0,121
$Pn(k) \ k = 8$	0,000	0,000	0,005	0,020	0,047	0,082
$Pn(k) \ k = 9$	0,000	0,000	0,001	0,008	0,024	0,049
$Pn(k) \ k = 10$	0,000	0,000	0,000	0,003	0,011	0,027

Исходя из анализа диаграмм следует, что при каждом допустимом значении числа встреч ( $k = 0, 1, 2, \dots$ ) существуют пиковые значения вероятностей таких встреч. После достижения экстремума функции график стремится к минимальным значениям. Однако данный факт не является определяющим для принятия решения о выборе максимального расстояния прямой при любых значениях  $k$ . Так, например, максимальное значение вероятности  $p(4) = 0,19$  достигается при расстоянии в 25 м. Дальнейшее уменьшение значений вероятности встреч относится к значению  $k = 4$ , в то время как, значения вероятностей встреч с  $k > 4$  продолжают расти. Следовательно, практические значения имеют значения левых частей графиков до достижения максимума.

Устанавливая максимально допустимое число встреч  $k = 10$ , необходимо определить вероятности встречи  $Pn(k) < 10$ . Расчёт значений в табл. 2 производится исходя из выражения суммы вероятностей событий  $n \leq k \leq 10$  при  $0 \leq n \leq 10$ .

$$P_n(0 \leq k \leq 10) = \sum_n^{10} p_n - p_n! \quad (10)$$

Таблица 2

**Вероятности наличия числа препятствий,  
превышающие допустимые значения  $k$**

**The probability of the presence of a number of obstacles exceeding  
the permissible values  $k$**

Вероятность	Расстояние между препятствиями, м					
	5	10	15	20	25	30
$Pn(k) 0 \leq k \leq 10$	1,000	1,000	1,000	0,999	0,993	0,977
$Pn(k) 1 \leq k \leq 10$	0,595	0,836	0,934	0,972	0,982	0,972
$Pn(k) 2 \leq k \leq 10$	0,229	0,540	0,753	0,875	0,933	0,949
$Pn(k) 3 \leq k \leq 10$	0,064	0,272	0,509	0,699	0,822	0,884
$Pn(k) 4 \leq k \leq 10$	0,014	0,110	0,289	0,487	0,654	0,766
$Pn(k) 5 \leq k \leq 10$	0,002	0,037	0,139	0,295	0,465	0,607
$Pn(k) 6 \leq k \leq 10$	0,000	0,011	0,058	0,157	0,294	0,435
$Pn(k) 7 \leq k \leq 10$	0,000	0,003	0,021	0,073	0,165	0,279
$Pn(k) 8 \leq k \leq 10$	0,000	0,001	0,007	0,030	0,081	0,158
$Pn(k) 9 \leq k \leq 10$	0,000	0,000	0,002	0,011	0,034	0,075

Суммарная вероятность встречи  $Pn$  ( $n \leq k \leq 10$ ) приведена на рис. 4.

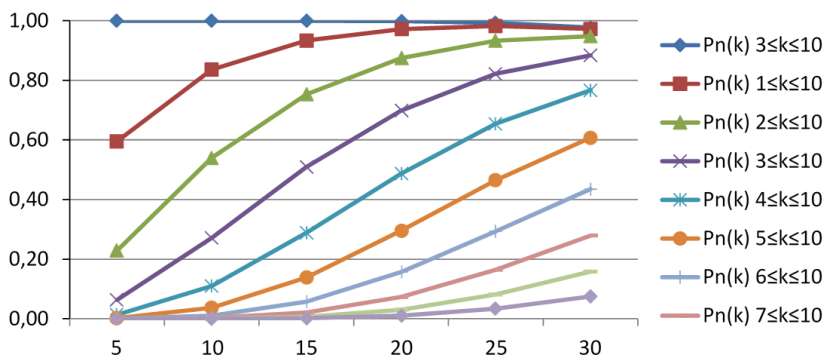


Рис. 4. Суммарная вероятность встречи  $Pn$  ( $n \leq k \leq 10$ )

Fig. 4. The total probability of meeting  $Pn$  ( $n \leq k \leq 10$ )

Особенно важно применение моделей для изучения процессов в канатных трелевочных установках (КТУ). Проведение экспериментов на реальных установках связано с высокими затратами и временными издержками на подготовку и получение результатов.

Проведение опытов в реальных условиях, особенно в области динамики канатов, несет определенные риски для обслуживающего персонала. Кроме того, климатические факторы иногда мешают проведению таких опытов.

В ходе ранних исследований был создан трехмерный макет канатных трелевочных установках (КТУ) с поворотом трассы в плоскости. Для оценки работоспособности этого изделия была разработана динамическая модель на электротяге, используя RC-модели и 3D-печать.

*Результаты исследования.* Из анализа данных следует, что с увеличением расстояния вероятность  $n$  встреч также возрастает. Для определения оптимального расстояния необходимо учесть заданную допустимую вероятность и предельное число встреч.

Число встреч при прокладке маршрута будет соответствовать количеству поворотов.

В результате произведённых действий общий вид лесосеки, на которой происходит построение маршрута, примет вид, указанный на рис. 5.



Рис. 5. Общий вид лесосеки при допустимости 1 встречи  
Fig. 5. General view of the cutting area with a probability of 1 meeting

При увеличении допустимого числа встреч размеры ячеек, по границам которого будет происходить построение трассы, будет увеличиваться, что демонстрируется рис. 6 (а – вероятность встречи 1 дерева, b – вероятность встречи 2 деревьев) и 7 (вероятность встречи 3 деревьев).

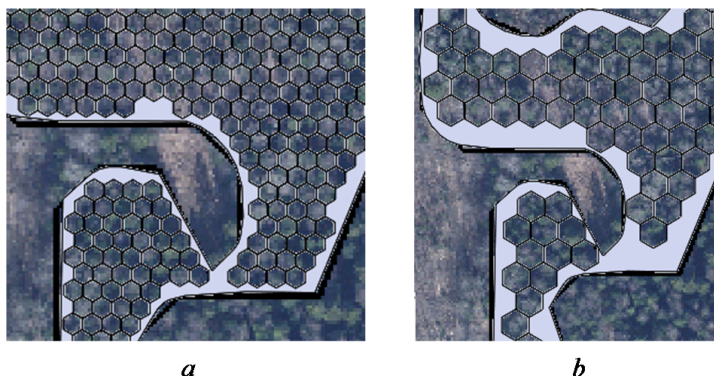


Рис. 6. а – вероятность встречи 1 дерева; b – вероятность встречи 2 деревьев  
Fig. 6. a – the probability of meeting 1 tree; b – The probability of meeting 2 tree



Рис. 7. Вероятность встречи 3 деревьев  
Fig. 7. The probability of meeting 3 tree

На рис. 6 и 7 вид лесосеки с разбивкой на ячейки структуры при условии изменения допустимого числа встреч и сохранении их вероятности.

Для практической реализации разрабатываемой модели и реализации теоретических основ с практическими рекомендациями, выполнено описание стенда для исследования модели шарнирно-сочленённой каретки

с поворотным башмаком. Согласно современным представлениям, элементы КТУ состоят из следующих элементов:

- опора,
- несущий канат,
- промежуточная опора,
- каретка,
- тяговый канат.

С учетом критериев энергоэффективности и металлоемкости, при проектировании современных моделей была предложена конструкция стенда на рис. 8.

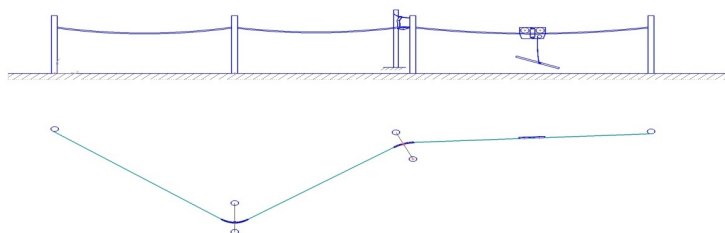


Рис. 8. Стенд экспериментальной модели канатно-трелевочной установки

Fig. 8. The stand of the experimental model of the cable-skiing installation

Стенд представляет собой комплекс из концевой и промежуточной опор, несущего каната, поворотного башмака и каретки.

Для обеспечения простоты и компактности конструкции, опоры стенда выполнены из дерева и имеют высоту 0,3 м. Они установлены на площадках размером 0,3×0,3 м. Расстояние между опорами составляет 700 мм и может быть изменено при необходимости.

Исходная модель каретки является статичной конструкцией. Однако с учетом концепции поворота на трассе канатных трелевочных установках (КТУ) требуется, чтобы каретка представляла собой автономную конструкцию. Это означает исключение других тросов, помимо несущего каната, чтобы избежать усложнения поворотной опоры, ее монтажа и эксплуатации, а также рисков переплетения и обрыва. Кроме того, это предполагает наличие стационарной КТУ с синхронизированными барабанами. Базовая модель представлена на рис. 9.

В ходе проведения пробного эксперимента выявлены недостатки конструкции корпуса каретки, препятствующие прохождению поворотного башмака, на основании чего на данном этапе сделаны изменения форме корпуса в части сужения частей пластины, мешающие повороту.

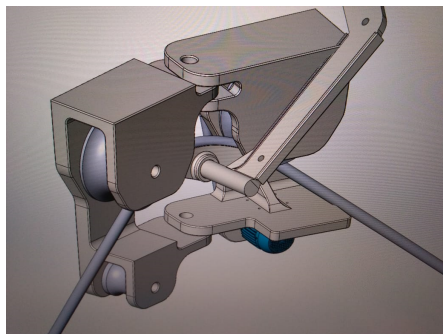


Рис. 9. Базовый макет шарнирно-сочлененной каретки

Fig. 9. The basic layout of an articulated carriage

Такая модернизация получила название шарнирно-сочлененная каретка (ШСК), приводивая в движение двумя гидромоторами, питающимися от гидронасоса, через распределитель с электронным приводом управления. Гидронасос приводится в действие двигателем внутреннего сгорания. Разгон, торможение, фиксация производится дистанционно управлением распределителем. Подтягивание каретки груза, также осуществляется собственным гидромотором, через полиспасть. Виртуальная модель создана в инженерном программном комплексе SolidWorks. Далее детали модели адаптированы для 3D печати. В итоге получена функционирующая модель каретки, которая показана на рис. 10.

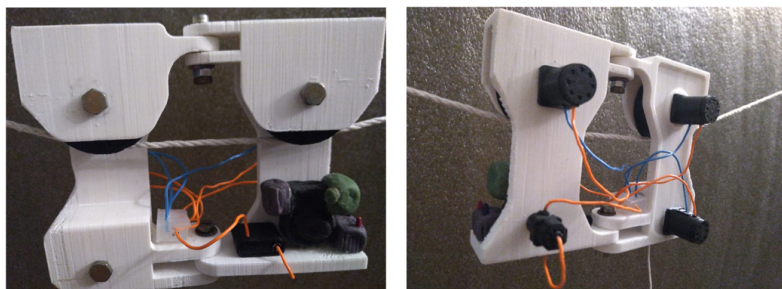


Рис. 10. Функциональная модель моторизованной шарнирно-поворотной каретки

Fig. 10. Functional model of a motorized swivel carriage

Данная модель помогла получить представление о работе будущей установки. Самым рискованным этапом процесса трелёвки является прохождение каретки через промежуточную опору. Теоретически, она

может быть любого радиуса. Однако для изучения этого процесса в динамике нам потребовалась движущаяся модель.

Для решения проблемы создания динамической модели произведена оценка унификации комплектующих. Принято решение об использовании опыта RC моделирования (радио моделирование RC – radio control). В качестве имитации гидромоторов были предложены электродвигатели моделей лебёдок. Для управления была использована аппаратура управления Flysky.

В целях адаптации имеющегося макета к выбранным элементам в корпусе модели были спроектированы, и изготовлены посадочные места для двигателей, антенны. Дополнительно запроектированы и созданы фиксаторы двигателя, позволяющие производить замену приводных колёс.

На движущейся модели осуществлен эксперимент по преодолению поворотной опоры. В ходе эксперимента выявлены недостатки, в виде смещения центра тяжести и недостаточной тяги, вызванной слабым трением между приводными валами и тросом.

Для балансировки каретки на стороне смещения установлены свинцовые балансировочные грузики. В целях увеличения сил трения изменена форма паза ролика от овального в конусообразный, работающий по принципу клинового ремня.

Указанная модернизация позволила увеличить показатели проходимости каретки по тросу. Однако стабильность прохождения поворотов и подъемов провиса троса недостаточна для признания ситуации приемлемой.

В рамках совершенствования модели произведены работы по замене моторов на электродвигатели, которые позволяют двигаться с большей скоростью.

*Заключение.* Описываемый процесс при встрече с деревьями в процессе прокладки маршрута носит случайный характер, т. е. по своим характеристикам относится к Марковским процессам.

Задача оптимизации стоит в поиске суммарно наилучшего маршрута и выборе числа допустимой встречаемости с препятствиями на каждом однородном участке. Поскольку фактическое распределение деревьев на участке не является однородным, а носит кластерный характер, то при проектировании прохождения трассы КТУ (при  $P = \text{const}$ ) по предварительно нанесенных трассах, соответствующей однородной модели каждого участка, необходимо учитывать различие длин «невстречаемости».



На дальнейших этапах решения задачи, применяя методы марковских процессов динамического программирования, будет получена методика расчета и результаты моделирования в виде вариантов оптимального маршрута прокладки волоков.

Стоит отметить, что в данном исследовании на актуальном этапе работ пока не проводились оценки статических и динамических воздействий при прохождении поворота трассы каретки, однако она будет осуществлена в дальнейшем путем установки динамометра на оттяжку.

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

### **Библиографический список**

*Андреев В.Н., Герасимов Ю.Ю.* Принятие оптимальных решений: теория и применение в лесном комплексе. Йоэсуу: Изд-во ун-та Йоэнсуу. 1999. 200 с.

*Кацадзе В.А., Бирман А.Р., Свойкин Ф.В., Свойкин В.Ф., Угрюмов С.А., Королько Н.С., Шошин А.О.* Результаты экспериментальных исследований использования КТУ для первичной вывозки древесины на переувлажненных лесосеках в Республике Беларусь // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 8. С. 32–36. DOI: 10.31044/1684-2561-2020-0-8-32-36

*Кацадзе В.А., Свойкин Ф.В., Свойкин В.Ф., Угрюмов С.А.* Обзор современных отечественных решений для транспортного освоения труднодоступных лесосек // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2022. № 3. С. 3–12. DOI: 10.31044/1684-2561-2022-0-3-3-12

*Коробов П.Н.* Математическое программирование и моделирование экономических процессов: учебник. Изд. 3-е, перераб. и доп. СПб.: ООО «Издательство ДНК», 2010. 376 с. (Классическое образование).

*Нильсон Н.* Искусственный интеллект: методы поиска решений / пер. с англ. В.Л. Стефанюка; под ред. С.В. Фомина. М.: Мир, 1973. С. 70–80»

*Свойкин Ф.В., Королько Н.С., Свойкин В.Ф., Угрюмов С.А., Кретинин В.И., Тарабан М.В.* Усовершенствование канатной трелевочной установки путем модернизации каретки // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2022. № 8. С. 3–8. DOI: 10.31044/1684-2561-2022-0-8-3-8

*Dallas C.H.* The monocable conveyer system for thinning operations. COFE Symposium, Forestry Operations in the 1990's: Challenges and Solutions. Nanaimo. British Columbia, Canada. 1991. P. 89–91.

*Hedin I.B.* Shelterwood harvesting with a skyline system in a coastal second-growth forest. Forest Engineering Research Institute of Canada, Wood Harvesting Technical Note No. TN 243. 2601 East Mall, Vancouver, British Columbia, V6T 1Z4, Canada. 1996.

*Katsadze V.A., Birman A.R., Svoikin F.V., Korolko N.S., Ugryumov S.A.* Modernization of Rope Skidding Installations in the Development of Inaccessible Logging

Areas // Remont. Vosstanovleniye. Modernizatsiya = Repairs. Recovery. Modernization. 2019. No. 6. P. 8–11. URL: <https://doi.org/10.31044/1684-2561-2019-0-6-8-11>

*Scott C.I. and Edwin S.M.* The monocable conveyer system for thinning operations. COFE Symposium: Forestry Operations in the 1990's. Challenges and Solutions. Nanaimo, British Columbia, Canada, 1991. P. 111–114.

*Svoikin F., Zhuk K., Svoikin V., Ugryumov, S., Bacherikov, I., Iniesta, D.V., Ryapukhin, A.* Classification of Tree Species in the Process of Timber-Harvesting Operations // Using Machine-Learning Methods Inventions. 2023. 8(2). P. 57. URL: <https://doi.org/10.3390/inventions8020057>

*Svoikin V., Svoikin F., Vokhmyanin N., Zotenko S., Alekseeva S.* Modernization of the cable skidding system by upgrading the articulated carriage // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. 876(1). 012074. DOI: 10.1088/1755-1315/876/1/012074

*Svojkin F.V., Korolko N.S., Korolko A.S., Borozna A.A. and Sorokin K.E.* Construction of a cable yarding track by mathematical and software methods // E3S Web of Conferences. 2024. 515. 01013. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202451501013>

*Svoykin F., Sokolova V., Korolko N. and Shoshin A.* Constructive solutions to improve cable haulers for development of hard-to-reach cutting areas // E3S Web of Conferences. 2020. 193. 01048. ICMTMT 2020. DOI: 10.1051/e3sconf/202019301048

*Svoykin F., Svoikin V., Zagidullin R., Latypova E., Sokolova V., Garbuzova T.* On the question of the possibility of carrying out land-scape forestry works // E3S Web of Conferences. 2024/ 480. 02021. DOI: 10.1051/e3sconf/202448002021

*Svoykin F.V., Sokolova V.A., Lokshtanov B.M.* On the Issue of Perspective Direction of Development and Analysis of Development of Hard-to-reach Overwatered Forest Areas with the Help of Rope Skidders in the Northwestern Federal District of the Russian Federation // Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies. 2020. Iss. 2(46). P. 87–93. URL: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2020-2-87-93>

*Svoykin F.V., Svoikin V.F., Sokolova V.A., Voinash S.A., Ariko S.Ye.* Application of Cable-Railways for Timber Skidding // Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal. 2023. No. 5. P. 115–125. URL: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-115-125>

*Svoykin F.V., Zhuk K.D., Svoikin V.F., Borozna A.A., Taraban M.V., Kretinin V.I., Uglova L.A.* Modern domestic solutions and soft-ware for Scandinavian logging in Russia under the new economic conditions // BIO Web of Conferences. 2024. 84, 01012. DOI: 10.1051/bioconf/20248401012

## References

*Andreev V.N., Gerasimov Yu.Yu.* Making optimal decisions: theory and application in the forestry complex. Joensuu: Joensuu University Press. 1999. 200 p. (In Russ.)

*Dallas C.H.* The monocable conveyer system for thinning operations. COFE Symposium, Forestry Operations in the 1990's: Challenges and Solutions. Nanaimo. British Columbia, Canada. 1991, pp. 89–91.

Hedin I.B. Shelterwood harvesting with a skyline system in a coastal second-growth forest. Forest Engineering Research Institute of Canada, Wood Harvesting Technical Note No. TN 243. 2601 East Mall, Vancouver, British Columbia, V6T 1Z4, Canada. 1996.

Katsadze V.A., Birman A.R., Svoikin F.V., Svoikin V.F., Ugryumov S.A., Korolko N.S., Shoshin A.O. Results of experimental studies of the use of CTU for primary removal of wood from waterlogged cutting areas in the Republic of Belarus. *Repair. Recovery. Modernization*, 2020, no. 8, pp. 32–36. DOI: 10.31044/1684-2561-2020-0-8-32-36. (In Russ.)

Katsadze V.A., Birman A.R., Svoikin F.V., Korolko N.S., Ugryumov S.A. Modernization of Rope Skidding Installations in the Development of Inaccessible Logging Areas. *Remont. Vosstanovleniye. Modernizatsiya = Repairs. Recovery. Modernization*, 2019, no. 6, pp. 8–11. URL: <https://doi.org/10.31044/1684-2561-2019-0-6-8-11>. (In Russ.)

Katsadze V.A., Svoikin F.V., Svoikin V.F., Ugryumov S.A. Review of modern domestic solutions for transport development of hard-to-reach logging sites. *Repair. Recovery. Modernization*, 2022, no. 3, pp. 3–12. DOI: 10.31044/1684-2561-2022-0-3-3-12. (In Russ.)

Korobov P.N. Mathematical programming and modeling of economic processes. Textbook. Ed. third rev. and additional. St. Petersburg: DNA Publishing House LLC, 2010. 376 p. (Classical education). (In Russ.)

Nilsson N. Artificial intelligence: methods for finding solutions = Problem-solving Methods in Artificial Intelligence / Transl. from English V.L. Stefanyuk; edited by S.V. Fomina. M.: Mir, 1973, pp. 70–80. (In Russ.)

Scott C.I. and Edwin S.M. The monocable conveyer system for thinning operations. *COFE Symposium: Forestry Operations in the 1990's. Challenges and Solutions*. Nanaimo, British Columbia, Canada. 1991, pp. 111–114.

Svoikin V., Svoikin F., Vokhmyanin N., Zotenko S., Alekseeva S. Modernization of the cable skidding system by upgrading the articulated carriage. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 876(1), 012074. DOI: 10.1088/1755-1315/876/1/012074

Svoikin F., Zhuk K., Svoikin V., Ugryumov S., Bacherikov I., Iniesta D.V., Ryapukhin A. Classification of Tree Species in the Process of Timber-Harvesting Operations. *Using Machine-Learning Methods Inventions*, 2023, 8(2), 57. URL: <https://doi.org/10.3390/inventions8020057>

Svoikin F.V., Korolko N.S., Korolko A.S., Borozna A.A. and Sorokin K.E. Construction of a cable yarding track by mathematical and software methods. *E3S Web of Conferences*, 2024, 515, 01013. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202451501013>

Svoikin F., Sokolova V., Korolko N. and Shoshin A. Constructive solutions to improve cable haulers for development of hard-to-reach cutting areas. *E3S Web of Conferences*, 2020, 193, 01048. ICMTMTE 2020. DOI: 10.1051/e3sconf/202019301048

Svoykin F., Svoikin V., Zagidullin R., Latypova E., Sokolova V., Garbuzova T. On the question of the possibility of carrying out land-scape forestry works. *E3S Web of Conferences*, 2024, 480, 02021. DOI: 10.1051/e3sconf/202448002021

Svoykin F.V., Korolko N.S., Svoikin V.F., Ugryumov S.A., Kretinin V.I., Taraban M.V. Improvement of the rope skidding installation by modernizing the carriage. *Repair. Recovery. Modernization*, 2022, no. 8, pp. 3–8. DOI: 10.31044/1684-2561-2022-0-8-3-8

Svoykin F.V., Sokolova V.A., Lokshtanov B.M. On the Issue of Perspective Direction of Development and Analysis of Development of Hard-to-reach Overwatered Forest Areas with the Help of Rope Skidders in the Northwestern Federal District of the Russian Federation. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*, 2020, iss. 2(46), pp. 87–93. URL: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2020-2-87-93>. (In Russ.)

Svoykin F.V., Svoikin V.F., Sokolova V.A., Voinash S.A., Ariko S.Ye. Application of Cable-Railways for Timber Skidding. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 5, pp. 115–125. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-115-125>. (In Russ.)

Svoykin F.V., Zhuk K.D., Svoikin V.F., Borozna A.A., Taraban M.V., Kretinin V.I., Uglova L.A. Modern domestic solutions and soft-ware for Scandinavian logging in Russia under the new economic conditions. *BIO Web of Conferences*, 2024, 84, 01012. DOI: 10.1051/bioconf/20248401012

*Материал поступил в редакцию 22.05.2024*

---

**Свойкин Ф.В., Угрюмов С.А., Королько Н.С., Россихин К.В.** Построение трассы канатной дороги математически-программными методами // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 250. С. 252–272. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.252-272

Приведены сдерживающие факторы для развития традиционных решений для освоения труднодоступных лесосек. Предложены математически-программные методы расчеты построения трасс для канатно-трелевочных установок. Предложены способы решения задачи прокладки приемлемого оптимального маршрута с применением методов дискретного программирования в условиях риска и неопределенности. На практическом примере в типичных природно-производственных условиях СЗФО РФ (кв.4 в. 39 Приморского участкового лесничества Курортного лесничества г. Санкт-Петербурга) производится построение математической модели для решения стохастической задачи с квантильными показателями.

**Ключевые слова:** канатные трелевочные установки, каретка, трасса, план, лесосека, программно-математические методы, квантильные показатели.

**Svoikin F.V., Ugryumov S.A., Korolkov N.S., Rossikhin K.V.** Construction of a cable car route using mathematical and software methods. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 250, pp. 252–272 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.252-272

Limiting factors for the development of traditional solutions for the development of hard-to-reach logging sites are presented. Mathematical and software methods have been proposed for calculating the construction of routes for rope-skidding installations. Methods are proposed for solving the problem of laying out an acceptable optimal route using discrete programming methods under conditions of risk and uncertainty. Using a practical example in typical natural production conditions of the Northwestern Federal District of the Russian Federation (quarter 4, century 39 of the Primorsky district forestry of the Kurortny forestry of St. Petersburg), a mathematical model is built to solve a stochastic problem with quantile indicators.

**Key words:** rope skidding installations, carriage, route, plan, cutting area, software and mathematical methods, quantile indicators.

---

**СВОЙКИН Федор Владимирович** – доцент кафедры Технологии лесозаготовительных производств Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук. SPIN-код: 8938-6910. ResearcherID: AAC-4074-2020. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8507-9584>.

194021, Институтский пер. д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: [svoykin\\_fv@mail.ru](mailto:svoykin_fv@mail.ru)

**SVOIKIN Fedor V.** – PhD (Technical), Associate Professor of Technologies of logging industries, St. Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 8938-6910. ResearcherID: AAC-4074-2020. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8507-9584>.

194021, Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: [svoykin\\_fv@mail.ru](mailto:svoykin_fv@mail.ru)

**УГРЮМОВ Сергей Алексеевич** – и.о. зав. каф. технологии лесозаготовительных производств Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор технических наук. ResearcherID: F-6510-2016. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8077-3542>.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: [ugr-s@yandex.ru](mailto:ugr-s@yandex.ru)

**UGRYUMOV Sergey A.** – DSc (Technical), Acting Head Department Technologies of logging production at the St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirova, Doctor of Technical Sciences. ResearcherID: F-6510-2016. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8077-3542>.

194021, Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: [ugr-s@yandex.ru](mailto:ugr-s@yandex.ru)

**КОРОЛЬКО Николай Сергеевич** – аспирант Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер. д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: [kns89lta@mail.ru](mailto:kns89lta@mail.ru)

**KOROLKO Nikolay S.** – PhD student of St. Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: kns89lta@mail.ru

**РОССИХИН Кирилл Вадимович** – магистрант Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

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

**ROSSIKHIN Kirill V.** – Master's Degree student of St. Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: krossihin@gmail.com

**И.А. Зверев, А.В. Трофимов**

**ВЛИЯНИЕ СИСТЕМЫ ВЫРАВНИВАНИЯ ПЛАТФОРМЫ  
НА НАГРУЖЕННОСТЬ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ  
ВАЛОЧНО-ПАКЕТИРУЮЩЕЙ МАШИНЫ  
В ПРОЦЕССЕ ПОДТЯГИВАНИЯ**

*Введение.* Система выравнивания платформы является одним из наиболее распространенных конструктивных решений для адаптирования гусеничных валочно-пакетирующих машин (ВПМ) к заготовке древесины на склонах. Их использование позволяет увеличить предельный угол склона, на котором возможна эксплуатация ВПМ примерно в два раза, по сравнению с машиной «классической» компоновки [Andronov et al., 2021; McEwan et al., 2013]. Теоретические исследования подтверждаются и экспериментальными данными [Amishev, 2011; Visser et al., 2015], которые показали возможность работы ВПМ, оснащенных системами выравнивания платформы, на склонах с углом порядка 30°.

На практике, при проведении заготовки древесины на склонах, уклон местности не является величиной постоянной. На отдельных участках могут встречаться перепады высот, обособленные неровности и другие препятствия. В таких случаях опытными операторами ВПМ могут использоваться специфические технологические приемы, например, вывешивание ходовой системы манипулятором [Бурмистрова и др., 2010; Шоль и др., 2005; Александров, Шоль, 2010] или переориентирование ходовой системы относительно вывешенного корпуса [Александров и др., 2010]. Еще одним характерным приемом является подтягивание машины манипулятором с целью увеличения тягового усилия и устойчивости на склоне. Суть приема заключается в наведении захватно-срезающего устройства (ЗСУ) на растущее дерево с его последующим надежным захватом рычагами. После чего осуществляется сокращение вылета манипулятора с одновременным приведением в действие гусеничного хода. Дерево для осуществления приема должно быть крупномерным и иметь якорную или мочковатую корневую систему. Такие требования необходимы, чтобы предотвратить случай вырывания дерева вместе с корневой системой в процессе подтягивания.

Исследование, проведенное в работе [Зверев и др., 2024] показало, что процесс подтягивания ВПМ сопровождается значительным по величине

добавочным динамическим моментом на силовой установке, что приводит к снижению частоты вращения коленчатого вала вплоть до полной остановки двигателя. При подтягивании машины на склоне с углом в  $30^\circ$  величина добавочного динамического момента на силовой установке составит  $108,4 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , а снижение частоты вращения коленвала произойдет на  $465 \text{ мин}^{-1}$ . Можно предположить, что внедрение в конструкцию машины системы выравнивания платформы может привести к снижению динамической нагрузки на силовую установку. Снижение нагрузки можно объяснить тем, что подтягивание осуществляется не всей машины одновременно, а последовательно кабины оператора с отсеком силовой установки и гусеничного движителя. Выдвинутая гипотеза частично подтверждается результатами исследования по определению динамической нагруженности ВПМ в похожем на рассматриваемый прием процессе вывешивания ходовой системы. В работе [Александров и др., 2021] доказано, что снижение добавочного динамического момента на ВПМ, оснащенную системой выравнивания, в процессе вывешивания ходовой системы произойдет на  $187,7 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , по сравнению с машиной «классической» компоновки.

Провести исследование по определению добавочной динамической нагрузки на силовую установку и сопоставить полученные результаты с данными для машины «классической» компоновки является актуальной задачей.

*Цель исследования* – разработать математическую модель, позволяющую определять величину добавочной динамической нагрузки на силовую установку в процессе подтягивания ВПМ, оснащенной системой выравнивания платформы, при заготовке древесины на склонах. Сопоставить полученные значения с результатами для машины «классической» компоновки.

*Материалы и методика исследования.* Для исследования нагруженности силовой установки разработаны две расчетные схемы динамической системы: исходная (рис. 1, *a*) и эквивалентная (рис. 1, *b*).

*Принятые обозначения:*

$J_1$  – приведенный момент инерции коленчатого вала, маховика, сцепления и шестерен гидронасоса;

$J_2$  – приведенный к коленчатому валу момент инерции кабины оператора и технологического оборудования ВПМ;

$J_3$  – приведенный к коленчатому валу момент инерции опорной платформы и ходовой системы ВПМ;

$\varphi_1, \varphi_2$  и  $\varphi_3$  – обобщенные координаты масс с моментами инерции  $J_1, J_2$  и  $J_3$  соответственно;

$P$  – усилие на штоке гидроцилиндра привода рукояти;

$r$  – плечо силы  $P$ ;



- $C_r$  – приведенная жесткость гидropередачи привода рукояти;  
 $C_{12}$  – приведенная крутильная жесткость коленчатого вала, гидropередачи и металлоконструкции манипулятора;  
 $C_{23}$  – приведенная к коленчатому валу жесткость привода системы выравнивания платформы;  
 $M_d$  – крутящий момент на коленчатом валу, отбираемый для привода гидронасоса;  
 $M_c$  – приведенный момент сопротивления;  
 $G_k$  – сила тяжести корпуса ВПМ;  
 $G_o$  – сила тяжести опорной платформы и ходовой системы ВПМ;  
 $h_k$  – расстояние от центра тяжести корпуса ВПМ до последней контактной точки опорного катка;  
 $h_o$  – расстояние от центра тяжести опорной платформы ВПМ до последней контактной точки опорного катка;  
 $\gamma$  – угол склона;  
 $i_n$  – передаточное число.

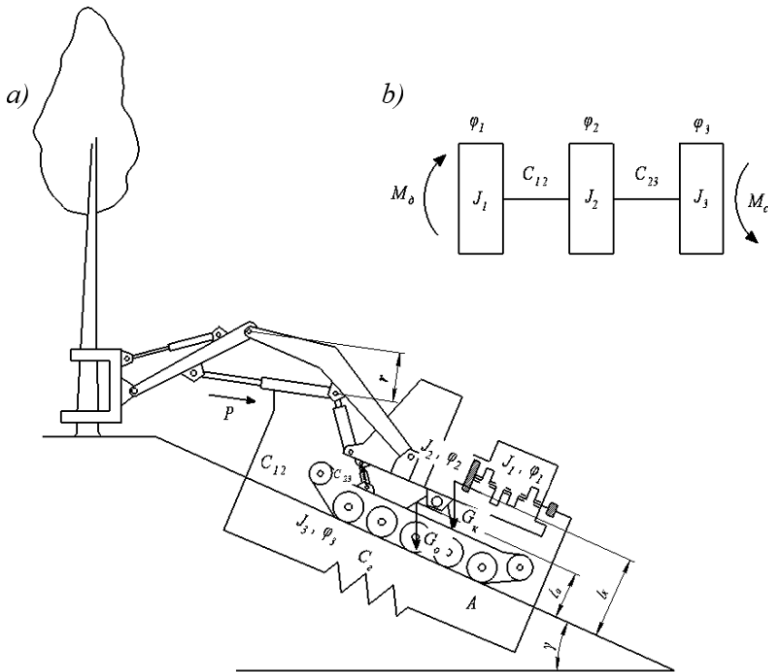


Рис. 1. Расчетные схемы: а – исходная, б – эквивалентная  
 Fig. 1. Calculation scheme: a – basic, b – equivalent

Кинетическая энергия системы:

$$T = \frac{1}{2} J_1 \dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2} J_2 \dot{\varphi}_2^2 + \frac{1}{2} J_3 \dot{\varphi}_3^2.$$

Потенциальная энергия системы:

$$\Pi = \frac{1}{2} C_{12} (\varphi_1 - \varphi_2)^2 + \frac{1}{2} C_{23} (\varphi_2 - \varphi_3)^2.$$

Выполнив необходимые преобразования в соответствии с уравнением Лагранжа II-го рода, получим следующую систему уравнений.

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\varphi}_1 + C_{12} (\varphi_1 - \varphi_2) = M_d, \\ J_2 \ddot{\varphi}_2 + C_{23} (\varphi_2 - \varphi_3) = C_{12} (\varphi_1 - \varphi_2), \\ J_3 \ddot{\varphi}_3 + M_c = C_{23} (\varphi_2 - \varphi_3). \end{cases} \quad (1)$$

Домножив первое уравнение системы (1) на  $J_2$ , а второе на  $J_1$  и вычтя из первого второе, а затем получившееся уравнение домножив на  $J_3$  и вычтя из него третье уравнение, умноженное на  $J_2$ , получим следующие выражения:

$$J_1 J_2 (\ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_2) + J_2 C_{12} (\varphi_1 - \varphi_2) - J_1 C_{23} (\varphi_2 - \varphi_3) = J_2 M_d - J_1 C_{12} (\varphi_1 - \varphi_2), \quad (2)$$

$$J_2 J_3 (\ddot{\varphi}_2 - \ddot{\varphi}_3) + J_3 C_{23} (\varphi_2 - \varphi_3) - J_2 M_c = J_3 C_{12} (\varphi_1 - \varphi_2) - J_2 C_{23} (\varphi_2 - \varphi_3),$$

$$J_2 J_3 (\ddot{\varphi}_2 - \ddot{\varphi}_3) + C_{23} (J_2 + J_3) (\varphi_2 - \varphi_3) = J_3 C_{12} (\varphi_1 - \varphi_2) + J_2 M_c. \quad (3)$$

Выразив из уравнения (2)  $(\varphi_2 - \varphi_3)$  и  $(\ddot{\varphi}_2 - \ddot{\varphi}_3)$ , получим:

$$(\varphi_2 - \varphi_3) = \frac{J_2}{C_{23}} (\ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_2) + \frac{(J_1 + J_2) C_{12}}{J_1 C_{23}} (\varphi_1 - \varphi_2) - \frac{J_2 M_d}{J_1 C_{23}},$$

$$(\ddot{\varphi}_2 - \ddot{\varphi}_3) = \frac{J_2}{C_{23}} (\varphi_1^{\text{IV}} - \varphi_2^{\text{IV}}) + \frac{(J_1 + J_2) C_{12}}{J_1 C_{23}} (\ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_2).$$

Результаты расчетов подставим в выражение (3) и выполнив соответствующие преобразования, получим:

$$\begin{aligned} (\varphi_1^{\text{IV}} - \varphi_2^{\text{IV}}) + \left[ \frac{J_2 J_3 C_{12} (J_1 + J_2) + J_1 J_2 C_{23} (J_2 + J_3)}{J_1 C_{23}} \right] \frac{C_{23}}{J_2^2 J_3} \times (\ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_2) + \\ + \left[ \frac{C_{23} C_{12} (J_1 + J_2) (J_1 + J_3) - J_1 J_3 C_{23} C_{12}}{J_1 C_{23}} \right] \frac{C_{23}}{J_2^2 J_3} \times (\varphi_1 - \varphi_2) = \\ = \left[ J_2 M_c + \frac{J_2 M_d (J_2 + J_3)}{J_1} \right] \frac{C_{23}}{J_2^2 J_3}. \end{aligned}$$

Введем следующие обозначения:

$$A = \frac{J_3 C_{12} (J_1 + J_2) + J_1 C_{23} (J_2 + J_3)}{J_1 J_2 J_3}, 1/\text{с}^2;$$

$$B = \frac{C_{12} C_{23} [(J_2 + J_3)(J_1 + J_2) - J_1 J_3]}{J_1 J_2 J_3}, 1/\text{с}^4;$$

$$C = \frac{C_{23} [J_1 M_c + M_d (J_2 + J_3)]}{J_1 J_2 J_3}, 1/\text{с}^4.$$

Тогда получим:

$$(\varphi_1^{\text{IV}} - \varphi_2^{\text{IV}}) + A(\ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_2) + B(\varphi_1 - \varphi_2) = C. \quad (4)$$

Введя новую переменную  $\theta_1 = (\varphi_1 - \varphi_2) - C/B$ , получим следующее однородное дифференциальное уравнение [Александров и др., 2010]:

$$\ddot{\theta}_1 + A\dot{\theta}_1 + B\theta_1 = 0. \quad (5)$$

Характеристическое уравнение будет иметь вид:

$$k^4 + Ak^2 + B = 0. \quad (6)$$

Корни уравнения определяются из формулы:

$$k_{1,2}^2 = -\frac{A}{2} \pm \sqrt{\frac{A^2}{4} - B}.$$

Решение однородного уравнения (5) может быть записано в виде [Гасымов и др., 2007]:

$$\theta_1 = C_1 \sin k_1 t + C_2 \cos k_1 t + C_3 \sin k_2 t + C_4 \cos k_2 t.$$

*Результаты исследования.*

Рассмотрим пример решения с исходными данными применительно к ВПМ ЛП-19А.

Исходные данные:  $J_1 = 4,05 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ ;  $N_e = 99 \text{ кВт}$ ;  $h_k = 1,3 \text{ м}$ ;  $h_o = 0,7 \text{ м}$ ;  $\gamma = 15^\circ$ ;  $\dot{\varphi}_1 = \pi n / 30 = 157 \text{ с}^{-1}$ ;  $\dot{\varphi}_2 = 0,2 \text{ с}^{-1}$ ;  $m_k = 20000 \text{ кг}$ ;  $m_o = 5000 \text{ кг}$ ;  $C_{12}^0 = 61992235 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;  $C_{23}^0 = 16000000 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;  $i_n = \frac{\dot{\varphi}_1}{\dot{\varphi}_2} = \frac{157}{0,2} = 785$ .

Тогда

$$J_2^0 = m_k h_k^2 \sin \gamma = 20000 \cdot 1,69 \cdot 0,2588 = 8748 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_2 = \frac{J_2^0}{i_n^2} = \frac{8748}{785^2} = 0,0142 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_3^0 = m_o h_o^2 \sin \gamma = 5000 \cdot 0,49 \cdot 0,2588 = 634 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_3 = \frac{J_3^0}{i_n^2} = \frac{634}{785^2} = 0,001 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad C_{12} = \frac{C_{12}^0}{i_n^2} = \frac{61992235}{785^2} = 100 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$C_{23} = \frac{C_{23}^0}{i_n^2} = \frac{16000000}{785^2} = 26 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad M_d = 9550 \frac{N_e}{n} = 9550 \cdot \frac{99}{1500} = 630 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_c = \frac{(G_k h_k + G_o h_o) \sin \gamma}{i_n} = \frac{(200000 \cdot 1,3 + 50000 \cdot 0,7) \cdot 0,2588}{785} = 97,2 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Начальными условиями для режима разгона будут [Гасымов и др., 2006]:

$$\left. \theta_1 \right|_{t=0} = 0; \quad \left. \dot{\theta}_1 \right|_{t=0} = 0; \quad \left. \ddot{\theta}_1 \right|_{t=0} = \dot{\Phi}_{оп} / t_p; \quad \left. \ddot{\ddot{\theta}}_1 \right|_{t=0} = 0,$$

где  $\dot{\Phi}_{оп}$  – скорость разгона.

$$\dot{\Phi}_{оп} = \dot{\Phi}_n \cdot i_n = 0,1 \cdot 785 = 78,5 \text{ с}^{-1},$$

где  $\dot{\Phi}_n$  – скорость подтягивания машины.

Определяем коэффициенты дифференциального уравнения (5):

$$A = 34167 \text{ с}^{-1}; \quad B = 2536179 \text{ 1/с}^2.$$

Определяем корни уравнения (6):

$$k_{1,2}^2 = -\frac{34167}{2} \pm \sqrt{\frac{34167^2}{4} - 2536179}.$$

$$k_1 = 184,6 \text{ с}^{-1}; \quad k_2 = 8,6 \text{ с}^{-1}.$$

Рассчитываем постоянные интегрирования  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  и  $C_4$  с учетом начальных условий:

$$C_1 = C_3 = 0; \quad C_2 = -\frac{\dot{\Phi}_{оп}}{t_p [k_1^2 - k_2^2]} = -\frac{78,5}{0,1 \cdot [17083,5 - 17009,1]} = -0,023;$$

$$C_4 = \frac{\dot{\Phi}_{оп}}{t_p [k_1^2 - k_2^2]} = \frac{78,5}{0,1 \cdot [17083,5 - 17009,1]} = 0,023.$$

Определяем величину добавочной динамической нагрузки на силовую установку по выражению:

$$M_{доб}^{дин} = C_{12} (C_2 \cos k_1 t + C_4 \cos k_2 t);$$

$$M_{доб}^{дин} = 100 \cdot (-0,023 \cos 184,6 \cdot t + 0,023 \cos 8,6 \cdot t).$$

На рис. 2, 3 и 4 приведены графики изменения добавочного динамического момента при скорости подтягивания машины  $\dot{\varphi}_n = 0,1, 0,2$  и  $0,3 \text{ с}^{-1}$ , соответственно.

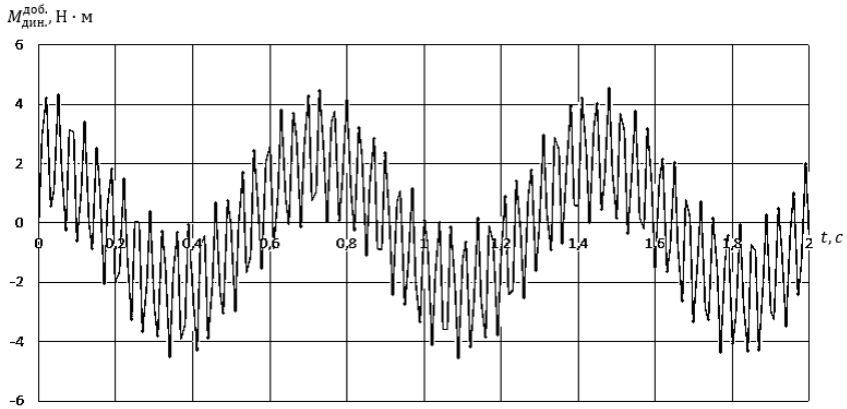


Рис. 2. График изменения добавочного динамического момента при  $\dot{\varphi}_n = 0,1 \text{ с}^{-1}$

Fig. 2. Graph of changes in additional dynamic moment at  $\dot{\varphi}_n = 0,1 \text{ s}^{-1}$

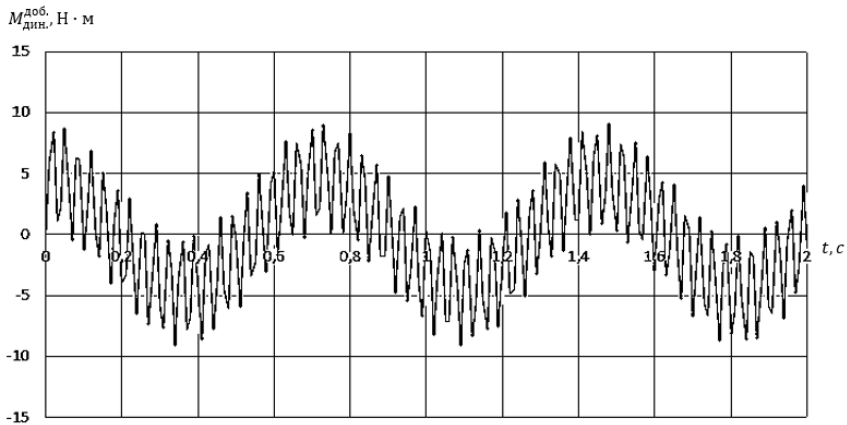


Рис. 3. График изменения добавочного динамического момента при  $\dot{\varphi}_n = 0,2 \text{ с}^{-1}$

Fig. 3. Graph of changes in additional dynamic moment at  $\dot{\varphi}_n = 0,2 \text{ s}^{-1}$

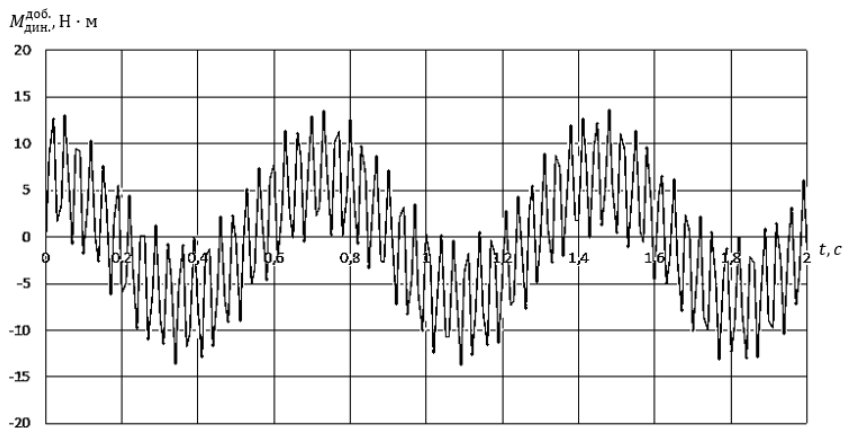


Рис. 4. График изменения добавочного динамического момента при  $\dot{\varphi}_{\Pi} = 0,3 \text{ с}^{-1}$

Fig. 4. Graph of changes in additional dynamic moment at  $\dot{\varphi}_{\Pi} = 0,3 \text{ s}^{-1}$

На рис. 5, 6 и 7 приведены графики изменения добавочного динамического момента при угле наклона  $\gamma = 15^\circ$ ,  $\gamma = 30^\circ$  и  $\gamma = 45^\circ$ , соответственно, ( $\dot{\varphi}_{\Pi} = 0,1 \text{ с}^{-1}$ ).

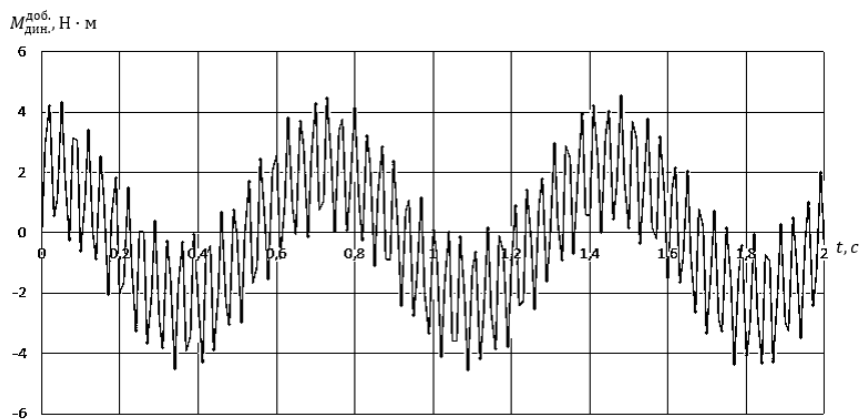


Рис. 5. График изменения добавочного динамического момента при  $\gamma = 15^\circ$

Fig. 5. Graph of changes in additional dynamic moment at  $\gamma = 15^\circ$

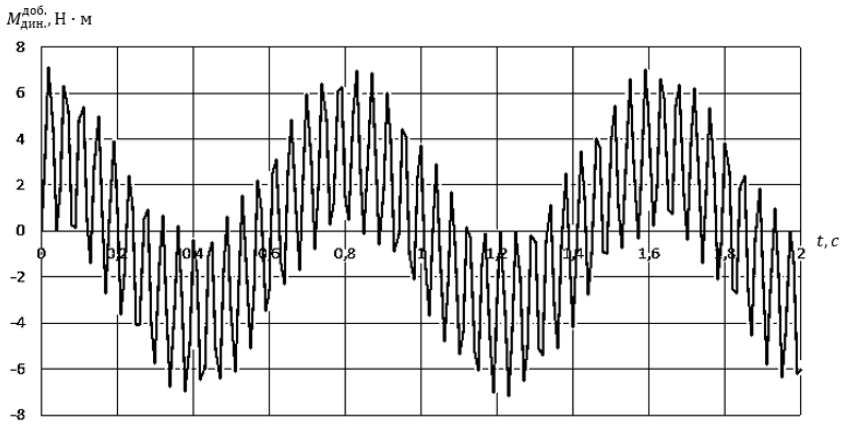


Рис. 6. График изменения добавочного динамического момента при  $\gamma = 30^\circ$

Fig. 6. Graph of changes in additional dynamic moment at  $\gamma = 30^\circ$

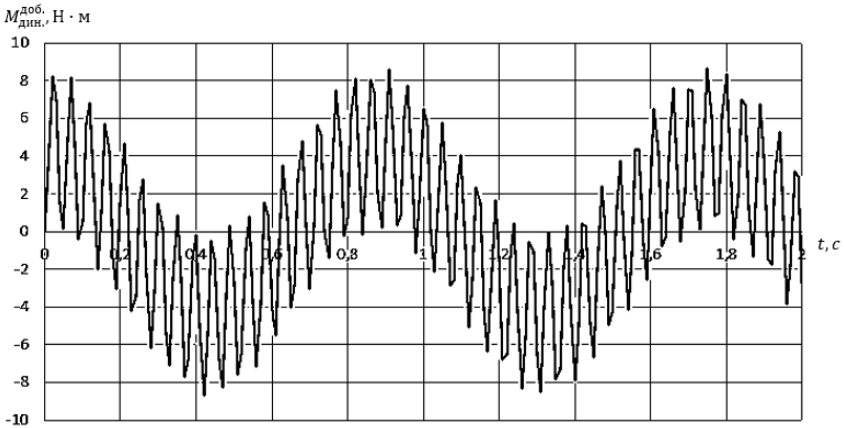


Рис. 7. График изменения добавочного динамического момента при  $\gamma = 45^\circ$

Fig. 7. Graph of changes in additional dynamic moment at  $\gamma = 45^\circ$

На рис. 8 представлен график изменения снижения частоты вращения коленчатого вала в зависимости от угла склона ( $\dot{\phi}_n = 0,1 \text{ c}^{-1}$ ).

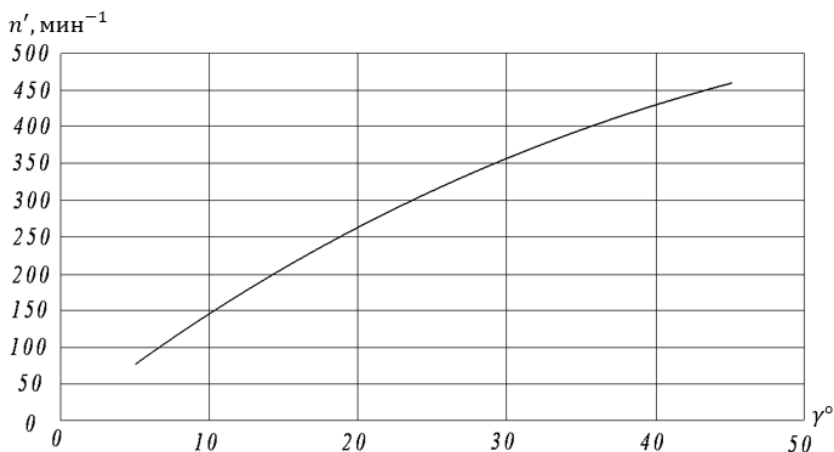


Рис. 8. График изменения снижения частоты вращения коленчатого вала в зависимости от угла склона

Fig. 8. Graph of changes in the reduction in crankshaft rotation speed depending on the slope angle

**Закключение.** Анализ результатов показывает, что подтягивание ВПМ, оснащенной системой выравнивания платформы, рукоятью манипулятора при заготовке древесины на склонах, сопровождается существенно менее значительным динамическим моментом на силовой установке, чем у машины «классической» компоновки. Так, при подтягивании ВПМ на склоне с углом  $\gamma = 15^\circ$  максимальная величина добавочной динамической нагрузки на силовую установку составит всего 4,4 Н·м. При этом момент на силовой установке машины «классической» компоновки на том же угле склона составляет 74,2 Н·м. Таким образом, внедрение в конструкцию ВПМ системы выравнивания позволяет снизить величину добавочного динамического момента на 69,8 Н·м.

Уровень динамической нагруженности силовой установки существенно зависит от используемых оператором угловых скоростей подтягивания машины. Например, при подтягивании ВПМ на склоне с углом  $\gamma = 15^\circ$  и скоростью  $\dot{\phi}_n = 0,1 \text{ с}^{-1}$  значение максимальной добавочной динамической нагрузки на силовую установку составит 4,4 Н·м, при скорости  $\dot{\phi}_n = 0,2 \text{ с}^{-1}$  нагрузка составит 9,1 Н·м, а при скорости  $\dot{\phi}_n = 0,3 \text{ с}^{-1}$  величина нагрузки будет 13,5 Н·м.



Значительное влияние на нагруженность силовой установки и частоту вращения коленчатого вала оказывает величина угла склона, на котором осуществляется работа машины. Так, при подтягивании ВПМ по склону с углом  $\gamma = 30^\circ$  значение максимальной добавочной динамической нагрузки на силовую установку составит 8,1 Н·м, а снижение оборотов коленчатого вала произойдет на 356 мин<sup>-1</sup>. При работе машины на склоне с углом  $\gamma = 45^\circ$  максимальная нагрузка будет 12,3 Н·м, а снижение оборотов коленвала составит 459 мин<sup>-1</sup>.

Разработанная математическая модель позволяет исследовать нагруженность силовых установок ВПМ, оснащенных системами выравнивания платформы, в процессе подтягивания при заготовке древесины на склонах.

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

### Библиографический список

Александров В.А., Бурмистрова О.Н., Шоль Н.Р. О нагруженности силовой установки валочно-пакетирующей машины в режиме переориентирования ходовой системы // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2010. № 3. С. 70–75.

Александров В.А., Ржавцев А.А. Нагруженность лесосечных машин на лесозаготовках. СПб.: СПбГЛТУ, 2021. 256 с.

Александров В.А., Шоль Н.Р. Динамика валочно-пакетирующей машины в режиме движения через обособленные препятствия // Вестник КрасГАУ. 2010. № 9(48). С. 163–167.

Бурмистрова О.Н., Шоль Н.Р., Травин Н.Н. Динамика валочно-пакетирующих машин в режиме преодоления препятствия методом «вывешивания» // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2010. № 5. С. 99–100.

Гасымов Г.Ш., Александров В.А. Динамика валочно-пакетирующей машины в режиме стопорения при выравнивании срезанного дерева захватно-срезающим устройством // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2006. Вып. 177. С. 43–47.

Гасымов Г.Ш., Александров В.А. Нагруженность валочно-пакетирующей машины при выведении срезанного дерева из древостоя // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2007. Вып. 179. С. 64–68.

Зверев И.А., Александров В.А. Нагруженность силовой установки валочно-пакетирующей машины в процессе подтягивания при заготовке древесины на склонах // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 248. С. 230–242. DOI 10.21266/2079-4304.2024.248.230-242.

Шоль Н.Р., Травин Н.Н. Нагруженность силовой установки валочно-пакетирующей машины в режиме преодоления препятствия методом «вывешивания» // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2005. № 11. С. 87–90.

Alexandr A., Igor Z., Ivan B. Analysis of platform leveling systems for tracked feller-buncher machines // *Inventions*. 2021. Vol. 6, no. 4. DOI: 10.3390/inventions6040096.

Amishev D. Steep Slope Feller Buncher: A Feasibility Study // *Future Forest Research*. Task No: F20005, Report No. FFR- H007. 2011. P. 27.

McEwan A., Brink M., van Zyl S. Guidelines for difficult terrain ground based harvesting operations in South Africa // *ICFR Bulletin*. 02-2013. P. 149.

Visser R., Stampfer K. Expanding Ground-Based Harvesting onto Steep Terrain // *Croat. J. For. Eng.* 2015. 36. P. 321331.

### References

Aleksandrov V.A., Burmistrova O.N., Shol N.R. O nagruzhenosti silovoj ustanovki valочно-paketiruyushhej mashiny v rezhime pereorientirovaniya xodovoj sistemy. *Vesting of Mari State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature management*, 2010, no. 3, pp. 70–75. (In Russ.)

Aleksandrov V.A., Rzhavcev A.A. *Nagruzhenost lesosechnykh mashin na lesozagotovkah*. SPb.: SPbFTU, 2021, 256 p. (In Russ.)

Aleksandrov, V. A., Shol N. R. Dinamika valочно-paketiruyushhej mashiny v rezhime dvizheniya cherez obosoblennye prepyatstviya. *The Bulletin of KrasGAU*, 2010, no. 9(48), pp. 163–167. (In Russ.)

Alexandr A., Igor Z., Ivan B. Analysis of platform leveling systems for tracked feller-buncher machines. *Inventions*, 2021, vol. 6, no. 4. DOI: 10.3390/inventions6040096.

Amishev D. Steep Slope Feller Buncher: A Feasibility Study. *Future Forest Research*, Task No: F20005, Report No. FFR- H007, 2011, p. 27.

Burmistrova O.N., Shol N.R., Travin N.N. Dynamics of feller bunchers in the mode of overcoming obstacles using the «hanging» method. *Bulletin of the Moscow State Forestry University – Forest Bulletin*, 2010, no. 5, pp. 99–100. (In Russ.)

Gasimov G.S., Alexandrov V.A. Loading of a feller-buncher when removing a cut tree from a stand. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnikeskoj Akademii*, 2007, no. 179, pp. 64–68. (In Russ.)

Gasimov G.S., Alexandrov V.A. Dynamics of a feller-buncher in the locking mode when leveling a cut tree with a feller head. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnikeskoj Akademii*, 2006, iss. 177, pp. 43–47. (In Russ.)

McEwan A., Brink M., van Zyl S. Guidelines for difficult terrain ground based harvesting operations in South Africa. *ICFR Bulletin*, 02-2013, p. 149.

Shol N.R., Travin N.N. Nagruzhenost silovoj ustanovki valочно-paketiruyushhej mashiny v rezhime preodoleniya prepyatstviya metodom «vyveshivaniya». *Aktualnye problemy lesnogo kompleksa*, 2005, no. 11, pp. 87–90. (In Russ.)

Visser R., Stampfer K. Expanding Ground-Based Harvesting onto Steep Terrain. *Croat. J. For. Eng.*, 2015, 36, pp. 321–331.

Zverev I.A., Aleksandrov V.A. Stresses of the power plant of a feller buncher during the pulling process when harvesting wood on slopes. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2024, iss. 248, pp. 230–242. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.248.230-242. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 25.03.2024

---

**Зверев И.А., Трофимов А.В.** Влияние системы выравнивания платформы на нагруженность силовой установки валочно-пакетирующей машины в процессе подтягивания // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 250. С. 273–287. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.273-287

В статье рассматривается динамическая нагруженность силовой установки валочно-пакетирующей машины, оснащенной системой выравнивания платформы, в процессе ее подтягивания рукоятью манипулятора при заготовке древесины на склонах. Разработана математическая модель, позволяющая на этапе проектирования валочно-пакетирующей машины определить величину добавочного динамического момента, действующего на силовую установку машины, а также частоту вращения коленчатого вала. Математическое описание составлено в форме уравнения Лагранжа 2-ого рода. Приведен пример расчета математической модели для валочно-пакетирующей машины ЛП-19А. Представлены графики изменения добавочного динамического момента при скорости подтягивания 0,1; 0,2 и 0,3 с<sup>-1</sup>, а также в зависимости от угла склона (15, 30 и 45°). Представлен график изменения снижения частоты вращения коленчатого вала в зависимости от угла склона. Анализ результатов исследования показывает, что подтягивание ВПМ, оснащенной системой выравнивания платформы, рукоятью манипулятора при заготовке древесины на склонах, сопровождается существенно менее значительным динамическим моментом на силовой установке, чем у машины «классической» компоновки. Так, при подтягивании ВПМ на склоне с углом  $\gamma = 15^\circ$  максимальная величина добавочной динамической нагрузки на силовую установку составит всего 4,4 Н·м. Уровень динамической нагруженности силовой установки существенно зависит от используемых оператором угловых скоростей подтягивания машины, а также величины угла склона, на котором осуществляется работа. Разработанная математическая модель позволяет исследовать нагруженность силовых установок ВПМ, оснащенных системами выравнивания платформы, в процессе подтягивания при заготовке древесины на склонах как на этапе проектирования новых машин, так и при совершенствовании конструкций серийно-выпускаемых моделей.

**Ключевые слова:** валочно-пакетирующая машина, система выравнивания платформы, заготовка древесины на склонах, математическая модель, силовая установка, добавочный динамический момент.

**Zverev I.A., Trofimov A.V.** The influence of the platform leveling system on the stresses of the power plant of a feller-buncher during the pulling process. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2024, iss. 250, pp. 273–287 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.273-287

The article considers the dynamic loading of the power plant of a feller-buncher machine with a platform leveling system during its pulling by the manipulator handle during timber harvesting on slopes. A mathematical model has been developed that allows determining the value of the additional dynamic torque acting on the machine's power plant and the crankshaft rotation frequency at the design stage of the feller-buncher. The mathematical description is written in the form of the Lagrange equation of the second kind. An example of calculating the mathematical model for the LP-19A feller-buncher is given. Graphs of changes in the additional dynamic torque at a pulling speed of 0.1, 0.2 and 0.3 s<sup>-1</sup>, as well as depending on the slope angle (15, 30 and 45°) are presented. A graph of changes in the crankshaft rotation frequency reduction depending on the slope angle is presented. The analysis of the research results shows that the pulling of the feller-buncher machine equipped with the platform leveling system by the manipulator handle during timber harvesting on slopes is accompanied by a significantly less significant dynamic moment on the power plant than that of a machine with a "classic" layout. Thus, when pulling the feller-buncher machine on a slope with an angle of  $\gamma = 15^\circ$ , the maximum value of the additional dynamic load on the power plant will be only 4.4 Nm. The level of dynamic loading of the power plant significantly depends on the angular velocities of the machine pulling used by the operator, as well as the value of the slope angle on which the work is carried out. The developed mathematical model allows us to study the loading of the feller-buncher machine power plants equipped with platform leveling systems during pulling during timber harvesting on slopes, both at the design stage of new machines and when improving the designs of serially produced models.

**Keywords:** feller buncher machine, platform leveling system, timber harvesting on slopes, mathematical model, power point, additional dynamic moment.

---

**ЗВЕРЕВ Игорь Андреевич** – ассистент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 1126-2121. ORCID: 0000-0002-8163-7489.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: igorzv1997@gmail.com

**ZVEREV Igor A.** – Assistant of Forestry engineering, service and repair department, St. Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 1126-2121. ORCID: 0000-0002-8163-7489.

194021, Institute per. 5, St. Petersburg, Russia. E-mail: igorzv1997@gmail.com

**ТРОФИМОВ Александр Викторович** – доцент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук. SPIN-код: 8933-0230.

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

**TROFIMOV Alexander V.** – PhD (Technical), Associate Professor of Forestry engineering, service and repair department, St. Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 8933-0230.

194021, Institute per. 5, St. Petersburg, Russia. E-mail: ftacademy@home.ru

**Б.Е. Луканин**

**ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА РЕЖИМОВ  
ЛАЗЕРНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ ПЛУЖНОГО ЛЕМЕХА  
ИЗ СТАЛИ 65Г**

*Введение.* Техника, эксплуатируемая в лесопарковом и сельском хозяйстве России, испытывает значительные нагрузки на рабочие органы при её эксплуатации. Функционирование рабочих органов почвообрабатывающих машин осуществляется в условиях постоянного абразивного и ударно-абразивного изнашивания, а также подвергается воздействию агрессивных сред. Поэтому 70–80% неисправностей приходится на износ (потерю массы) рабочего органа, а остальные 20–30% приходится на их деформацию (искажение первоначальной формы) [Сидоров, 2007]. Это чревато внеплановыми остановками техники на время выполнения технологических операций для замены повреждённых деталей, что неизбежно приводит к существенным экономическим потерям. В современных условиях резко выросла цена простоев, вызванных выходом из строя рабочих органов. По данным профессора Курчаткина В.В., час простоя трактора класса 501 кН в напряженный период полевых работ на конец 2000 г. приносил хозяйствам убыток в размере 45 руб. [Курчаткин, 2000]. По среднестатистическим данным предприятий агропромышленного комплекса для замены одного рабочего органа требуется от 15 мин до нескольких часов. Это означает, что реальные общие потери от простоев техники могут превышать стоимость повреждённых деталей в несколько раз.

Поэтому долговечность и надёжность рабочих органов являются основными характеристиками, определяющими технический уровень почвообрабатывающих машин. Для лесного плуга рабочий орган – это корпус. Наиболее тяжело нагруженной частью корпуса является лемех. Лемех воспринимает от 50 до 60 % тягового сопротивления корпуса за счёт чего быстро изнашивается. Скорость абразивного износа оценивается в 5–400 мкм/ч. По данным исследований при износе лезвия плужного лемеха до 5–7 мм (по толщине) неравномерность глубины хода достигает 62–68%, тяговое сопротивление увеличивается до 153–156%, расход горючего возрастает до 125–138%, а производительность пахотных агрегатов снижается до 52–59% [Черноиванов и др., 2003]. Также стоит отметить, что тяжёлые условия эксплуата-

ции рабочих органов лесохозяйственных машин (знакопеременные нагрузки, удары, абразивный износ, коррозия) приводят к быстрому затуплению режущих кромок, изменению формы и размеров деталей, что в итоге приводит к сокращению срока службы, увеличению времени и трудоемкости обслуживания почвообрабатывающих механизмов и снижению экономической эффективности обработки почвы. По этой причине поверхность деталей рабочих органов подвергают упрочнению разными способами. Следовательно, кроме выбора материала изготовления лемеха, важную роль играет выбор способа обработки и упрочнения готового изделия.

На сегодняшний день существуют три основных метода увеличения износостойкости плужных лемехов: применение износостойких материалов при изготовлении, нанесение износостойких покрытий, термическая обработка или армирование поверхности лемеха. Наименее изученным, но, по нашему мнению, весьма перспективным способом поверхностного термоупрочнения рабочих органов почворежущих машин, является лазерное термоупрочнение (лазерная закалка), с использованием оборудования на базе иттербиевых волоконных лазеров высокой мощности.

*Цель исследования* заключается в том, чтобы провести анализ влияния режимов работы лазерной головки для проведения поверхностной термообработки плужных лемехов из стали 65Г на показатели физико-механических характеристик и эксплуатационных свойств.

*Материалы и методика исследования.* Лемех работает в абразивной среде и испытывает значительные динамические нагрузки. При контакте корпуса плуга с препятствиями в почве в виде камней, почвенных уплотнений и твердых участков, нагрузка на лемех возрастает многократно по сравнению с ее значением при нормальной эксплуатации [Соловьев, Лялякин, 2014; Сидоров, 1998]. Поэтому, чем меньше износ лемеха, тем большее количество почвы можно обработать с его помощью. То есть, одной из ключевых характеристик лемеха является его стойкость к абразивному износу или износостойкость. Это означает, что материал для лемеха должен быть, как минимум, износостойким. Из исследований М.Н. Ерохина и В.С. Новикова известно, что наибольшей относительной износостойкостью из легированных сталей, которые используют для производства рабочих органов почворежущих машин, обладают стали 40ХС и 40Х, а стали 45, Л53 и 65Г уступают им как по износостойкости, так и по прочности. Однако стоимость легированных сталей 40Х и 40ХС значительно выше стоимости низколегированных сталей 45, Л53, 65Г. Поэтому для производства лемехов, чаще всего, выбирают стали марок 45, Л53 и 65Г [Ерохин, Новиков, 2008].

Основное влияние на износостойкость легированных сталей в условиях абразивного изнашивания оказывает содержание в них углерода, хрома, а также их твердость. Для определения указанных параметров используют корреляционное уравнение зависимости относительной износостойкости сталей:  $\varepsilon = 0,24x_1 + 0,07x_2 + 0,11x_3 - 3,54$ , где  $\varepsilon$  – относительная износостойкость стали;  $x_1$  – содержание углерода, %;  $x_2$  – содержание хрома, %;  $x_3$  – твердость, HRC [Новиков, Самойленко, 2008]. Таким образом, при повышении твёрдости материала возрастает и его стойкость к абразивному износу или износостойкость.

Поскольку сталь марки 65Г довольно часто используется в производстве лемехов, она была выбрана нами для проведения данных исследований. Сталь 65Г – это рессорно-пружинная сталь со средним содержанием углерода (0,65%) и добавлением марганца (около 1%). Эта сталь характеризуется высокой твердостью, износостойкостью, способностью длительное время удерживать остроту режущей кромки. Химический состав стали 65Г, соответствует ГОСТ 14959-2016.

Из плоского листового проката стали этой марки толщиной 4 мм, при помощи установки лазерной резки UNIMACH LaserCut Ultra, были вырезаны образцы длиной 300 мм и шириной 65 мм в количестве 12 шт. Твёрдость неупрочнённых образцов составила HRC 11-14. Следует отметить, что все значения твёрдости образцов были получены экспериментальным путём, при помощи универсального твердомера Struers DuraVision-30. Для проведения лазерной термообработки образцов из стали 65Г была создана экспериментальная технологическая установка, в состав которой входил непрерывный иттербиевый волоконный лазер со средней выходной мощностью 10 кВт производства ООО НТО «ИРЭ-Полус», работающий на длине волны  $1070 \pm 10$  нм, и оптическая головка IPG D30W (рис. 1). Оптическая головка перемещалась по заданной траектории с помощью роботизированного манипулятора KUKA KR-60 HA. Образцы закрепляли неподвижно на монтажном столе. Лазерный источник и оптическая головка охлаждались с использованием чиллера системы вода – воздух, типа IPG LC-170.

Выбор основных компонентов экспериментальной технологической установки был сделан исходя из геометрической формы и необходимой плотности мощности в лазерном пятне. Необходимо отметить, что лазерная головка IPG D30W серии Wobble с модулем колебаний луча даёт возможность задавать разные траектории движения луча, что позволяет получить на поверхности образца пятна разной геометрической формы с равномерным распределением мощности в зоне термического воздействия. Принципиальная оптическая схема лазерной головки для расчёта необходимых параметров системы представлена на рис. 2.





Рис. 1. Оптическая головка  
IPG D30W

Fig. 1. IPG D30W Welding  
Head with Wobble

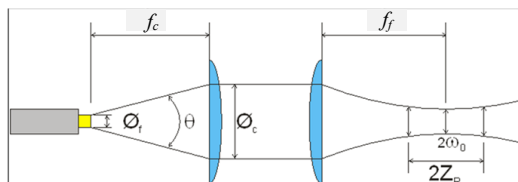


Рис. 2. Оптическая схема лазерной головки  
для расчёта, где  $f_c$  – фокусное расстояние  
коллиматора, мм, а  $f_f$  – фокусное расстояние  
фокусирующей линзы, мм

Fig. 2. Optical scheme of the laser head  
for calculation, where  $f_c$  is the focal length  
of the collimator, mm, and  $f_f$  is the focal length  
of the focusing lens, mm

Расчёт параметров лазерного излучения провели по следующим формулам:

$$BBP = \frac{\varnothing_f}{2} \frac{\theta}{2} = \frac{M^2 \lambda}{\pi}, \quad M^2 = \frac{BPP}{BPP_0}, \quad BPP_0 = \frac{\lambda}{\pi}, \quad \varnothing_c = f_c \theta, \quad 2\omega_0 = \frac{f_f}{f_c} \varnothing_f,$$

где  $BPP$  (beam parameter product) – параметр качества пучка, мм/рад;  $\varnothing_f$  – диаметр транспортного волокна, мкм;  $\varnothing_a$  – диаметр активного волновода, мкм;  $\lambda$  – длина волны, мкм;  $\varnothing_c$  – размер пятна на коллиматоре, мкм;  $M^2$  – отношение угла расходимости лазерного пучка ( $\theta$ , рад) к углу расходимости «эталонного» гауссова пучка ( $\theta_g$ , рад);  $2\omega_0$  – размер пятна в фокусе, мкм;  $z_R$  – рэлеевская длина, мм. Величину  $2z_R$  называют глубиной фокуса лазерного пучка [Ширанков и др., 2013; Климков, Хорошев, 2014].

В результате проведённых расчётов были получены значения параметров настройки оптической головки IPG D30W, необходимые для выполнения поставленных задач. Результаты расчётов параметров настройки оптической головки представлены в табл. 1.

Таблица 1

## Результаты расчётов параметров настройки оптической головки

## The results of calculations of the optical head settings

Параметр	Значение
Длина волны $\lambda$ , мкм	1,07
Фокусное расстояние коллиматора $f_c$ , мм	100
Угол расходимости $\theta$ , рад	0,16
Диаметр транспортного волокна $\phi_f$ , мкм	50
Параметр качества пучка $BPP_0$ , мм мрад	0,34
Параметр качества пучка $BPP$ , мм мрад	2
Параметр качества пучка $M^2$ , мм мрад	5,87
Размер пятна на коллиматоре $\phi_c$ , мм	16
Размер пятна в фокусе $2\omega_0$ , мкм	200
Рэлеевская длина $z_R$ , мм	5
Глубина фокуса $2z_R$ , мм	10

В ходе эксперимента при обработке поверхности образцов были применены 3 разных оптических режима движения лазерного луча:

- линейный режим – траектория движения луча похожа на зубья пилы (рис. 3);
- круговой режим – траектория движения луча похожа на витую пружину (рис. 4);
- режим «круглое пятно» – движение по прямой без колебаний в 2 прохода (рис. 5).

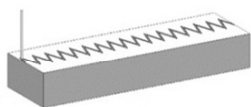


Рис. 3. Линейный режим

Fig. 3. Linear mode

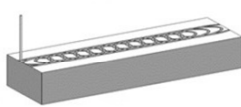


Рис. 4. Круговой режим

Fig. 4. Circular mode

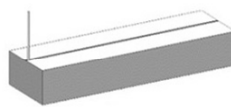


Рис. 5. Режим «круглое пятно»

Fig. 5. Round spot mode

Таким образом, 12 образцов условно поделили на 3 группы, в зависимости от режима движения лазерного луча, и получили по 4 образца в каждой группе. Кроме того, в каждой группе образцы разделили на

2 подгруппы по способу охлаждения после термообработки: на воздухе или в воде. Мощность лазерного излучения подбирали экспериментально, делая предварительные проходы с визуальным осмотром образцов. Критерием подходящей мощности являлось отсутствие следов расплавления металла на обрабатываемой поверхности образца. Шаг изменения выходной мощности лазера составлял 0,25 кВт, в сторону уменьшения. Для наглядности исходная информация по образцам и режимам их обработки представлена в табл. 2.

Таблица 2

### Исходная информация по образцам и режимам их обработки

#### Initial information on samples and their processing modes

№ образца	Режим упрочнения	Способ охлаждения	Мощность излучения, кВт	Скорость перемещения луча, мм/с	Амплитуда колебания луча, мм	Фокус, мм	Частота колебания, Гц
1	Линейный режим	Воздух	2,25	10	10	125	100
2		Воздух	2,25	10	10	125	100
3		Вода	2,25	10	10	125	100
4		Вода	2,25	10	10	125	100
5	Круговой режим	Воздух	2,25	10	10	125	100
6		Воздух	2,25	10	10	125	100
7		Вода	2,25	10	10	125	100
8		Вода	2,25	10	10	125	100
9	Круглое пятно	Воздух	1,00	10	–	250	–
10		Воздух	1,25	10	–	250	–
11		Вода	1,25	10	–	250	–
12		Вода	1,25	10	–	250	–

После термоупрочнения образцов из стали 65Г с использованием итербиевого волоконного лазера ЛС-10 и оптической головки IPG D30W с модулем колебаний луча, обработанные лазерным излучением образцы были подготовлены для дальнейшего изучения формы и глубины зоны термоупрочнения, микроструктуры упрочнённого слоя и механических свойств материала (рис. 6). Образцы разрезали на более мелкие части (заготовки шлифов) для проведения металлографических исследований. Исследования показателей качества выполняли в испытательной лаборатории

ООО НТО «ИРЭ-Полюс» с использованием современного испытательного и измерительного оборудования:

- универсальный твердомер Struers DuraVision-30;
- микротвердомер Struers DuraScan-70;
- электромеханическая напольная машина W+B LFM-250;
- автоматический экстензометр MFL 300-B;
- копер маятниковый W+B PH-300 напольный.

Форму зоны термического воздействия лазерного излучения, микроструктуру стали, глубину закалки и состояние поверхности оценивали с помощью оптического микроскопа Olympus GX-51 с увеличением 5–1000 крат, оснащенного цифровой камерой с разрешением 12,8 млн пикселей. Были произведены механические испытания на статическое растяжение, измерения твёрдости и микротвёрдости по глубине и ширине упрочнённого слоя, а также исследования стойкости образцов к ударной нагрузке.

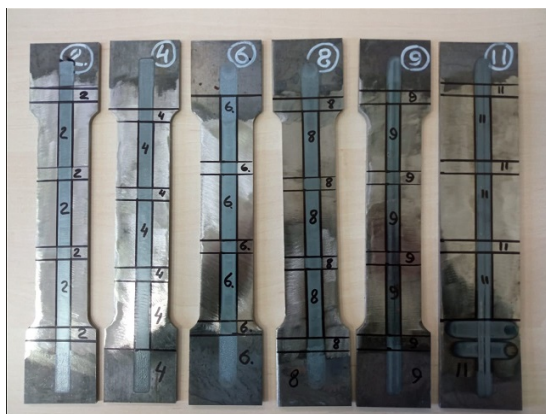


Рис. 6. Упрочнённые образцы из стали 65Г

Fig. 6. Hardened steel samples 65G

*Обсуждение и результаты исследования.* В результате металлографических исследований установлено следующее. В зависимости от траектории движения лазерного луча, глубина и форма упрочнённого слоя получились разными. Как видно из рис. 7, зона упрочнённого слоя, при линейном режиме упрочнения (образцы 1–4) имеет ваннообразную форму с продолжительным и ровным дном. Глубина упрочнённого слоя составила от 612 до 630 мкм, при ширине 11142 мкм. Твёрдость упрочнённого слоя составила HRC 54.



Рис. 7. Форма зоны упрочнённого слоя при линейном режиме

Fig. 7. The shape of the hardened layer zone in linear mode

После измерения микротвёрдости зоны термического упрочнения, получили распределение значений HV по ширине и глубине упрочнённого слоя обработанных образцов. Измерения микротвердости на шлифах проводились микротвердомером модели DURASCAN – 70 с автоматическим анализом отпечатка индентора по методу Виккерса в соответствии с ГОСТ 9450-76 с нагрузкой 300 г и шагом измерения 100 мкм по глубине и 300 мкм по ширине. График зависимости микротвёрдости по ширине и глубине упрочнённого слоя при линейном режиме представлен на рис. 8.

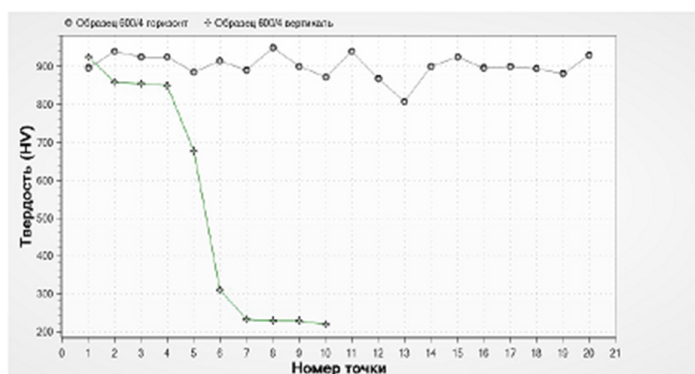


Рис. 8. Зависимость микротвёрдости по ширине и глубине при линейном режиме

Fig. 8. Dependence of microhardness in width and depth in linear mode

При круговом режиме термообработки образцы 5–8 получили зону термоупрочнения полукруглой формы сильно вытянутой по ширине рис. 9. Глубина упрочнённого слоя составила от 289 до 479 мкм, ширина 12055 мкм, при твёрдости упрочнённого слоя HRC 29-45. График зависимости микротвёрдости по ширине и глубине при круговом режиме представлен на рис. 10.



Рис. 9. Форма зоны упрочненного слоя при круговом режиме  
Fig. 9. The shape of the hardened layer zone in a circular mode

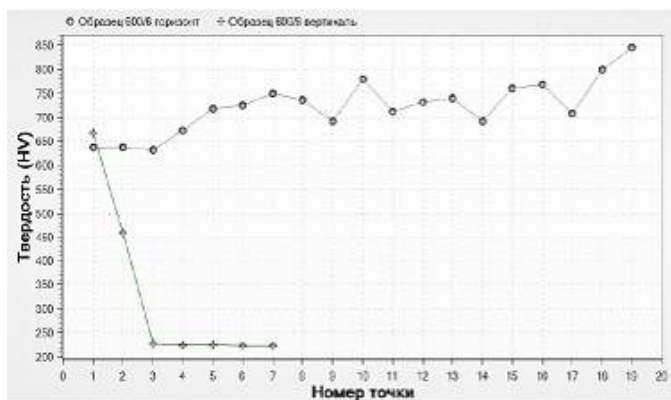


Рис. 10. Зависимость микротвёрдости по ширине и глубине  
при круговом режиме

Fig. 10. The dependence of microhardness in width and depth  
in the circular mode

В результате поверхностной термообработки режимом круглого пятна в 2 прохода (образцы 9–12), была получена форма зоны термоупрочнения, состоящая из двух, соприкасающихся полукругов рис. 11. Такая форма зоны термоупрочнения стала возможна по причине того, что лазерный луч, имея форму круглого пятна, двигался с постоянной скоростью, без каких-либо колебаний. Лазерный луч прошёл заданное расстояние сначала в одну сторону, а потом в обратную, по той же траектории, со смещением в сторону на ширину диаметра пятна. Глубина упрочнённого слоя первого сегмента составила 1036 мкм, а второго сегмента 756 мкм. Общая ширина упрочнённого слоя получилась 10588 мкм. Твёрдость первого сегмента – HRC 54, второго – HRC 54, в месте соприкосновения зон – HRC 21. График зависимости микротвёрдости по ширине и глубине при режиме круглого пятна представлен на рис. 12.



Рис. 11. Форма зоны упрочненного слоя в режиме круглого пятна  
Fig. 11. The shape of the hardened layer zone in the round spot mode

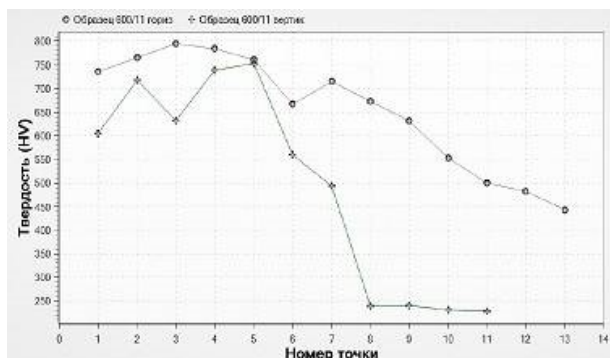


Рис. 12. Зависимость микротвёрдости по ширине и глубине  
при режиме круглого пятна

Fig. 12. The dependence of microhardness in width and depth  
in the round spot mode

Результаты измерения механических свойств, упрочнённых образцов приведены в табл. 3. Показатели твёрдости рассматривали как качественную оценку твёрдости упрочнённого слоя, поскольку измерения были произведены на неподготовленных образцах, сразу после лазерного термоупрочнения, с целью оценить эффект от обработки материала при том или ином режиме. После оценки результатов проведённых исследований, по данным, представленным на рис. 7–12 и в табл. 3, можно сделать заключение, что весомым преимуществом лазерной термообработки по сравнению с традиционными методами термической обработки материалов – это отсутствие дополнительных операций отпуска. Отпуск устраняет внутренние напряжения, но при этом снижает твёрдость обработанного слоя. Можно сравнить: твёрдость стали 65Г после термической обработки и отпуска 44–49 HRC, а после упрочнения лазерным пятном 54 HRC. Следует отметить, что получение высоких физико-механических свойств связано с высокими скоростями нагрева и охлаждения, которые составляют 104–106 °/с [Бирюков, 2009].

Таблица 3

**Результаты измерения механических свойств, упрочнённых образцов****The results of measuring the mechanical properties of hardened samples**

№ образца	Режим	Способ закали	HRC	HV	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	Предел прочности при растяжении $\sigma_b$ , МПа
Н	Исходный материал	Исходный материал	13	190	26,28	707,7
			14	190	22,12	
			11	180	20,19	
2	Линейный режим	Воздух	54	600	6,41	496,33
			54	600	8,33	
			54	600	8,65	
4	Линейный режим	Вода	54	600	8,33	464,5
			54	600	8,97	
			54	600	7,05	
6	Круговой режим	Воздух	37	340	24,68	564,73
			29	270	9,62	
			37	330	8,65	
8	Круговой режим	Вода	37	330	8,01	542,38
			31	290	7,69	
			45	450	16,99	
9	Круглое пятно	Воздух	1 пр/М/2 пр	1 пр/М/2 пр	–	–
			54/20/26	600/220/250	13,14	582,59
			54/18/32	600/210/300	13,46	
			54/15/28	600/190/270	10,58	
11	Круглое пятно	Вода	50/25/54	530/250/600	10,58	569,23
			54/21/54	600/220/600	7,69	
			54/22/54	600/230/600	10,32	

В результате лазерное упрочнение на выбранных режимах обеспечивает достижение заданных физико-механических свойств образцов из стали 65Г и, соответственно, эксплуатационных характеристик. Это свиде-



тelleствует о том, что лазерное термоупрочнение (закалка) с использованием оборудования на базе иттербиевых волоконных лазеров высокой мощности является эффективным способом поверхностного термоупрочнения рабочих органов почвообрабатывающих и почвообрабатывающих машин.

*Выводы.*

1. При всех трёх режимах лазерного термоупрочнения твёрдость поверхностного слоя образцов, по сравнению с исходной, выросла, соответственно: в 3,2 раза (при линейном режиме), в 1,9 раз (при круговом режиме с охлаждением в воде), в 1,7 раз (при круговом режиме с охлаждением на воздухе). При этом, среда охлаждения образцов (вода или воздух) при линейном упрочнении на твёрдость влияния не оказывает.

2. При поверхностном лазерном термоупрочнении не имеет значения, в какой закалочной среде происходит охлаждение.

3. Наиболее эффективным режимом лазерного термоупрочнения, с точки зрения обеспечения заданных свойств, является линейный метод. При этом режиме глубина и твёрдость упрочнённого слоя достигли наибольших значений.

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

**Библиографический список**

*Бирюков В.П.* Восстановление и упрочнение поверхностей лазерным излучением // Фотоника. 2009. № 3. 14 с.

*Ерохин М.Н., Новиков В.С.* Повышение прочности и износостойкости лемеха плуга // Вестник ФГО ВПО МГАУ. 2008. № 3. С. 100–107.

*Климков Ю.М., Хорошев М.В.* Лазерная техника: учеб. пособие. М.: МИИ-ГАиК, 2014. С. 30–44.

*Курчаткин В.В.* Надежность и ремонт машин. М.: Колос, 2000.

*Новиков В.С., Самойленко А.Н.* Математическая модель зависимости износостойкости материалов от химического состава и твердости // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. 2008. № 3. 126 с.

*Сидоров С.А.* Повышение долговечности и работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин и орудий, применяемые в сельском и лесном хозяйстве : дисс. ... д-ра техн. наук С.А.Сидоров. Место защиты: Всерос. науч.-исслед. ин-т с.-х. машиностроения им. В.П. Горячкина. М., 2007. 391 с.

*Сидоров С.А.* Технический уровень и ресурс рабочих органов сельхозмашин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 1998. № 3. 29 с.

*Соловьев С.А., Лялякин В.П.* Состояние и перспективы упрочнения и восстановления деталей почвообрабатывающих машин // Труды ГОСНИТИ. 2014. Т. 115. С. 96–104.

Черноиванов В.И., Близких В.В., Северный А.Э. Техническое обслуживание и ремонт машин в сельском хозяйстве. М.–Челябинск: ГОСНИТИ, ЧГАУ, 2003. 992 с.

Ширанков А.Ф., Носов П.А., Пахомов И.И., Григорьянц А.Г., Якунин В.П., Третьяков Р.С. Разработка лазерно-оптических систем технологических установок на основе теории лазерной оптики // Труды МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 610. С. 230–249.

### Reference

Biriukov V.P. Vosstanovlenie i uprochnenie poverkhnostei lazernym izlucheniem. *Fotonika*, 2009, no. 3. 14 p. (In Russ.)

Chernoivanov V.I., Blizkikh V.V., Severnyi A.E. Tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont mashin v sel'skom khoziaistve. M.–Cheliabinsk: GOSNITI, CHGAU, 2003. 992 p. (In Russ.)

Erokhin M.N., Novikov V.S. Povyshenie prochnosti i iznosostoikosti lemekha pluga. *Vestnik FGO VPO MGAU*, 2008, no. 3, pp. 100–107. (In Russ.)

Klimkov U.M., Horoshev M.V. Lazernaia tekhnika: ucheb. posobie. M.: MII GAiK, 2014, pp. 30–44. (In Russ.)

Kurchatkin V.V. Nadezhnost' i remont mashin. M.: Kolos, 2000. (In Russ.)

Novikov V.S., Samoilenko A.N. Matematicheskaiia model' zavisimosti iznosostoikosti materialov ot khimicheskogo sostava i tverdsti. *Vestnik FGOU VPO MGAU*, 2008, no. 3. 126 p. (In Russ.)

Shirankov A.F., Nosov P.A., Pakhomov I.I., Grigor'iants A.G., Iakunin V.P., Tre't'iaikov R.S. Razrabotka lazerno-opticheskikh sistem tekhnologicheskikh ustanovok na osnove teorii lazernoï optiki. *Trudy MGTU im. N.E. Baumana*, 2013, no. 610, pp. 230–249. (In Russ.)

Sidorov S.A. Tekhnicheskii uroven' i resurs rabochikh organov sel'khoz mashin. *Traktory i sel'skokhoziaistvennyye mashiny*, 1998, no. 3. 29 p. (In Russ.)

Sidorov, S.A. Povyshenie dolgovechnosti i rabotosposobnosti rabochikh organov pochvoobrabatyvaiushchikh mashin i orudii, primeniaemye v sel'skom i lesnom khoziaistve : diss. ... d-ra tekhn. nauk. Mesto zashchity: Vseros. nauch.-issled. in-t p.-kh. mashinostroeniia im. V.P. Goriachkina. M., 2007. 391 p. (In Russ.)

Solov'ev S.A., Lialiaikin V.P. Sostoianie i perspektivy uprochneniia i vosstanovleniia detalei pochvoobrabatyvaiushchikh mashin. *Trudy GOSNITI*, 2014, vol. 115, pp. 96–104. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 25.12.2023

---

Луканин Б.Е. Особенности выбора режимов лазерной термообработки плужного лемеха из стали 65Г // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 250. С. 288–302. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.288-302

Лазерная термообработка является эффективным способом улучшения механических свойств и повышения износостойкости металлических деталей. В настоящей статье были рассмотрены особенности выбора режимов лазерной термообработки плужного лемеха из стали 65Г. Данный вид стали относится к углеродистым легированным сталям с высоким содержанием углерода, марганца и кремния. Она характеризуется высокой твердостью и прочностью, что делает ее прекрасным материалом для изготовления плужных лемехов, которые подвергаются значительным механическим нагрузкам и трению с почвой. Лазерная термообработка позволяет контролировать температурные зоны локально, что дает возможность изменять структуру и свойства материала для достижения оптимальных характеристик. При обработке плужных лемехов лазером применяются такие режимы, как нагрев, закалка и отпуск. Оптимальный выбор режимов лазерной термообработки плужного лемеха из стали 65Г позволит достичь требуемых механических свойств и повысить износостойкость детали. Комплексное рассмотрение свойств материала, геометрии и технических возможностей лазерной обработки позволит определить оптимальные параметры и достичь желаемых результатов.

Ключевые слова: лемех, лазерное термоупрочнение, твёрдость, сталь, излучение.

**Lukanin B.E.** Features of the choice of laser heat treatment modes for a plow share made of 65G steel. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 250, pp. 288–302 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.288-302

Laser heat treatment is an effective way to improve the mechanical properties and increase the wear resistance of metal parts. This article examined the features of choosing laser heat treatment modes for a plow share made of 65G steel. This type of steel belongs to carbon alloy steels with a high content of carbon, manganese and silicon. It is characterized by high hardness and strength, which makes it an excellent material for the manufacture of plow shares, which are subject to significant mechanical loads and friction with the soil. Laser heat treatment allows you to control temperature zones locally, which makes it possible to change the structure and properties of the material to achieve optimal characteristics. When processing plow shares with a laser, modes such as heating, hardening and tempering are used. The optimal choice of laser heat treatment modes for a plow share made of 65G steel will allow you to achieve the required mechanical properties and increase the wear resistance of the part. A comprehensive consideration of the material properties, geometry and technical capabilities of laser processing will allow us to determine the optimal parameters and achieve the desired results.

Key words: ploughshare, laser heat strengthening, hardness, steel, radiation.

---

**ЛУКАНИН Борис Евгеньевич** – аспирант Мытищинского филиала МГТУ имени Н.Э. Баумана, начальник сектора сертификации и аттестации отдела САС ООО НТО «ИРЭ-Полус» г. Фрязино. ORCID ID: 0009-0008-8277-0688.

141190, Площадь имени академика Б.А. Введенского, д. 3, стр. 5, г. Фрязино, г.о. Фрязино, Московская обл., Россия. E-mail: Boris.Lukanin@yandex.ru

**LUKANIN Boris E.** – PhD student of the Mytishchi branch of the Bauman Moscow State Technical University, Head of the Certification and Attestation Sector of the SAS Department of NTO IRE-Polyus LLC Fryazino. ORCID iD: 0009-0008-8277-0688.

141190. Academician B.A. Vvedensky sq. 3. Build. 5. Fryazino. Moscow region. Russia. E-mail: Boris.Lukanin@yandex.ru

**М.С. Новиков, О.А. Куницкая, И.В. Григорьев**

**ПРАКТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ДИНАМИКИ ТЕМПЕРАТУР СЛОЕВ  
ЛЕСНОГО ПОЧВОГРУНТА КРИОЛИТОЗОНЫ**

*Введение.* Леса криолитозоны относятся к особенно экологически ранимым. При производстве лесосечных работ наибольшее негативное влияние на лесную экосистему оказывают операции трелевки. Самым негативным фактором трелевки в лесозаготовительный период года является переуплотнение и разрушение структуры лесных почвогрунтов на трелевочных волоках и технологических коридорах. Интенсивное колееобразование приводит не только к критическим повреждениям лесной экосистемы, но и заметно снижает эффективность работы лесных машин. При морозах более 40 °С лесные машины работать не могут из-за возникновения морозной хрупкости металла конструкции. Поэтому значительный объем заготовки приходится именно на умеренно теплый период года.

Экспериментальный мониторинг температур слоев лесного почвогрунта криолитозоны на каждой конкретной территории трелевки древесины позволит спрогнозировать степень воздействия движителей лесных машин на лесные почвогрунты криолитозоны в конкретных природно-производственных условиях [Рудов и др., 2019; Гончарова и др., 2015].

При оттайке почвогрунтов криолитозоны происходит избыточное перенасыщение его влагой, вследствие чего слабеют связи между твердыми частицами и физико-механические свойства почвогрунта криолитозоны утрачивают первоначальные значения [Саввинов, 1976; Чемшикова, 2019] (рис. 1–3).

Выполненные ранее экспериментальные исследования показали, что изменение температуры в слоях мерзлотного почвогрунта носит нелинейный характер, который связан с различными теплоемкостями и теплопроводностями слоев почвогрунта [Бобжов и др., 2014; Григорьев и др., 2013; Шапиро др., 2008; Шапиро и др., 2010].



*Рис. 1.* Лесосека, разрабатываемая с использованием форвардеров финской фирмы Ponsse, в ООО «Витимская лесная компания» (пос. Витим, Ленский район) весной 2021 г., температура воздуха минус 25 градусов

*Fig. 1.* A logging cut developed using forwarders of the Finnish company Ponsse in LLC Vitimskaya Lesnaya Kompaniya (Vitim settlement, Lena District) in spring 2021, air temperature minus 25 degrees Celsius.



*Рис. 2.* Лесосека, разрабатываемая с использованием форвардеров финской фирмы Ponsse, в ООО «Витимская лесная компания»

*Fig. 2.* A logging section developed using forwarders from the Finnish company Ponsse at LLC Vitimskaya Lesnaya Kompaniya (Vitimskaya Lesnaya Company)



*Рис. 3. Лесосека, разрабатываемая с использованием форвардеров финской фирмы Ponsse, в ООО «Витимская лесная компания»*

*Fig. 3. A logging section developed using forwarders from the Finnish company Ponsse at LLC Vitimskaya Lesnaya Kompaniya (Vitimskaya Lesnaya Company)*

*Объект исследований.* Экспериментальные исследования по измерению температуры в слоях мерзлотного почвогрунта проводятся на площадке Сергеляхского шоссе в г. Якутске, Республики Саха (Якутия). Площадка исследований представляет собой практически ровный участок, на котором в октябре 2021 года устроена скважина диаметром 100 мм и глубиной 3 м. На всю глубину скважины заглублена пластиковая трубка диаметром 50 мм, со встроенными внутри трубки датчиками температуры, расположенными с шагом 10 см. Количество датчиков температуры – 32, датчик № 1 соответствует наибольшей глубине скважины. При этом 32-й датчик расположен выше уровня земляного покрытия и измеряет температуру приземного слоя воздуха. Датчики температуры способны измерять температуру в диапазоне  $-55...+125$  [Боргонутдинов и др., 2020].

*Материалы, объекты и методы.* Датчики температуры передают сведения на персональный компьютер, который связан с датчиками RODOS-5Z – USB через провод и специальный блок, подключаемый к персональному компьютеру через USB-порт.

RODOS-5Z – USB датчик температуры. Устройство позволяет получить многоканальный цифровой термометр, подключаемый к персональному компьютеру через USB-порт (рис. 4).

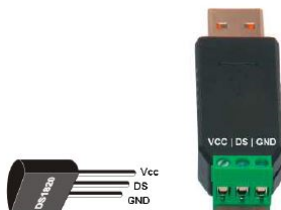


Рис. 4. Схема подключения датчиков  
Fig. 4. Diagram of sensor connection

В качестве программного обеспечения выступает программа «BM1707.exe». Датчики температуры и программное обеспечение для измерения температуры в дорожной конструкции разработаны ООО «Олимп» (г. Москва).

Измерения температуры проводились ежедневно с октября 2021 г. по август 2023 г., кроме дней с осадками.



Рис. 5. Температурная трубка  
Fig. 5. Temperature tube



Рис. 6. Толщина снега в марте 2023 г.  
(45 см)  
Fig. 6. Snow depth in March 2023 (45 cm)



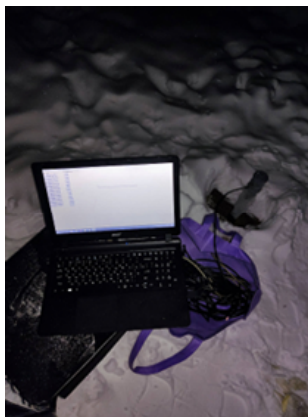


Рис. 7. Снятие данных на персональный компьютер

Fig. 7. Data capture on a personal computer



Рис. 8. Подключение кабеля к температурной трубке

Fig. 8. Connecting the cable to the temperature tube

Регистрировались максимальные и минимальные суточные температуры воздуха и покрытия, в том числе осадки (снег) (рис. 9).



Рис. 9. Распределение снежного покрова в 2023 г.

Fig. 9. Distribution of snow cover in 2023

По данным средних температур в слоях почвогрунта криолитозоны строились графические зависимости. На основе полученных значений температуры в слоях почвогрунта были построены графики, показывающие среднюю температуру в слоях почвогрунтов, в зависимости от времени года (рис. 10–16). Также была получена сводная графическая зависимость, показывающая разницу средних температур в слоях почвогрунтов.

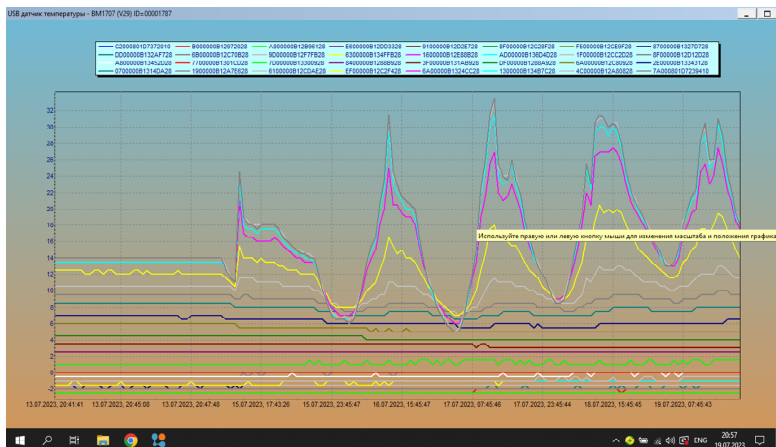


Рис. 10. График в программном комплексе VM1707.exe

Fig. 10. Graph in the program complex VM1707.exe

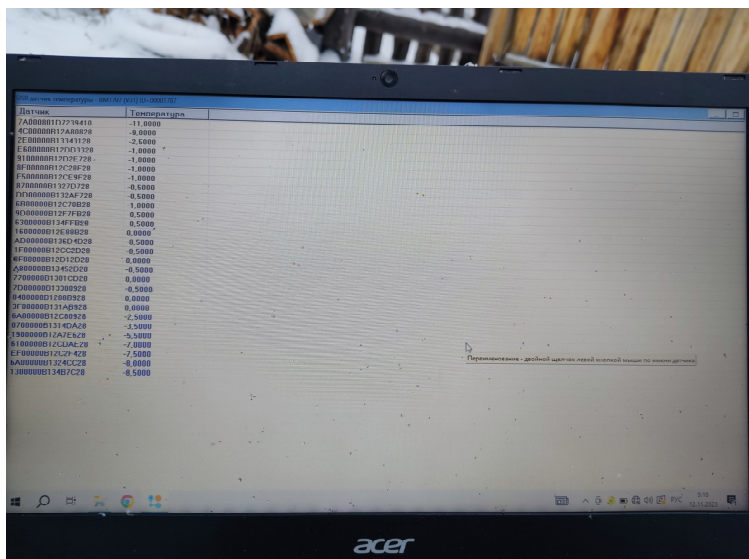


Рис. 11. Снятие данных с компьютера из программного комплекса

Fig. 11. Capturing data from the computer from the program complex



Рис. 12. График промерзания слоев лесного почвогрунта  
Fig. 12. Graph of freezing of forest soil layers

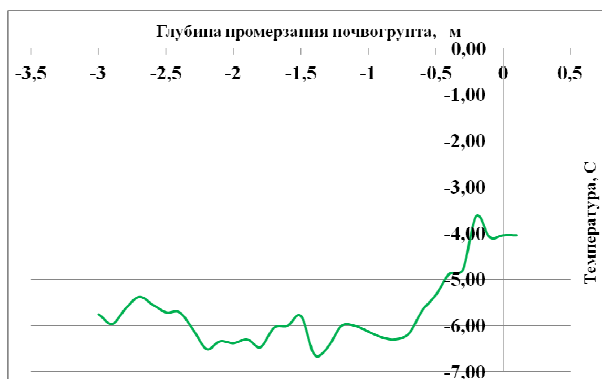


Рис. 13. График средней температуры промерзания за весенний период  
Fig. 13. Graph of average freezing temperature for the spring period

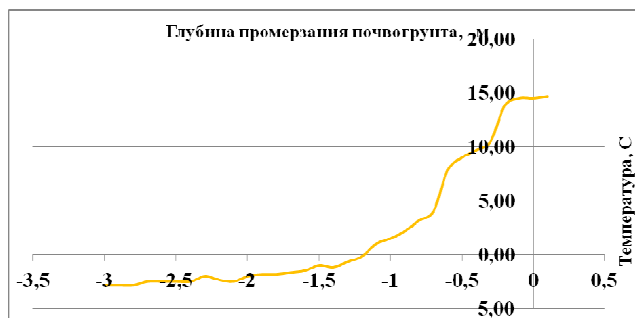


Рис. 14. График средней температуры промерзания за летний период  
Fig. 14. Graph of average freezing temperature for the summer period



Рис. 15. График средней температуры промерзания за осенний период  
Fig. 15. Graph of average freezing temperature for the fall period

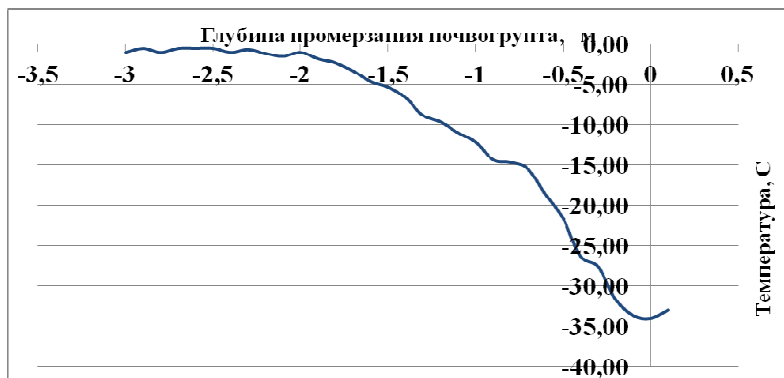


Рис. 16. График средней температуры промерзания за зимний период  
Fig. 16. Graph of average freezing temperature for the winter period

**Результаты и выводы исследований.** Установлено, что изменение температуры в слоях мерзлотного почвогрунта носит нелинейный характер, который связан с различными теплоемкостями и теплопроводностями слоев почвогрунта [Бурмистрова и др., 2019; Серый и др., 1991; Немцов и др., 1993; Коробов и др., 1993].

Задачами дальнейших исследований являются: определение влияния теплофизических свойств материалов конструктивных слоев и геометрических параметров на температурный режим слоев лесного почвогрунта криолитозоны с использованием численного моделирования; изучение влияния перепада температур на величину температурных напряжений; уточнение

формулы для определения температурных напряжений слоев лесного почвогрунта; изучение данных Института мерзлотоведения РАН Республики Саха (Якутия), Института криолитозоны Республики Саха (Якутия) [Анисимов и др., 2019; Яковлев и др., 1985; Виногоров и др., 1978; Бондарев и др., 1988].

В целях сравнения и проверки собранных данных при исследовании температур почвогрунтов криолитозоны на Сергеляхском шоссе в городе Якутске, планируется использование логгеров (температурные датчики), не менее 3 точек, непосредственно на лесосечных работах в Ленском районе Республики Саха (Якутия), магистральных волоках, лесовозных дорогах. В том числе планируется взятие проб грунтов, фотофиксация колееобразований, их размерные изменения в зависимости от коэффициента уплотнения, погодных условий и времени года.

*Закключение.* Практическое исследование динамики температур слоев почвогрунта криолитозоны позволит размещать лесосеки в пространстве и по сезонам года в зависимости от несущей способности почвогрунта; выбрать щадящие технологические схемы разработки делянок в зависимости от рельефа местности и мозаичности почвенно-грунтовых условий; осуществлять мониторинг за соблюдением соотношения параметров волоков, погрузочных пунктов и пасек; создать рациональные маршруты перевозок; снизить количество проходов машин по волоку.

*Сведения о финансировании исследования.* Материалы исследования получены за счет гранта Российского научного фонда № 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>

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

### Библиографический список

Андреева В.В., Максимов Г.Т., Спектор В.В. и др. Температурный режим многолетнемерзлых пород на постпиогенных участках Севера Колымской низменности // Успехи современного естествознания. 2021. № 8. С. 29–40.

Анисимов О.А., Анохин Ю.А., Лавров С.А. и др. Континентальная многолетняя мерзлота // Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. 2012. С. 301–359.

Бобжов В.Е., Калистратов А.В., Степанищева М.В. Исследование модуля деформации лесной почвы в сосновых древостоях с учетом действия боковых корней // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 2 (22). С. 187–190.

Бондарев А.Г., Сапожников П.М., Уткаев В.Ф. и др. Изменения физических свойств и плодородия почв при их уплотнении движителями сельскохозяйственной техники // Сборник науч. тр. ВИМ. Т. 118–1988. С. 46–57.

Бурмистрова О.Н., Чемшикова Ю.М. Сохранение почвенного покрова от разрушения при воздействии гусеничных движителей // Транспортные и транспортно-

технологические системы : матер. Междунар. науч.-технич. конференции / под ред. Н.С. Захарова. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2019. С. 38-41.

*Виногоров Г.К.* Некоторые лесозэксплуатационные характеристики почвенно-грунтовых условий и рельефов // Вопросы технологии и механизации лесосечных работ: сб. науч. тр. ЦНИИМЭ. 1972. № 123. С. 3–9.

*Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Бобрик А.А. и др.* Температурные режимы северотаежных почв Западной Сибири в условиях островного распространения многолетнемерзлых пород // Почвоведение, 2015, № 12, С. 1462–1473.

*Григорьев И.В., Никифорова А.И., Пельмский А.А., Хитров Е.Г., Хахина А.М.* Экспериментальное определение времени релаксации напряжений лесного грунта // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2013. № 8 (137). С. 77–80.

*Григорьев И.В., Тихонов И.И., Григорьева О.И. и др.* Поиск новых технических решений для повышения экологической совместимости лесных машин с лесной средой // Интенсификация формирования и охраны интеллектуальной собственности: сб. матер. республиканской научно-практической конференции, посвящ. 75-летию ПетрГУ. Петрозаводский государственный университет. 2015. С. 9–11.

*Калистратов А.В., Григорьева О.И., Григорьев Г.В., и др.* О важности исследований экологической эффективности процесса трелевки // Наука, образование, инновации в приграничном регионе: сб. матер. республиканской научно-практической конференции. Петрозаводский государственный университет, 2015. С. 7–9.

*Каляшов В.А., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., и др.* Исследование устойчивости массива оттаивающего почвогрунта при его динамическом взаимодействии с колёсной лесной машиной на склонах // Resources and Technology. 2022. Т. 19. № 1. С. 129–148.

Концепция развития лесоперерабатывающей промышленности Республики Саха (Якутия) до 2016 года: Распоряжение Правительства Республики Саха (Якутия) от 02.07.2012 г. № 662-р, 2012. 23 с.

*Коробов В.В.* Многооперационные машины и окружающая среда // Лесная промышленность. 1993. № 5. С. 13–14.

*Немцов В.П.* Развитие машинной технологии лесозаготовок в России // Лесная промышленность. 1993. № 5. С. 12–13.

Особенности контактного взаимодействия трелевочной системы с мерзлым почвогрунтом // Лесной журнал. 2019. № 1. 14 с.

*Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И.* Особенности контактного взаимодействия трелевочной системы с мерзлым почвогрунтом // ИВУЗ. Лесной журнал. 2019. № 1 (367). С. 106–119.

*Саввинов Д.Д.* Гидротермический режим почв в зоне многолетней мерзлоты / Институт биологии Якутский филиал Сибирского отделения Академии наук СССР. Новосибирск, 1976. С. 4–15.

Серый В.С., Засукин Д.П., Вялых П.Ц. Влияние нарушений почвенного покрова при сплошных рубках на последующее возобновление и рост молодняка // Лесное хозяйство. 1991. № 3. С. 27–28.

Стратегия развития лесопромышленного комплекса Республики Саха (Якутия) на 2020–2024 годы: Распоряжение Правительства Республики Саха (Якутия) от 27.03.2020 г. № 296-р, 2020. 29 с.

Чемшикова Ю.М. Снижение отрицательного воздействия гусеничных вездеходов для лесного хозяйства и лесозаготовок на лесные почвогрунты : дисс. ... канд. техн. наук. Ухта, 2019. 153 с.

Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Жукова А.И., Иванов В.А. / Исследование механических процессов циклического уплотнения почвогрунта при динамических нагрузках // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2008. № 1. С. 163–175.

Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Рудов С.Е., Жукова А.И. / Модель процесса циклического уплотнения грунта в полосах, прилегающих к трелевочному волоку // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2010. № 2 (41). С. 8–14.

Яковлев Г.В., Увакин М.И. Влияние лесозаготовительной техники на водно-физические свойства почвы // Лесное хозяйство. 1985. № 1. С. 33–34.

## References

Andreeva V.V., Maksimov G.T., Spektor V.V. et al. Temperature regime of perennially frozen rocks in the post-pyrogenic areas of the North of the Kolyma Lowland. *Advances in current natural sciences*, 2021, no. 8, pp. 29–40. (In Russ.)

Anisimov O.A., Anokhin Y.A., Lavrov S.A., et al. Continental Permafrost. *Methods of Assessment of Climate Change Consequences for Physical and Biological Systems*. M.: Institute of Global Climate and Ecology, 2012, pp. 301–359. (In Russ.)

Bobzhov V.E., Kalistratov A.V., Stepanischeva M.V. Investigation of forest soil deformation modulus in pine stands taking into account the action of boko roots. *Systems. Methods. Tekhnologii*, 2014, no. 2 (22), pp. 187–190. (In Russ.)

Bondarev A.G., Sapozhnikov P.M., Utkaev V.F. et al. Changes in physical properties and fertility of soils during their compaction by agricultural machinery movers. M.: Collection of scientific works of VIM, vol. 118–1988, pp. 46–57. (In Russ.)

Burmistrova O.N., Chemshikova Y.M. Preservation of soil cover from destruction under the impact of caterpillar movers. *Transportation and transport-technological systems: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference*. Ed. by N.S. Zakharov. Tyumen: Tyumen Industrial University, 2019, pp. 38–41. (In Russ.)

Chemshikova Yu.M. Reduction of the negative impact of tracked all-terrain vehicles for forestry and logging on forest soil : diss. ... Candidate of Technical Sciences. Ukhta, 2019. 153 p. (In Russ.)

Concept for the development of the timber processing industry of the Republic of Sakha (Yakutia) until 2016: Order of the Government of the Republic of Sakha (Yakutia) of 02.07.2012, № 662-р, 2012. 23 p. (In Russ.)

Features of the contact interaction of the skidding system with frozen soil. *Forestry Journal*, 2019, no. 1. 14 c. (In Russ.)

Goncharova O.Yu., Matyshak G.V., Bobrik A.A. et al. / Temperature regimes of northern taiga soils of Western Siberia under conditions of island distribution of permafrost. *Soil Science*, 2015, no. 12, pp. 1462–1473. (In Russ.)

Gray B.C., Zasukin D.P., Vyalykh P.Ts. / Influence of soil disturbances during clear-cutting on subsequent regeneration and growth of young trees. *Forestry*, 1991, no. 3, pp. 27–28. (In Russ.)

Grigoriev I.V., Nikiforova A.I., Pelymskiy A.A., Khitrov E.G., Khakhina A.M. Experimental determination of stress relaxation time of forest soil. *Scientific notes of Petrozavodsk State University*, 2013, no. 8 (137). pp. 77–80. (In Russ.)

Grigoriev I.V., Tikhonov I.I., Grigorieva O.I., et al. / Search for new technical solutions to improve the ecological compatibility of forest machines with the forest environment. *Intensification of formation and protection of intellectual property: materials of the republican scientific-practical conference devoted to the 75th anniversary of Petrozavodsk State University*. Petrozavodsk State University, 2015. pp. 9–11. (In Russ.)

Kalistratov A.V., Grigoryeva O.I., Grigoryev G.V., et al. / On the importance of research into the ecological efficiency of the skidding process. *Science, education, innovation in the border region: materials of the republican scientific-practical conference*. Petrozavodsk State University, 2015, pp. 7–9. (In Russ.)

Kalyashov V.A., Shapiro V.Y., Grigoriev I.V. et al. Study of stability of thawing soil massif during its dynamic interaction with a wheeled forest machine on slopes. *Resources and Technology*, 2022, vol. 19, no. 1, pp. 129–148. (In Russ.)

Korobov V.V. Multi-operational machines and environment. *Forest industry*, 1993, no. 5, pp. 13–14. (In Russ.)

Nemtsov V.P. Development of machine technology of logging in Russia. *Forest Industry*, 1993, no. 5, pp. 12–13. (In Russ.)

Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigoriev I.V., Kunitskaya O.A., Grigorieva O.I. Features of contact interaction of skidding system with frozen soil. *Izvestiya vysshee obrazovaniya vysshee obrazovaniya. IVUZ. Forestry journal*, 2019, no. 1 (367), pp. 106–119. (In Russ.)

Savvinov D.D. Hydrothermal regime of soils in the zone of permafrost. Institute of Biology Yakutsk Branch of the Siberian Branch of the Academy of Sciences of the USSR. Novosibirsk 1976, pp. 4–15. (In Russ.)

Shapiro V.Ya., Grigoriev I.V., Rudov S.E., Zhukova A.I. / Model of the process of cyclic soil compaction in the strips adjacent to the skidding drag. *Bulletin of Krasnoyarsk State Agrarian University*, 2010, no. 2 (41), pp. 8–14. (In Russ.)



Shapiro V.Ya., Grigoriev I.V., Zhukova A.I., Ivanov V.A. / Investigation of me-mechanical processes of cyclic soil compaction under dynamic loads. *Bulletin of Krasnoyarsk State Agrarian University*, 2008, no. 1, pp. 163–175. (In Russ.)

Strategy for the development of the timber industry complex of the Republic of Sakha (Yakutia) for 2020-2024: Order of the Government of the Republic of Sakha (Yakutia) of 27.03.2020, no. 296-r, 2020. 29 p. (In Russ.)

Vinogorov G.K. Some forest exploitation characteristics of soil-soil conditions and reliefs. *Voprosy tekhnologii i mekhanizatsii lesoschichnykh raboty*: Collected scientific works of the Central Research Institute of Forestry. Khimki, 1972, no. 123, pp. 3–9. (In Russ.)

Yakovlev G.V., Uvakin M.I. / Influence of logging equipment on water-physical properties of soil. *Forestry*, 1985, no. 1, pp. 33–34. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 29.11.2023

---

**Новиков М.С., Куницкая О.А., Григорьев И.В.** Практическое исследование динамики температур слоев лесного почвогрунта криолитозоны // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 250. С. 303–317. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.303-317

Установление принципов воздействия температуры слоев лесного почвогрунта криолитозоны на их физико-механические свойства обеспечивают производить более точные оценки данных результатов взаимосвязи лесных машин с почвогрунтами. В статье представлены методика, приборы и данные, полученные при температурных исследованиях температуры мерзлотного почвогрунта. Уменьшению неблагоприятного влияния колесной системы лесовозных машин на почвогрунты лесосек посвящено очень большое количество теоретических и практических разработок, отечественных и зарубежных авторов. Целесообразно указать огромный вклад в эти теоретические и практические разработки научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства». В рамках данной научной школы только за последние годы защищено более десяти кандидатских и докторских диссертаций по научной специальности 05.21.01, посвященных вопросам снижения экологического ущерба при проведении рубок леса и, прежде всего, уменьшению неблагоприятного воздействия на почвогрунты лесосек. Однако слабым местом данной теории является отсутствие учета изменения теплового режима мерзлотного почвогрунта, который, по определению, является многослойной системой.

**Ключевые слова:** мерзлотные почвогрунты, лесные машины, лесозаготовки, уплотнение почвогрунтов, экспериментальные исследования.

**Novikov M.S., Kunitskaya O.A., Grigoriev I.V.** Practical study of the temperature dynamics of the layers of the forest soil of the cryolithozone. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2024, iss. 250, pp. 303–317 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.303-317

Cryolithozone forests belong to especially ecologically vulnerable forests. During logging operations, skidding operations have the greatest negative impact on the forest ecosystem. The most negative factor of skidding during the logging season is overconsolidation and destruction of forest soil structure on the skidding shafts and technological corridors. Intensive rutting leads not only to critical damage to the forest ecosystem, but also significantly reduces the efficiency of forest machines. At frosts of more than  $-40^{\circ}\text{C}$  forest machines cannot work due to frost brittleness of metal construction. Therefore, a significant volume of harvesting falls precisely on the moderately warm period of the year. Establishing the principles of the impact of the temperature of forest soil layers of the cryolithozone on their physical and mechanical properties provides more accurate assessments of these results of the relationship between forest machines and soil. The article presents the methodology, devices and data obtained in full-scale experimental studies to determine the influence of permafrost soil temperature. Reducing the unfavorable impact of forest machine drivers on the soil of harvesting areas is devoted to a very large number of theoretical and practical developments of domestic and foreign authors. It is expedient to point out a huge contribution to these theoretical and practical developments, which was made by the participants of the leading domestic sectoral scientific school «Innovative developments in the field of logging industry and forestry». Within the framework of this scientific school only for the last years more than ten candidate and doctoral dissertations on scientific specialty 05.21.01 «Technology and machines of logging and forestry», devoted to the issues of reducing environmental damage during logging, and, above all, to reducing the negative impact of forest machine drivers on the soil of harvesting areas, have been defended. However, the weak point of this theory is the lack of consideration of changes in the thermal regime of permafrost soil, which, by definition, is a multilayer system. Without taking into account the thermal regime of soil layers, the theoretical methods of assessing and predicting the impact of forest machine drivers on it are not accurate enough.

**Keywords:** permafrost soils, forest machines, logging, soil compaction, experimental studies.

---

**НОВИКОВ Марат Семенович** – аспирант кафедры «Технологии и оборудование лесного комплекса» Арктического государственного агротехнологического университета. SPIN-код: 9560-8877. ORCID: 0009-0002-2899-0977.

677007, Сергеляхское ш., 3-й км, д. 3, г. Якутск, Россия. E-mail: 715888@bk.ru

**NOVIKOV Marat S.** – PhD student of the Department of Technology and Equipment of the Forest Complex of the Arctic State Agrotechnological University. SPIN-code: 9560-8877. ORCID: 0009-0002-2899-0977.

677007. Sergelyakhskoe sh. 3rd km 3. Yakutsk. Russia. E-mail: 715888@bk.ru

**ГРИГОРЬЕВ Игорь Владиславович** – профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» Арктического государственного агротехнологического университета, доктор технических наук.

677007, Сергеляхское ш., 3-й 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. 3rd 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, Сергеляхское ш., 3-й 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. 3rd km 3. Yakutsk. Russia. E-mail: ola.ola07@mail.ru

**Е.Г. Хитров, А.В. Андронов, А.С. Сухов, В.С. Никонов,  
С.С. Петросян, В.Е. Божбов**

## **ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБОСОБЛЕННЫХ ПРЕПЯТСТВИЙ НА ГРУНТОВЫХ ЛЕСНЫХ ДОРОГАХ**

*Введение.* Методы технического и компьютерного зрения (Computer Vision, CV) активно развиваются и находят все более широкое применение в различных гражданских областях промышленности. Инструменты CV используются в дефектоскопии и при определении качества продукции, такой как конструкционные материалы и изделия из древесины, предназначенной для деревянного домостроения и мебельного производства [Wang, Li et al., 2023; Wang, Liang et al., 2023; Wang et al., 2024; Han et al., 2023]. Возможное применение CV в лесоперерабатывающем комплексе и лесном хозяйстве не ограничивается лишь вопросами деревопереработки. Например, известны исследования [Shevtekar, 2024; Mohan Prakash&Sriharipriya, 2022], посвященные автоматическому распознаванию дефектов дорожных покрытий. Такие решения потенциально могут, после доработки, использоваться для повышения профильной проходимости и безопасности движения лесных и лесотранспортных машин за счет оперативного распознавания обособленных препятствий в виде корней, пней, кочек, ям и проч., встречающихся на пути лесной техники.

Современные модели CV распространяются с открытым исходным кодом [YOLOv8 Docs, 2024], со свободной лицензией для использования в научных целях, что является положительным моментом с точки зрения исследований и, далее, практики. С другой стороны, модели отличаются большим числом параметров (весов, рис. 1 по [YOLOv8 Docs, 2024]), а процесс их подбора (обучения моделей) [YOLOv8 Docs, 2024] и настройки для решения конкретной производственной задачи связан с ресурсоемкими компьютерными и вычислительными экспериментами [Hutter et al., 2019]. Результат эксперимента во многом определяется выбором стека методов эксперимента и гиперпараметров процесса обучения, а также качеством исходных данных.

К настоящему времени не представлено систематизированных результатов по использованию инструментов CV для выявления обособленных

препятствий на лесных дорогах, также не изложена методика эксперимента в указанной области.

*Цель работы:* апробация методики эксперимента и изучение возможностей инструментов компьютерного зрения для распознавания обособленных препятствий на лесных грунтовых дорогах.

*Материалы и методы исследования.* Для апробации методики эксперимента, ввиду ограниченного объема данных, на настоящем этапе исследований использован метод «zero-shot learning». Метод предполагает тестирование предобученной модели на данных из непосредственно предметной области [Hutter et al., 2019].

Эксперименты в работе проведены для различных версий предобученной искусственной нейронной сети (ИНС) YOLO: YOLOv8n.pt, YOLOv8s.pt, YOLOv8m.pt, YOLOv8l.pt. На рис. 1 для справки к последующим разработкам приведены сведения поставщика [YOLOv8 Docs, 2024] о числе весов различных моделей ИНС, включая версии 9-го и 10-го поколения.

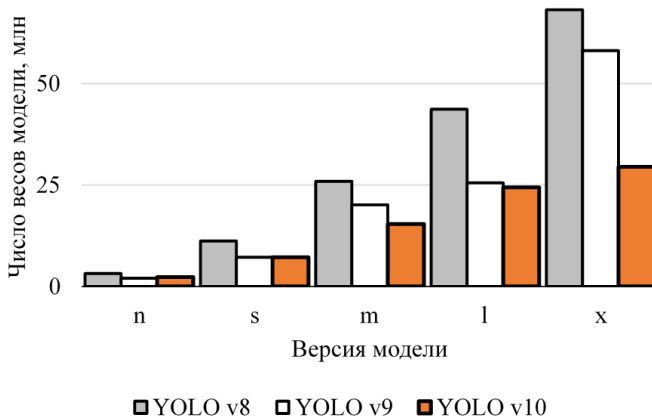


Рис. 1. Число весов различных версий ИНС YOLO  
Fig. 1. Various versions of YOLO ANN weights amount

Для повышения качества работы модели ИНС были дообучены на выборке данных [RDD2022 Dataset], содержащей цифровые снимки дефектов асфальтированных дорог. Снимки сопровождаются аннотациями с указанием областей, в которых экспертным путем выявлены дефекты дорожного покрытия. Обучающая выборка содержит 6962 снимка с разрешением 640×640 pcs. Выборка снимков, использованная при валидации моделей в

процессе дообучения, состоит из 271 аннотированного изображения. Для тестирования моделей использованы материалы, собранные авторами работы самостоятельно в полевых условиях.

Вычисления в процессе дообучения моделей и их тестирования проведены на стенде с параметрами, указанными в табл. 1. Программная часть подготовлена на языке Python, фреймворк Pytorch.

Таблица 1

Сведения об аппаратной и программной части экспериментального стенда  
Experimental hardware and software setup

Наименование	Характеристика
Центральный процессор	Intel Core i7-12700KF 3,60 GHz
Графический процессор	NVIDIA GeForce RTX 4060 Ti 16 ГБ
Оперативная память	32 ГБ DDR4 3200 МГц
Жесткий диск	1 ТБ SSD NVMe
Материнская плата	ASUS ROG Strix Z590-E
Операционная система	Windows 10 22H2
Версия Python	3.11.7
Версия CUDA	11.1
Версия PyTorch	2.3.1

Для эксперимента использованы следующие гиперпараметры процесса дообучения: снимки масштабированы до разрешения 1280×1280 pcs (параметр `imgsz = 1280`), численный метод оптимизации при подборе весов моделей – Adam (`optimizer = Adam`), шаг численного метода 0,00001 (`lr0 = 0.00001`) с последующим уменьшением в 100 раз на завершающих итерациях процесса дообучения (`lrf = 0.01`), число эпох обучения модели (связано с числом итераций при реализации численной оптимизации весов) 100 (`epoch = 100`). Прочие гиперпараметры приняты по умолчанию в соответствии с документацией [YOLOv8 Docs, 2024].

В качестве оценок результативности дообучения моделей использованы стандартные метрики, связанные с функциями потерь при сегментации дефектов (`box_loss`) и классификации (`cls_loss`), точности (`precision, P`), полноты (`recall, R`) и усредненного значения точности (`mean average precision, mAP`). При тестировании моделей программными средствами поставщика измерено среднее время сегментации и классификации дефекта (`inference`) и выполнена экспертная оценка качества работы моделей на авторских данных.

*Результаты исследования.* На рис. 2 показана динамика функций потерь `box_loss` и `cls_loss` по мере дообучения моделей ИНС. Обратим внимание, что на завершающих эпохах дообучения ( $\text{epoch} \geq 90$ ) для версий YOLOv8s, YOLOv8m, YOLOv8l не отмечается существенного изменения функций потерь, несмотря на уменьшение шага метода численной оптимизации ( $\text{lr} = \text{lrf} \cdot \text{lr0} = 0,01 \cdot \text{lr0}$ ); для модели YOLOv8n отмечается некоторое увеличение значений функций.

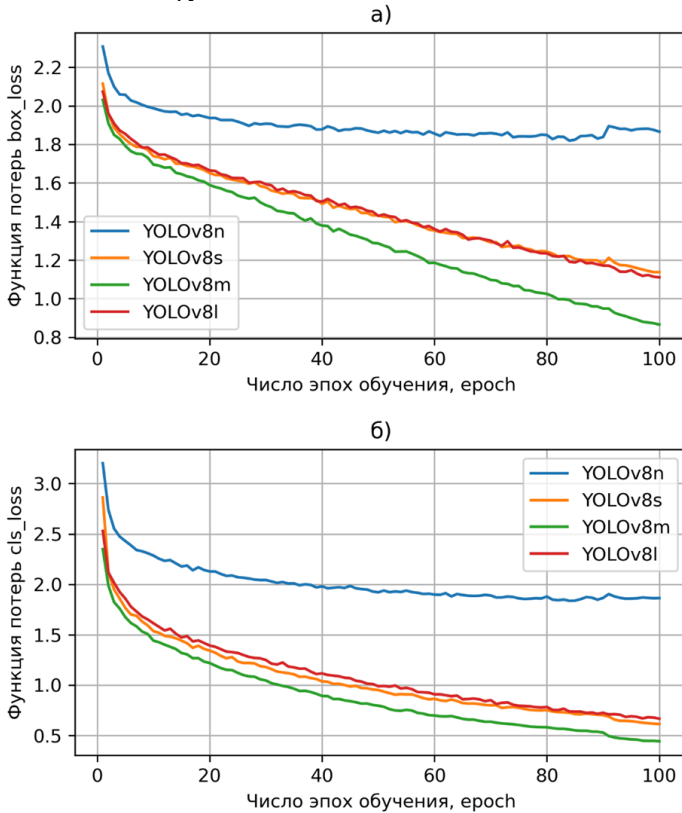


Рис. 2. Метрики качества определения области (а) и классификации (б) дефекта при дообучении моделей

Fig. 2. Segmentation (a) and classification (b) metrics scored during the models training

Экспериментальные данные, таким образом, показывают, что гиперпараметры скорости обучения `lr0`, `lrf` для метода Adam в данном случае подобраны рационально, дальнейшее уменьшение шага метода едва ли целе-

сообразно. Обратим внимание, что за выполненное число итераций лучшие результаты показала модель YOLOv8m.pt с числом весов меньшим, чем у версии YOLOv8l.pt (см. рис. 1); при этом функция потерь `box_loss`, связанная с качеством сегментации дефектов, убывает с большей скоростью, что видно по наклону условной линии тренда на рис. 2,а). Версия YOLOv8n.pt, с наименьшим числом весов среди рассмотренных моделей, отличается заметно худшими показателями.

На рис. 3 приведены результаты измерения метрик точности P и полноты R определения дефектов при обработке изображений из валидационной выборки данных.

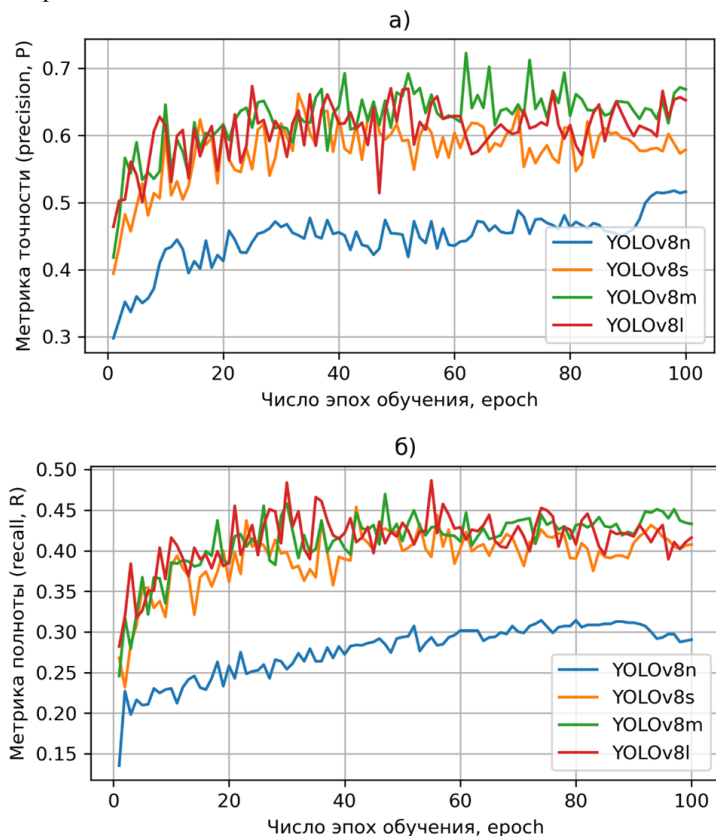


Рис. 3. Метрики точности (а) и полноты (б) распознавания дефектов при дообучении моделей

Fig. 3. Precision (a) and recall (b) metrics scored during the models training



Как и в случае с функциями потерь, в исследуемой задаче версия YOLOv8n.pt справляется с распознаванием дефектов дорожного покрытия хуже прочих рассмотренных. Версии ИНС YOLOv8s.pt, YOLOv8m.pt и YOLOv8l.pt показывают близкие друг к другу результаты, для версии YOLOv8m.pt можем отметить чуть более высокие оценки полноты и точности.

Результаты оценки моделей при валидации приведены на рис. 4.

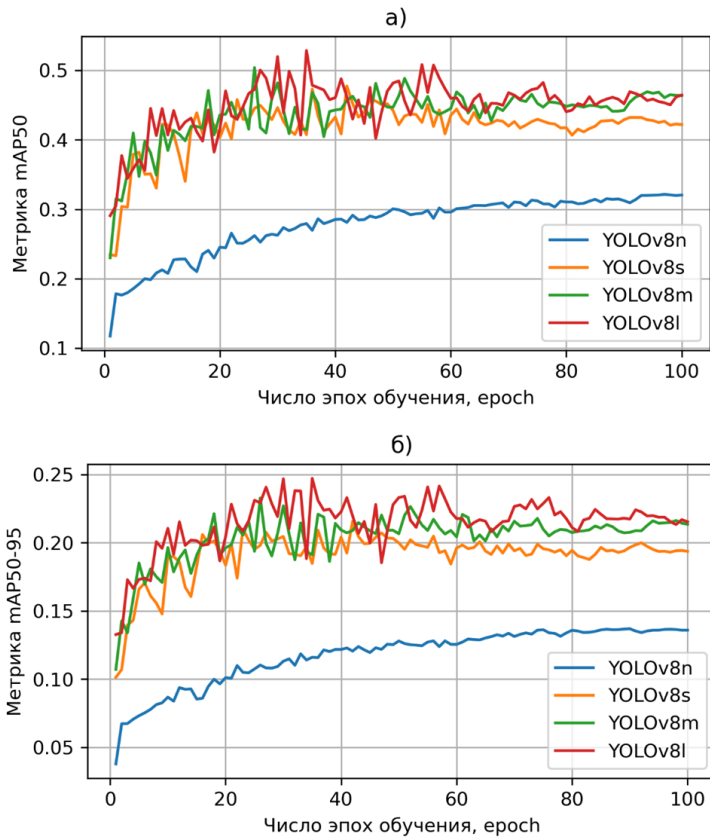


Рис. 4. Метрики усредненной точности mAP50 (а) и mAP50-95 (б) распознавания дефектов при валидации дообученных моделей

Fig. 4. Mean average precision mAP50 (a) and mAP50-95 (b) metrics scored during the models validation

В целом, тенденции, отмеченные при оценке моделей по мере дообучения на тренировочной выборке, сохраняются; несколько лучшие результаты достигаются моделью YOLOv8l.pt.

Функции потерь `box_loss` и `cls_loss` для рассматриваемых моделей при валидации приведены в виде графиков на рис. 5.

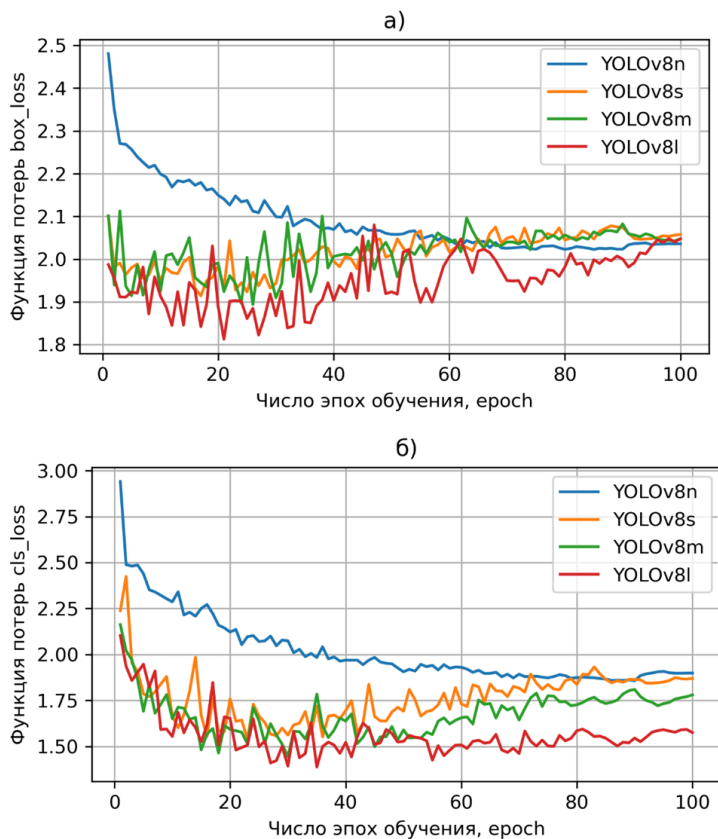


Рис. 5. Метрики качества определения области (а) и классификации (б) дефекта при валидации дообученных моделей

Fig. 5. Precision (a) and recall (b) metrics scored during the models validation

Можем заметить, что для модели YOLOv8n.pt отмечается стабильное снижение значений функций `box_loss` и `cls_loss`, а для модели YOLOv8l.pt при валидации, практически с самого начала дообучения, значения функ-

ций изменяются в сравнительно узком диапазоне. Таким образом, для двух указанных моделей не выявлено явления переобучения [Hutter et al., 2019] и значение гиперпараметра-регуляризатора `weight_decay` = 0.0005, принятое по умолчанию, не нуждается в корректировке. Для моделей YOLOv8s.pt и YOLOv8m.pt можем отметить некоторое увеличение функций `box_loss`, `cls_loss` при числе эпох `epoch`  $\geq 50$ , что, возможно, указывает на переобучение моделей; вопрос о настройке параметра регуляризации является предметом дальнейших исследований.

В табл. 2 приведены результаты оценки качества работы моделей, полученные при обработке изображений из всего набора данных (6976 + 271 изображение).

Таблица 2

**Оценка моделей при обработке набора данных**

**Models performance during data set processing**

Модель	P	R	mAP50	mAP50-95	Время обработки одного дефекта на снимке, мс
YOLOv8n	0,616	0,486	0,538	0,258	6,9
YOLOv8s	0,932	0,871	0,937	0,664	25,4
YOLOv8m	0,963	0,911	0,964	0,763	34,8
YOLOv8l	0,965	0,907	0,962	0,779	55,3

Проведенный эксперимент с набором данных [RDD2022 Dataset] показал, что модели ИНС YOLOv8.pt позволяют получить метрики качества распознавания выше либо сопоставимые с результатами, полученными в [Shevtekar, 2024; Mohan Prakash&Sriharipriya, 2022] при обучении моделей YOLO с использованием набора данных [Pothole Dataset], существенно меньшего по объему (400 снимков). Это обстоятельство показывает, что подготовленный экспериментальный стенд позволяет получать стабильные результаты и косвенно свидетельствует в пользу предположения, что модели YOLOv8.pt, дообученные с использованием [RDD2022 Dataset], результативны при сегментации и классификации дефектов дорог при тестировании.

Важно учесть скорость обработки дефектов, представленных на снимках: для моделей YOLOv8s и YOLOv8m оно составляет в среднем соответственно 25,4 и 34,8 мс для одного дефекта. Поскольку существенных различий в качестве работы моделей YOLOv8s.pt, YOLOv8m.pt, YOLOv8l.pt в эксперименте установлено не было, на настоящем этапе исследований мо-

жем рекомендовать модель ИНС YOLOv8m.pt в качестве перспективной версии для разработки технического решения по распознаванию одиночных препятствий на лесных дорогах; при этом следует дополнительно рассмотреть вопрос регуляризации весов модели (рис. 5).

В табл. 3 приведены результаты оценки моделей при тестировании, претендующие, на настоящем этапе, лишь на справочный характер ввиду ограниченного объема тестовой выборки данных (327 снимков грунтовых лесных дорог с 791 дефектом в виде ям).

Таблица 3

Результаты тестирования моделей

Results of YOLOv8m.pt model testing

Модель	P	R	mAP50	mAP50-95	Время обработки одного дефекта на снимке, мс
YOLOv8n	0,599	0,865	0,377	0,174	1,1
YOLOv8s	0,665	0,450	0,502	0,277	12,9
YOLOv8m	0,720	0,490	0,543	0,304	28,2
YOLOv8l	0,636	0,481	0,527	0,304	95,3

В целом, результаты тестирования подтверждают наши предварительные выводы о перспективности версии YOLOv8m.pt в качестве основы технического решения для определения обособленных препятствий, встречающихся на лесных дорогах. Дообученная модель способна определять обособленные препятствия в виде ям на лесных и грунтовых дорогах с приемлемой точностью. Пример результатов распознавания приведен на рис. 6.



Рис. 6. Пример распознавания препятствий в виде ям (YOLOv8m.pt)

Fig. 6. Obstacles recognition example (YOLOv8m.pt)

Выполненная нами экспертная оценка качества работы модели при тестирования повторяет предположения, сделанные выше. Дальнейшие разработки должны быть направлены на настройку модели и ее дообучение с использованием большего количества данных по обособленным препятствиям, встречающимся на лесных дорогах.

*Заключение.* В исследовании выполнена апробация методики эксперимента по изучению возможностей инструментов компьютерного зрения для последующего распознавания обособленных препятствий на лесных грунтовых дорогах. Установлено, что выбранные гиперпараметры процесса дообучения моделей ИНС YOLOv8n.pt, YOLOv8s.pt, YOLOv8m.pt, YOLOv8l.pt на большом наборе данных [RDD2022 Dataset] и стенд позволяют получать стабильные экспериментальные сведения по распознаванию и классификации дефектов дорог. Численный метод оптимизации Adam при дообучении с шагом минимизации 0,00001 целесообразно использовать и в дальнейшем.

В целом, тестирование и экспертная оценка результатов подтверждают предварительные выводы о перспективности версии YOLOv8m.pt в качестве основы технического решения для определения обособленных препятствий, встречающихся на лесных дорогах.

Таким образом, на настоящем этапе исследований в качестве перспективной версии для разработки технического решения по распознаванию одиночных препятствий на лесных дорогах рекомендуется модель ИНС YOLOv8m.pt (табл. 2 и 3); при этом следует дополнительно рассмотреть вопрос регуляризации весов модели (см. рис. 5).

Кроме того, в качестве направления дальнейших разработок отметим эксперименты с моделями ИНС YOLO v9, v10 для составления более полного и систематизированного научного представления о применимости моделей ИНС-трансформеров для определения обособленных препятствий на лесных дорогах. Полученные результаты, полагаем, будут способствовать накоплению научных сведений о современных моделях компьютерного зрения и машинного обучения, которые, на настоящем этапе развития области знания, рассматриваются как «черные ящики» [Hutter et al., 2019; Latour, 1987]

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

### **Библиографический список**

Han S., Jiang X., Wu Z. An Improved YOLOv5 Algorithm for Wood Defect Detection Based on Attention // IEEE Access. 2023. Vol. 11. P. 71800–71810. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:259721127> (дата обращения: 10.08.2024).

Hutter F., Kotthoff L., Vanschoren J. (editors). Automated Machine Learning: Methods, Systems, Challenges. Springer, 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-05318-5.

Latour B. Science in Action: How to Follow Scientists and Engineers through Society. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1987.

Mohan Prakash B., Sriharipriya K.C. Enhanced pothole detection system using YOLOX algorithm // Auton. Intell. Syst. 2022. 2. 22. URL: <https://doi.org/10.1007/s43684-022-00037-z>

Pothole Dataset: Project on Realtime Potholes Detection. URL: <https://public.roboflow.com/object-detection/pothole> (дата обращения: 10.08.2024).

RDD2022 Dataset: The Multi-National Road Damage Dataset 2022. URL: <https://datasetninja.com/road-damage-detector> (дата обращения: 10.08.2024).

Shevtekar S. Enhanced Pothole Detection Using YOLOv8 Nano // International Scientific Journal of Engineering and Management. 2024. 03. P. 1–9. 10.55041/ISJEM01632. 2024

Wang M., Li M., Cui W., Xiang X., Duo H. TSW-YOLO-v8n: Optimization of detection algorithms for surface defects on sawn timber // BioResources. 2023. Vol. 18, no. 4. P. 8444–8457.

Wang R., Chen Y., Liang F., Wang B., Mou X., Zhang G. BPN-YOLO: A Novel Method for Wood Defect Detection Based on YOLOv7 // Forests. 2024. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:270753559> (дата обращения: 10.08.2024).

Wang R., Liang F., Wang B., Mou X. ODCA-YOLO: An Omni-Dynamic Convolution Coordinate Attention-Based YOLO for Wood Defect Detection // Forests. 2023. T. 14, no. 9. 1885 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14091885>.

YOLOv8 Docs: Ultralytics YOLO Docs. URL: <https://docs.ultralytics.com> (дата обращения: 10.08.2024).

## References

Han S., Jiang X., Wu Z. An Improved YOLOv5 Algorithm for Wood Defect Detection Based on Attention. *IEEE Access*, 2023, vol. 11, pp. 71800–71810. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:259721127> (accessed August 10, 2024).

Hutter F., Kotthoff L., Vanschoren J. (editors). Automated Machine Learning: Methods, Systems, Challenges. Springer, 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-05318-5.

Latour B. Science in Action: How to Follow Scientists and Engineers through Society. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1987.

Mohan Prakash B., Sriharipriya K.C. Enhanced pothole detection system using YOLOX algorithm. *Auton. Intell. Syst.*, 2022, 2, 22. URL: <https://doi.org/10.1007/s43684-022-00037-z>

Pothole Dataset: Project on Realtime Potholes Detection. URL: <https://public.roboflow.com/object-detection/pothole> (accessed August 10, 2024).

RDD2022 Dataset: The Multi-National Road Damage Dataset 2022. URL: <https://datasetninja.com/road-damage-detector> (accessed August 08, 2024).

Shevtekar S. Enhanced Pothole Detection Using YOLOv8 Nano. *International Scientific Journal of Engineering and Management*, 2024, 03, pp. 1–9. 10.55041/ISJEM01632. 2024

Wang M., Li M., Cui W., Xiang X., Duo H. TSW-YOLO-v8n: Optimization of detection algorithms for surface defects on sawn timber. *BioResources*, 2023, vol. 18, no. 4, pp. 8444–8457.

Wang R., Chen Y., Liang F., Wang B., Mou X., Zhang G. BPN-YOLO: A Novel Method for Wood Defect Detection Based on YOLOv7. *Forests*. 2024. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:270753559> (access August 08, 2024).

Wang R., Liang F., Wang B., Mou X. ODCA-YOLO: An Omni-Dynamic Convolution Coordinate Attention-Based YOLO for Wood Defect Detection. *Forests*, 2023, vol. 14, no. 9, 1885 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/fl4091885>.

YOLOv8 Docs: Ultralytics YOLO Docs. URL: <https://docs.ultralytics.com> (accessed August 08, 2024).

Материал поступил в редакцию 15.06.2024

---

**Хитров Е.Г., Андронов А.В., Сухов А.С., Никонов В.С., Петросян С.С., Божбов В.Е.** Изучение возможностей компьютерного зрения для определения обособленных препятствий на грунтовых лесных дорогах // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 250. С. 318–332. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.318-332

Методы технического и компьютерного зрения активно развиваются и находят все более широкое применение в различных гражданских областях промышленности. Инструменты CV могут потенциально использоваться для повышения профильной проходимости и безопасности движения лесных и лесотранспортных машин за счет оперативного распознавания обособленных препятствий в виде корней, пней, кочек, ям и проч., встречающихся на пути лесной техники. В исследовании выполнена апробация методики эксперимента по изучению возможностей инструментов компьютерного зрения для распознавания обособленных препятствий на лесных грунтовых дорогах. Эксперименты в работе проведены для различных версий искусственной нейронной сети YOLO (YOLOv8n.pt, YOLOv8s.pt, YOLOv8m.pt, YOLOv8l.pt), дообученной на большом наборе данных Road Damage Detection 2022. Установлено, что экспериментальный стенд, включающий программную и аппаратную часть, а также подобранные гиперпараметры процесса обучения моделей позволяют получать стабильные экспериментальные сведения по распознаванию и классификации дефектов дорог, включая грунтовые и лесные. Результаты оценки моделей YOLO при дообучении и валидации показали, что в качестве перспективной версии для разработки технического решения по распознаванию одиночных препятствий на лесных дорогах можно рекомендовать модель ИНС YOLOv8m.pt; при этом следует дополнительно

рассмотреть вопрос регуляризации весов модели. Тестирование и экспертная оценка результатов подтвердили предварительные выводы о перспективности версии YOLOv8m.pt в качестве основы технического решения для определения обособленных препятствий, встречающихся на лесных дорогах. Отмечена целесообразность использования численного метода оптимизации Adam с шагом минимизации 0,00001 в дальнейших исследованиях, связанных с экспериментами с моделями искусственной нейронной сети YOLOv9, YOLOv9v10 для составления более полного и систематизированного научного представления о применимости моделей компьютерного зрения для определения обособленных препятствий на лесных дорогах.

**Ключевые слова:** профильная проходимость, движение лесных машин, zero-shot learning, сегментация, классификация.

**Khitrov E.G., Andronov A.V., Sukhov A.S., Nikonov V.S., Petrosyan S.S., Bozhbov V.E.** Study of computer vision methods for identifying obstacles on forest roads. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2024, iss. 250, pp. 318–332 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.318-332

Methods of technical and computer vision are developing and being increasingly used in various civil industries. Computer vision tools may be used to improve passability and traffic safety of forest machinery by promptly recognizing isolated obstacles in the form of roots, stumps, hummocks, potholes, etc. The study tested methodology of an experiment to study capabilities of computer vision tools for recognizing isolated obstacles on forest roads. The experiments in were carried out for various versions of the YOLO artificial neural network (YOLOv8n.pt, YOLOv8s.pt, YOLOv8m.pt, YOLOv8l.pt), retrained on a large dataset of Road Damage Detection 2022. It was found that the experimental setup, including software and hardware, as well as the selected hyperparameters of the model training process, make it possible to obtain stable experimental data on the recognition and classification of road defects, including forest ones. The results of scoring the YOLO models during retraining and validation showed that the YOLOv8m.pt artificial neural network model should be recommended as a promising version for developing a technical solution for recognizing single obstacles on forest roads; however, the issue of regularizing the model weights should be additionally considered. Testing and expert evaluation of the results confirmed the preliminary conclusions about the promise of the YOLOv8m.pt version as basis for the technical solution. The expediency of using the numerical optimization method Adam with a minimization step of 0.00001 in further studies related to experiments with the models of the artificial neural network YOLOv9, YOLOv9v10 is noted for the purpose of compiling a more complete and systematic scientific understanding of the applicability of computer vision models for identifying isolated obstacles on forest roads.

**Keywords:** profile passability, forest machinery locomotion, zero-shot learning, segmentation, classification.



**ХИТРОВ Егор Германович** – доцент высшей школы программной инженерии Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, доктор технических наук. SPIN-код: 4663-5944, ORCID: 0000-0003-4569-9508.

195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: hitrov\_eg@spbstu.ru

**KHITROV Egor G.** – DSc (Technical), Associate Professor of the Higher School of Software Engineering of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Associate Professor. SPIN-code: 4663-5944, ORCID: 0000-0003-4569-9508.

195251. Politehnicheskaya str. 29. St. Petersburg. Russia. E-mail: hitrov\_eg@spbstu.ru

**АНДРОНОВ Александр Вячеславович** – доцент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук, доцент. SPIN-код: 8345-3722, ORCID: 0000-0002-1035-9231.

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

**ANDRONOV Aleksandr V.** – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Forestry Machinery, Service and Repair of St. Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 8345-3722, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1035-9231>.

194021. Institutsky per. 5U. St. Petersburg. Russia. E-mail: andronovalexandr@gmail.com

**СУХОВ Артем Сергеевич** – магистрант научно-образовательного центра математики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО». ORCID: 0009-0002-2674-3884.

197101, Кронверкский пр., д. 49, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: sukhovtema@gmail.com

**SUKHOV Artem S.** – Master's student of the Scientific and Educational Center of Mathematics of the National Research University ITMO. ORCID: 0009-0002-2674-3884.

197101. Kronverkskii av. 49. St. Petersburg. Russia. E-mail: sukhovtema@gmail.com

**НИКОНОВ Виталий Сергеевич** – аспирант кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: nikonov99@outlook.com

**NIKONOV Vitaliy S.** – PhD student of the Department of Forestry Machinery, Service and Repair of the St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institutsky per. 5U. St. Petersburg. Russia. E-mail: nikonov99@outlook.com

**ПЕТРОСЯН Сурен Сергеевич** – аспирант кафедры автоматизации, метрологии и управления в технических системах Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6224-9900>.

194021, Институтский пер., д. 5У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: surik1622@gmail.com

**PETROSYAN Suren S.** – PhD student of the Department of Automation, Metrology and Management in Technical Systems of the St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6224-9900>. 194021,

194021. Institutsky per. 5U. St. Petersburg. Russia. E-mail: surik1622@gmail.com

**БОЖБОВ Владимир Евгеньевич** – доцент кафедры геодезии, землеустройства и кадастров Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук. SPIN-код: 1820-4686, ORCID: 0000-0003-0881-2911

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

**BOZHBOV Vladimir E.** – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Geodesy, Land Management and Cadastre of the St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 1820-4686, ORCID: 0000-0003-0881-2911.

194021. Institutsky per. 5U. St. Petersburg. Russia. E-mail: v-b@mail.ru

### **3. ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ, ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЕРЕВОПЕРЕРАБОТКИ**

---

УДК 674.81

**А.В. Артёмов, Н.Г. Власов, А.С. Ершова, А.В. Вураско, В.Г. Бурындин**

#### **ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ БЕРЕСТЫ В ПРЕСС-СЫРЬЕ НА СВОЙСТВА ПЛАСТИКА БЕЗ СВЯЗУЮЩЕГО НА ОСНОВЕ БЕРЕЗОВЫХ ОПИЛОК**

*Введение.* Процесс изготовления прессованных изделий из древесных частиц без применения связующих агентов имеет длительную историю [Минин, 1965; Солечник и др., 1963; Петри, 1976], оптимизация и усовершенствование технологии их получения продолжается и в настоящее время [Базарнова и др., 1997; Бурындин и др., 2018; Просвириков и др., 2020, Иванов и др., 2021]. Основными преимуществами технологии получения пластиков без связующих (ПБС) является то, что в качестве сырья возможно использование дешевых материалов в виде отходов деревообрабатывающей промышленности, а процесс производства является экологически безопасным.

Для получения ПБС может выступать не только древесное, но и любое лигноцеллюлозосодержащее сырье [Микрюкова и др., 2019; Ершова и др., 2020; Криворотова и др., 2022]. В зависимости от исходного сырья, получаемые пластики обладают различными физико-механическими свойствами, а также способностью к биостойкости и гидрофобности. Такое обстоятельство в первую очередь объясняется различным составом лигнинных соединений исходного пресс-сырья, а именно относительным содержанием G-, S- и H-единиц [Artemov et al., 2023].

В ранее выполненных работах была показана перспективность использования пресс-сырья на основе березы с целью получения ПБС [Базарнова и др., 1997; Бурындин и др., 2020]. Отмечается то, что материалы на основе ПБС, полученные из березовых опилок обладают более высокой водо- и биостойкостью по сравнению с ПБС на основе сосновых опилок [Артёмов и др., 2022]. Однако, как и любой материал на основе лигноцеллюлозосодержащего сырья, ПБС на основе березовых опилок требует решений по повышению показателей водо- и биостойкости.

Одним из вариантов устранения данного недостатка является возможность применения для пресс-материала коры березы, которая в настоящее время не находит полноценного рационального использования на самих фанерных производствах, но при этом обладает рядом ценных свойств [Васильев, 2023].

Выполненные исследования показали, что возможно использование березовой коры в качестве сырья для получения древесностружечных плит [Page et al., 2017], как добавки к биомассе при получении пиллет с целью интенсификации процессов горения [Barmina et al., 2014], либо непосредственно с получением изделий декоративного назначения [Сафина и др., 2023] и пр.

В настоящее время большой интерес проявляется к использованию верхнего слоя коры березы – бересты – в химических технологиях и биотехнологиях. Это обусловлено специфичным химическим составом самой бересты. Химический состав бересты березы как средневзвешенная масса всех гранулометрических фракций составляет: зола – 2,9%, сумма экстрактивных веществ – 17,6% (преобладают гидрофильные экстрактивные вещества), лигнин – 27,9%, гемицеллюлозы – 15,0%, целлюлоза – 22,0%. Углеводный состав коры березы: глюкоза 47,0%, ксилоза 33,8% от суммы нейтральных моносахаридов [Blondeau et al., 2020].

Береста березы содержит разнообразные экстрактивные вещества [Кузнецова и др., 2013]. Особую ценность представляют определенные виды биологических веществ, содержащиеся в коре березы: тритерпены лупанового типа (бетулин, бетулиновая кислота, альдегид бетулина и лупеол), суберин (комплекс липофильного полиэфира, состоящий из длинноцепочечных жирных кислот и глицерина), фенольных соединений, а также более низкие уровни других веществ, таких как углеводороды и их эпоксиды, стероиды, дубильные вещества и флавоноиды [Godiņa et al., 2018].

В настоящее время ведутся исследования по адаптации компонентов березовой коры (субериновые кислоты и экстрактивные вещества на основе бетулина) для их включения в производство фенолформальдегидных смол [Paze et al., 2021], по разработке рецептуры и условий синтеза фенолформальдегидных смол с замещением синтетического фенола лесохимическими фенолами, полученных путем быстрого абляционного пиролиза древесины березы [Valiullina et al., 2022].

Отмечается, что береста березы проявляет антибактериальную, антигрибковую и противовоспалительную активность, обладает гидрофобно-

стью и является антиоксидантом [Jonnalagadda et al., 2017; Scheffler, 2019; Судокова и др., 2023]. Большинство исследователей обосновывают, что данные свойства обусловлены содержанием в коре бетулина и его производных, а также суберина [Hordyjewska et al., 2019; Rizhikovs et al., 2022].

На основании выполненного литературного обзора, можно сделать вывод о том, что использование верхнего слоя коры березы (бересты) совместно с древесным наполнителем при получении ПБС, можно рассматривать как антисептическую и гидрофобизирующую добавку, при этом в условиях пьезотермической обработки данного пресс-сырья, она может выступать дополнительным внутренним источником термореактивного связующего.

*Цель и задачи.* Целью данной работы являлось получение ПБС на основе березовых опилок методом пьезотермической обработки в герметичной пресс-форме с введением в древесный наполнитель добавки в виде бересты березы в различном соотношении с целью повышения физико-механических свойств и показателей водо- и биостойкости.

Задачи данной работы заключались в изучении физико-механических показателей полученных материалов; в оценке стойкости полученных материалов к биодеструкции; в определении рациональной композиции пресс-сырья с возможностью создания материалов с регулируемым сроком эксплуатации.

*Методика исследования.* Объектом исследования были образцы ПБС на основе березовых опилок (отходов деревообработки) с добавлением бересты березы (отходы окорочного производства). Исходное сырье подвергалось дополнительному измельчению и фракционированию на сите с размером пор 0,7 мм. Береста перед измельчением подвергалась механической обработке с целью отделения луба. Исходная влажность полученных компонентов пресс-сырья составляла: опилки – 4,9%, береста – 2,5%. С целью изучения влияния морфологического состояния пресс-сырья были получены их микрофотографии при увеличении  $1 \times 400$  с помощью микроскопа «Микромед».

Для изготовления образцов ПБС, были подготовлены пресс-композиции «опилки / береста» в следующих соотношениях (по массе): №1 – 100 / 0; №2 – 75 / 25; №3 – 50 / 50; №4 – 25 / 75; №5 – 0 / 100. Влажность пресс-сырья композиций принималась 12%.

Изготавливались образцы-диски диаметром 90 мм и толщиной 2 мм методом горячего компрессионного прессования при следующих условиях: давление прессования – 40 МПа, температура прессования – 180 °С,

продолжительность прессования – 10 мин, продолжительность охлаждения под давлением – 10 мин.

По завершению кондиционирования полученных образцов в комнатных условиях (24 ч), они подвергались испытаниям на физико-механические свойства: плотность  $\rho$ , прочность при изгибе  $\sigma_{\text{изг}}$  (ГОСТ 4648-2014), твердость по вдавливанию шарика НВ (ГОСТ 4670-91), модуль упругости при изгибе по прогибу образца-диска  $E_{\text{изг}}$  [Артёмов и др., 2021], водопоглощение  $W$  и разбухание  $L$  (ГОСТ 4650-2014), ударная вязкость  $A$  (DIN 51230-1977).

Оценка гидрофобности ПБС осуществлялась по краевому углу смачивания. Определение краевого угла смачивания  $\Theta$  осуществлялось по методу взвешивания мениска [Мичуров и др., 2023].

Для оценки биостойкости исследуемого материала применялась методика, опирающаяся на ГОСТ Р 57222-2016 «Пластмассы. Методы приготовления образцов для испытания пластмасс на биологическое разложение», включающая следующие этапы:

1. Подготовка образцов с геометрическими размерами  $1,5 \times 1 \times 2$  см. Определение их линейных размеров и массы.

2. Подготовка двух видов почвенной среды: почво-грунт (DIN EN ISO 846:2020-11 «Plastics – Evaluation of the action of microorganisms») и активный грунт (по ГОСТ 9.060-75 «Единая система защиты от коррозии и старения. Ткани. Метод лабораторных испытаний на устойчивость к микробиологическому разрушению»). Достигалась единая влажность почвенных субстратов в 60%.

3. Размещение образцов в контейнеры с почвенной средой таким образом, чтобы они были полностью покрыты. Контейнеры на время испытания находились при температуре окружающей среды  $20 \pm 2$  °C.

4. Наблюдение за состоянием образцов в активном грунте осуществлялись через каждые 7 сут., в почво-грунте – через каждые 30 сут. Для оценки состояния образцы извлекались из почвенной среды, очищались от грунта, осушались в течение суток и подвергались измерениям (масса, линейные размеры).

5. По завершению наблюдений (общее время выдержки в почво-грунте составило 90 сут., в активном-грунте – 105 сут.) определялась степень биологического разложения образцов по изменению их массы и линейных размеров относительно исходных значений.

В соответствии с ГОСТ 9.060-75 оценка активности грунта проводится по коэффициенту биологической активности  $a$ . Коэффициент активности

активного грунта в ходе выполненных испытаний составил 1,02, что входило в диапазон требуемых значений.

Результаты всех испытаний были подвергнуты статистической обработке на выявление грубых промахов и определении интервала доверительной вероятности [Глухих и др., 2023].

*Результаты и обсуждение.* Результаты микрофотографирования исходного пресс-сырья представлены на рис.1. Стоит отметить визуальную и тактильную форму частиц, полученную после измельчения каждого из компонентов: измельченная береста обладала более хрупкой и крупной формой частиц, а измельченные березовые опилки имели волокнистую структуру и в 3-4 раза меньшие размеры частиц, чем у бересты.



Рис. 1. Микрофотографии (1:400) компонентов пресс-сырья:  
а) береста; б) березовые опилки

Fig. 1. Micrographs (1:400) of the components of the press raw materials:  
a) birch bark; b) birch sawdust

Форма частиц может оказывать влияние на прочностные свойства материала. В общем случае, чем меньше размер частиц, тем лучше они контактируют между собой в процессе прессования и тем выше плотность и прочность получаемого пластика. Если частицы крупные и имеют пластинчатую форму (как в данном случае у бересты), то они образуют слоистую структуру, которая уменьшает физико-механические свойства за счет пустот между слоями. В этом случае из такого пресс-сырья будет формироваться спрессованный брикет с соответствующими эксплуатационными свойствами, а не материал на основе ПБС. Результаты испытаний на физико-механические свойства ПБС на основе различных композиций приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Физико-механические свойства ПБС**  
**Physical and mechanical properties of PWR**

Номер композиции	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\sigma_{изг}$ , МПа	$E_{изг}$ , МПа	НВ, МПа	$A$ , кДж/м <sup>2</sup>	W, %	L, %	$\Theta$ , °
1	961	5,0	1620	19	1,833	205	14	65,0
2	913	8,9	1400	15	2,391	102	6	70,0
3	909	8,9	1566	17	3,818	32	7	83,0
4	869	6,9	1952	15	2,894	16	2	83,5
5	794	8,2	992	15	3,219	9	1	86,5
Коэффициент аппроксимации $R^2$	0,917	0,176	0,101	0,500	0,463	0,837	0,849	0,898

На основании табл.1 можно сделать следующие выводы о влиянии содержания бересты в пресс-материале на физико-механические свойства ПБС:

1. Плотность материала. Имеется зависимость от содержания бересты в пресс-композиции на плотность получаемого пластика ( $R^2 = 0,917$ ). При введении добавки в виде фракционированной бересты в древесный наполнитель наблюдается снижение плотности получаемых пластиков. Увеличение содержания количества бересты в пресс-композиции приводит к снижению плотности пластика до 17%. Причиной таких изменений является разница в насыпной плотности самих компонентов пресс-композиций (для древесных опилок она составляла около 220 кг/м<sup>3</sup>, а бересты – 640 кг/м<sup>3</sup>), а также в их различной форме и структуры частиц (см. рис. 1).

2. Прочность при изгибе. Отсутствует зависимость от содержания бересты в пресс-композиции на прочность при изгибе получаемого пластика ( $R^2 = 0,176$ ). При анализе поля корреляции, при содержании бересты в композиции до 50%, прочность при изгибе возрастает на 79% (при этом  $R^2$  составляет 0,75). Далее наблюдается тенденция к снижению данного показателя (на 8%). Это свидетельствует о том, что имеется две области: первая область до 50% содержания бересты в пресс-сырье, при которой возможно формировать пластик с высокой прочностью при изгибе; во второй области с увеличением содержанием бересты более 50% не происходит формирования требуемого материала из-за преобладания в композиции частиц бересты (см. рис. 1).

3. Модуль упругости при изгибе (по прогибу образца-диска). Отсутствует зависимость от содержания бересты в пресс-композиции на модуль упругости при изгибе получаемого пластика ( $R^2 = 0,101$ ). Содержание бересты по различным композициям имеет «синусоидальную» зависимость по



модулю упругости при изгибе. На такое отличие свойств упругости при изгибе данных материалов значительное влияние могла оказать неравномерность распределения компонентов пресс-сырья в процессе прессования. При этой неравномерности структуры пластиков с высоким содержанием бересты (75–100%) наблюдалось расслоение пластика по толщине. Также можно объяснить неоднозначность полученных результатов, выбранной методикой испытаний на модуль упругости при изгибе – по прогибу образца-диска под нагрузкой. Во время испытаний усилие прилагается только в центральную часть образца, в которой, из-за плохой смешиваемости, могло быть сосредоточено различное содержание компонентов, что как следствие и привело к различным значениям изучаемого показателя. Можно утверждать о том, что данная методика не применима для ПБС, полученных из различных частиц комбинированного лигноцеллюлозосодержащего сырья.

4. Твердость по Бринеллю. Отсутствует явная зависимость от содержания бересты в пресс-композиции на твердость пластика ( $R^2 = 0,500$ ). Полученные результаты испытаний имеют практически одинаковые показатели, которые могут быть обоснованы тем, что при изучаемых параметрах давления и температуры прессования происходит одинаковое формирование внешней структуры ПБС, т. е. на структуру лицевой поверхности образцов, на основе изучаемых композиций, оказывает значительное влияние сам процесс пьезотермической обработки.

5. Ударная вязкость. Отсутствует явная зависимость от содержания бересты в пресс-композиции на ударную вязкость материала ( $R^2 = 0,463$ ). При этом аналогично наблюдается две области поведения данного свойства: первая область (до 50% содержания бересты в композиции) – происходит увеличение данного показателя на 108% и  $R^2$  достигает 0,940. И вторая область (более 50% бересты), при которой наблюдается фиксирование данного показателя в достигнутых пределах. Насыщение пресс-сырья частицами бересты и, как следствие, увеличение содержания фракции более крупных частиц приводит к повышению ударной вязкости – более прочные целлюлозные волокна внутри каждой частицы позволяют более эффективно выдерживать ударное воздействие.

6. Водопоглощение по объему за 24 часа. Прослеживается явная зависимость от содержания бересты в пресс-композиции на водопоглощение ПБС ( $R^2 = 0,837$ ). Образцы с наибольшим содержанием в композиции березовых опилок обладают наибольшим показателем водопоглощения. Введение добавки бересты значительно влияет на данный показатель: максимальное снижение (на 96%) достигается для пластиков на основе пресс-композиции с содержанием 100% бересты.

7. Разбухание по толщине за 24 часа. Наблюдается явная зависимость от содержания бересты в пресс-композиции на разбухание по толщине исследуемых образцов ( $R^2 = 0,849$ ). Аналогично снижению показателя водопоглощения, введение добавок бересты в пресс-композицию приводит к снижению значений по разбуханию. При содержании данной добавки в пресс-сырье от 25 до 50% разбухание образцов снижается с 55 до 48% соответственно, дальнейшее увеличение содержания добавки приводит к максимальному снижению до 96%.

8. Краевой угол смачивания. Имеется явная зависимость от содержания бересты в пресс-композиции на показатель краевого угла смачивания ( $R^2 = 0,898$ ). Добавление бересты обладающей гидрофобными свойствами в древесное пресс-сырье приводит к увеличению краевого угла смачивания на 7,7–33,1%. Для образцов на основе только бересты значения краевого угла смачивания достигают 86,5°, что может свидетельствовать о практически полной гидрофобизации лицевой поверхности.

Результаты испытаний на биостойкость по отношению к почво-грунту и активному грунту исследуемых ПБС за 90 сут. представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты испытаний ПБС на биостойкость**

**Results of PWR biostability tests**

Номер компо- зиции	Почво-грунт, 90 сут				Активный грунт, 105 сут			
	Изменение показателя, %							
	масса	ширина	длина	толщина	масса	ширина	длина	толщина
1	–23	+3	+3	–19	–	–	–	–
2	+7	–3	–2	+57	–15	–9	0	–15
3	–5	–3	+2	+43	–	–	–	–
4	+11	–2	+1	0	+15	–2	+4	+8
5	+1	0	–2	+7	+15	–2	+4	+5
Значения «–» означают, что образец был разрушен в ходе испытаний.								

Наличие и воздействие различных микроорганизмов повлияло на ускоренное разрушение ПБС в активном грунте. Так, например, было обнаружено наличие грибков (белой плесени) на поверхности пластиков при выдержке в активном грунте (рис. 2). Активное размножение белой плесени осуществляется преимущественно на деструктирующей органике.





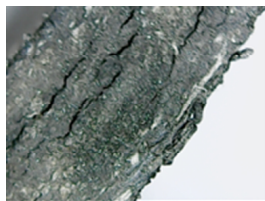
Рис. 2. Микрофотографии ( $1 \times 400$ ) лицевые поверхности образца ПБС после испытаний на биостойкость:  – распространение белой плесени

Fig. 2. Micrographs ( $1 \times 400$ ) of the front surfaces of the PWR sample after biostability tests:  – spread of white mold

Пластики на основе березовых опилок в активном грунте подверглись полной деструкции в первые недели в силу высокой гидрофильности древесного наполнителя и невысоких показателей по водостойкости (см. табл. 1).

Значительной деструкции также были подвержены образцы с содержанием в пресс-сырье до 50% бересты. Основной причиной частичной или полной деструкции таких образцов являлось расслоение – происходил разрыв связей внутри образца (рис. 3). Расслоение материала обуславливалось в первую очередь плохим распределением бересты как компонента в наполнителе и уже последующим гидролитическим воздействием на сам пластик. При этом наблюдалась деструкция большего по гидрофильности компонента – березовых опилок.



а)



б)

Рис. 3. Микрофотографии ( $1 \times 400$ ) бокового среза образца ПБС после испытаний на биостойкость в активном грунте: а) образец с содержанием в пресс-сырье 75% бересты; б) образец с содержанием в пресс-сырье 100% бересты

Fig. 3. Micrographs ( $1 \times 400$ ) of the lateral section of the PWR sample after biostability tests in active soil: а) a sample containing 75% birch bark in the press raw materials; б) a sample containing 100% birch bark in the press raw materials

Подобная картина наблюдалась в ходе испытаний образцов на биостойкость по отношению к почво-грунту: преимущественно разрушали образцы с большим содержанием древесного наполнителя. Морфологические изменения образцов после испытания в почво-грунте были аналогичны испытаниям в активном грунте, но с меньшим поражающим эффектом (рис. 4).

При этом наблюдалось интересная особенность – это прорастание корней растений вдоль и сквозь исследуемый материал (рис. 5). Это может говорить о биологической активности самого почвенного субстрата, а также о возможном создании благоприятной среды для развития растений за счет продуктов разрушения ПБС.

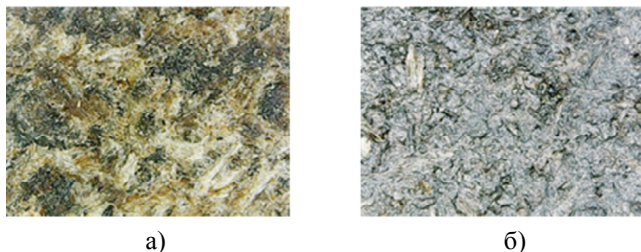


Рис. 4. Микрофотографии ( $1 \times 400$ ) поверхности образцов до и после испытаний в почво-грунте: а) и б) образцы с содержанием в пресс-сырье 50% бересты до и после испытаний соответственно

Fig. 4. Micrographs ( $1 \times 400$ ) of the surface of the samples before and after testing in the soil: a) and b) samples containing 50% birch bark in the press raw materials before and after testing, respectively

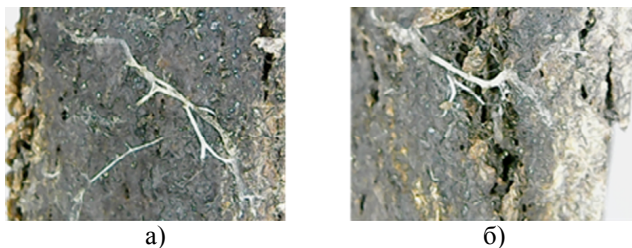


Рис. 5. Микрофотографии ( $1 \times 400$ ) бокового среза образцов после испытаний в почво-грунте: а) и б) образцы с содержанием в пресс-сырье 50% бересты до и после испытаний соответственно

Fig. 5. Micrographs ( $1 \times 400$ ) of the lateral section of samples after testing in the soil: a) and b) samples containing 50% birch bark in the press raw materials before and after testing, respectively

### Выводы

Установлено, что добавка верхнего слоя коры березы (бересты) к древесному наполнителю при высоком содержании придаёт ее пластикам повышенные показатели водостойкости, но при этом неоднозначно влияет на прочностные показатели.

Анализ данных по прочностным показателям в зависимости от содержания бересты в пресс-сырье показал, что возможно деление данной зависимости на две области: первая – при содержании до 50% добавки и вторая – более 50%. Такая зависимость, вероятно, свидетельствует о том, что при содержании свыше 50% бересты в прессуемом материале отсутствует возможность структурообразования пластика из-за свойств и структуры самой бересты – ее слоистостью и химическим составом (невысоким содержанием лигнина и целлюлозы по сравнению с содержанием его в древесном наполнителе).

Применение бересты при получении ПБС можно рассматривать как гидрофобизирующую добавку для древесного наполнителя. При этом возможно получать не только пластик с водоотталкивающим покрытием (не совершается распределение частиц воды по поверхности материала), но и не допускать проникновению влаги во внутренние слои самого пластика.

В ходе испытаний на биостойкость, было отмечено, что процесс деструкции изучаемых пластиков можно разделить на два вида: 1) образование пористой структуры; 2) это образование слоённой структуры пластиков (рис. 6).



а)



б)

Рис. 6. Микрофотографии ( $1 \times 400$ ) бокового среза образцов после испытания в почво-грунте: а) образец с пористой структурой (25% бересты); б) образец с слоённой структурой (75% бересты)

Fig. 6. Micrographs ( $1 \times 400$ ) of the lateral section of samples after testing in the soil: а) a sample with a porous structure (25% birch bark); б) a sample with a layered structure (75% birch bark)

В первом случае основной причиной разрушения пластика является избыточная вода: происходит гидролитическая деструкция полимеров. Во втором случае первоначальное действие оказывают микроорганизмы, которые своими ферментами разрушают матричный компонент пресс-сырья – древесный наполнитель, что приводит к образованию полостей внутри материала.

Стоит отметить, что пластики на основе только бересты обладают высокой биостойкостью как по отношению к почво-грунту, так и активному грунту, пренебрегая как воздействием воды в силу своей высокой гидрофобности, так и воздействием микроорганизмов в силу своих антисептических свойств.

Выбор рациональной композиции определяется в первую очередь по результатам испытаний на физико-механические свойства. Применительно к изучаемым ПБС основными показателями являются прочность при изгибе и водопоглощение (рис. 7).

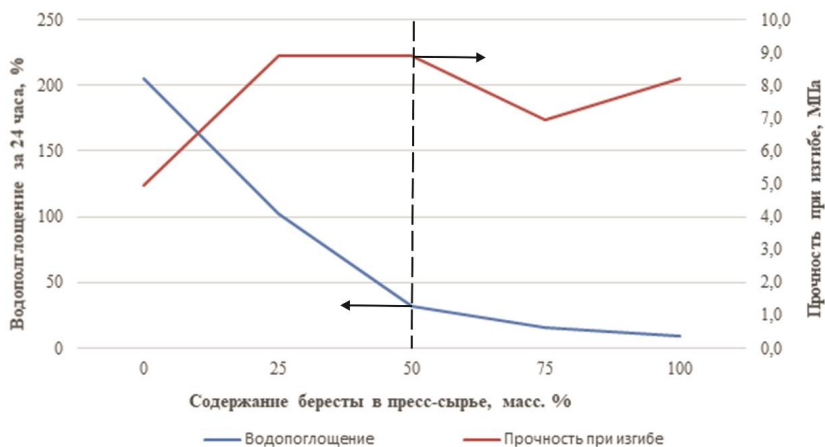


Рис. 7. Зависимость водопоглощения и прочности при изгибе ПБС от содержания в его пресс-сырье добавки бересты

Fig. 7. The dependence of water absorption and bending strength of the PWR on the content of birch bark additives in its press raw materials

Для композиций с добавкой бересты при получении ПБС на основе березовых опилок стоит рассмотреть вариант композиции по 50 масс.% компонентов. Пластики, полученные на основе данной композиции, обладают

высокими прочностными свойствами и способностью к водостойкости и биостойкости в условиях эксплуатации в комнатных условиях, но при этом могут свободно деградировать в условиях внешней окружающей среды.

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

### **Библиографический список**

*Артёмов А.В., Еришова А.С., Савиновских А.В. и др.* Исследование биоразлагаемости древесных пластиков без добавления связующих на основе древесины берёзы // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 3(55). С. 92–97. DOI: 10.18324/2077-5415-2022-3-92-97.

*Артёмов А.В., Савиновских А.В., Бурындин В.Г.* Модуль упругости при изгибе как показатель физико-механических свойств древесных пластиков без добавления связующих // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 1(49). С. 67–71. DOI: 10.18324/2077-5415-2021-1-67-71

*Базарнова Н.Г., Галочкин А.И., Крестьянников В.С.* Влияние гидротермической обработки древесины на свойства древесных прессованных материалов // Химия растительного сырья. 1997. № 1. С. 11–16.

*Базарнова Н.Г., Галочкин А.И., Крестьянников В.С.* Влияние мочевины на свойства прессованных материалов из древесины, подвергнутой гидротермической обработке // Химия растительного сырья. 1997. № 1. С. 17–21.

*Бурындин В.Г., Артёмов А.В., Савиновских А.В. и др.* Исследование получения древесных пластиков без добавления связующих на основе древесины лиственных пород в присутствии катализаторов типа полиоксометаллатов // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 2(46). С. 70–75. DOI: 10.18324/2077-5415-2020-2-70-75.

*Бурындин В.Г., Бельчинская Л.И., Савиновских А.В. и др.* Изучение получения древесных и растительных пластиков без связующих в присутствии катализаторов типа полиоксометаллатов // Лесотехнический журнал. 2018. Т. 8, № 1(29). С. 128–134. DOI: 10.12737/article\_5ab0dfc1e37185.35527284.

*Васильев В. В.* Кора берёзы – ценное сырьё для химической переработки // Древесные плиты и фанера: теория и практика: матер. XXVI Всерос. науч.-практич. конференции, Санкт-Петербург, 21–22 марта 2023 года. СПб.: СПбГЛТУ, 2023. С. 48–52.

*Глухих В.В., Шкуро А.Е., Артёмов А.В. и др.* Математическое планирование экспериментов и анализ их результатов с применением компьютерных программ: учеб. пособие; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский государственный лесотехнический университет. Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2023. 104 с.

*Еришова А.С., Артёмов А.В., Савиновских А.В. и др.* Влияние вида сырья на свойства древесных пластиков без добавления связующих // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 3(47). С. 74–80. DOI: 10.18324/2077-5415-2020-3-74-80.

Иванов Д.В., Рябинков А.А., Орехов Е.В. Аспекты изготовления древесноволокнистых плит без использования синтетических смол // Древесные плиты и фанера: теория и практика: матер. XXIV Всерос. науч.-практич. конференции, Санкт-Петербург, 17–18 марта 2021 года. СПб.: Политех-пресс, 2021. С. 79–86.

Криворотова А.И., Эскин В.Д. Исследование способов и режимов переработки шишки сосны сибирской при изготовлении декоративного композиционного материала // Хвойные бореальной зоны. 2022. Т. 40, № 5. С. 430–438. DOI: 10.53374/1993-0135-2022-5-430-438.

Кузнецова С.А., Кузнецов Б.Н., Скурыдина Е.С. и др. Синтез и свойства биокomпозитных удобрений на основе мочевины и коры березы // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия. 2013. Т. 6, № 4. С. 380–393.

Микрюкова Е.В., Седых М.А. Облегченные древесные плитные материалы с внутренним заполнением из картонных гильз // Деревообрабатывающая промышленность. 2019. № 2. С. 24–30.

Минин А.Н. Технология пьезотермопластиков. М.: Лесн. пром-сть, 1965. 296 с.

Мичуров Д.М., Шаркова А.С., Шкуро А.Е., Кривоногов П.С. Исследование смазываемости и водопоглощения композитов с полимерной фазой полилактида и опилками бука // Деревообрабатывающая промышленность. 2023. № 3. С. 121–127.

Петри В.Н. и др. Плитные материалы и изделия из древесины и других одресневевших остатков без добавления связующих. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 360 с.

Просвирников Д.Б., Сафин Р.Р., Козлов Р.Р. Оценка влияния условий каталитической непрерывной паровзрывной активации древесины на физико-эксплуатационные свойства плитных древесных композиционных материалов на основе активированных волокон // Деревообрабатывающая промышленность. 2020. № 2. С. 35–49.

Сафина А.В., Зарипов Р.М. Проект производства декоративной щепы из отходов деревообрабатывающего комплекса // Деревообрабатывающая промышленность. 2023. № 2. С. 36–45.

Солечник Н.Я., Наткина Л.Н., Коромылова Т.С. и др. О получение древесного пластика без связующего // Деревообрабатывающая промышленность. 1963. № 3. С. 15–17.

Судакова И.Г., Гарынцева Н.В., Иванов И.П. и др. Выделение и применение суберина из бересты коры березы // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия. 2012. Т. 5, № 2. С. 168–177.

Artemov A.V., Buryndin V.G., Krivonogov P.S. et al. An Investigation of Complexes of Lignin Found in Plant Raw Materials as a Natural Binder in Obtaining Plastic in Closed Molds // Polym. Sci. Ser. D. 2023. No 16. P. 278–284.

Barmina I. et al. The Effect of Birch-Bark Addition on the Elemental Composition and Combustion Characteristics of Different Types of Biomass Pellets // Chemical engineering. 2014. Vol. 39. P. 1525–1530.



*Blondeau D. et al.* Antimicrobial activity and chemical composition of white birch (*Betula papyrifera* Marshall) bark extracts // *Microbiologyopen*. 2020. Vol. 9, no. 1. P. e00944.

*Godiņa D. et al.* Stability studies of bioactive compounds from birch outer bark ethanolic extracts // *Key Engineering Materials*. 2018. Vol. 762. P. 152–157.

*Hordyjewska A. et al.* Betulin and betulinic acid: Triterpenoids derivatives with a powerful biological potential // *Phytochemistry Reviews*. 2019. Vol. 18. P. 929–951. DOI: 10.1007/s11101-019-09623-1

*Jonnalagadda S.C. et al.* Recent developments on the synthesis and applications of betulin and betulinic acid derivatives as therapeutic agents // *Studies in Natural Products Chemistry*. 2017. Vol. 53. P. 45–84. DOI: 10.1016/B978-0-444-63930-1.00002-8

*Page A. et al.* Processing possibilities of birch outer banks into green bio-composites // *Environment. Technologies. Resources: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. 2017. Vol. 3. P. 249–253.

*Paze A. et al.* Development of Plywood Binder by Partial Replacement of Phenol-Formaldehyde Resins with Birch Outer Bark Components // *Key Engineering Materials*. 2021. Vol. 903. P. 229–234.

*Rizhikovs J. et al.* Characterization of suberinic acids from birch outer bark as bio-based adhesive in wood composites // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2022. Vol. 112. P. 102989. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2021.102989.

*Scheffler A.* The wound healing properties of betulin from birch bark from bench to bedside // *Planta medica*. 2019. Vol. 85, no. 07. P. 524–527. DOI: 10.1055/a-0850-0224.

*Valiullina A.I., Grachev A.N., Valeeva A.R. et al.* The Use of Biopolyols Obtained from Liquid Birch Sawdust Pyrolysis Products as a Renewable Component in the Production of Rigid Polyurethane Foams // *Polymer Science, Series D*. 2022. Vol. 15, no. 2. P. 300–305. DOI: 10.1134/S1995421222020307.

## References

*Artemov A.V., Buryndin V.G., Krivonogov P.S. et al.* An Investigation of Complexes of Lignin Found in Plant Raw Materials as a Natural Binder in Acquiring Plastic in Closed Molds. *Polym. Sci. Ser. D.*, 2023, no. 16, pp. 278–284.

*Artemov A.V., Savinovskikh A.V., Buryndin V.G.* Modulus of elasticity in bending as an indicator of the physico-mechanical properties of wood plastics without the addition of binders. *Systems. Methods. Technologies*, 2021, no. 1(49), pp. 67–71. DOI: 10.18324/2077-5415-2021-1-67-71. (In Russ.)

*Artyomov A.V., Ershova A.S., Savinovskikh A.V. et al.* Investigation of biodegradability of wood plastics without the addition of binders based on birch wood. *Systems. Methods. Technologies*, 2022, no. 3(55), pp. 92–97. DOI: 10.18324/2077-5415-2022-3-92-97. (In Russ.)

*Barmina I. et al.* The Effect of Birch-Bark Addition on the Elemental Composition and Combustion Characteristics of Different Types of Biomass Pellets. *Chemical engineering*, 2014, vol. 39. pp. 1525–1530.

Bazarnova N.G., Galochkin A.I., Krestyanikov V.S. The influence of hydrothermal wood processing on the properties of pressed wood materials. *Chemistry of vegetable raw materials*, 1997, no. 1, pp. 11–16. (In Russ.)

Bazarnova N.G., Galochkin A.I., Krestyanikov V.S. The influence of urea on the properties of pressed materials from wood subjected to hydrothermal treatment. *Chemistry of vegetable raw materials*, 1997, no. 1, pp. 17–21. (In Russ.)

Blondeau D. et al. Antimicrobial activity and chemical composition of white birch (*Betula papyrifera* Marshall) bark extracts. *Microbiologyopen*, 2020, vol. 9, no. 1, p. e00944.

Buryndin V.G., Artemov A.V., Savinovskikh A.V. et al. Investigation of the production of wood plastics without the addition of binders based on hardwood in the presence of catalysts such as polyoxometallates. *Systems. Methods. Technologies*, 2020, no. 2(46), pp. 70–75. DOI: 10.18324/2077-5415-2020-2-70-75. (In Russ.)

Buryndin V.G., Belchinskaya L.I., Savinovskikh A.V. et al. The study of the production of wood and vegetable plastics without binders in the presence of catalysts such as polyoxometallates. *Forestry Journal*, 2018, vol. 8, no. 1(29), pp. 128–134. DOI: 10.12737/article\_5ab0dfc1e37185.35527284. (In Russ.)

Ershova A.S., Artemov A.V., Savinovskikh A.V. et al. The influence of the type of raw materials on the properties of wood plastics without the addition of binders. *Systems. Methods. Technologies*, 2020, no. 3(47), pp. 74–80. DOI: 10.18324/2077-5415-2020-3-74-80. (In Russ.)

Glukhikh V.V., Shkuro A.E., Artyomov A.V. et al. Mathematical planning of experiments and analysis of their results using computer programs: textbook / Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Ural State Forestry University. Yekaterinburg: Ural State Forestry University, 2023. 104 p. (In Russ.)

Godiņa D. et al. Stability studies of bioactive compounds from birch outer bark ethanolic extracts. *Key Engineering Materials*, 2018, vol. 762, pp. 152–157.

Hordyjewska A. et al. Betulin and betulinic acid: Triterpenoids derivatives with a powerful biological potential. *Phytochemistry Reviews*, 2019, vol. 18, pp. 929–951. DOI: 10.1007/s11101-019-09623-1

Ivanov D.V., Ryabinkov A.A., Orekhov E.V. Aspects of manufacturing fiberboard without the use of synthetic resins. *Wood slabs and plywood: theory and practice: materials of the XXIV All-Russian Scientific and Practical Conference*, St. Petersburg, March 17–18, 2021. St. Petersburg: Polytech Press, 2021, pp. 79–86. (In Russ.)

Jonnalagadda S.C. et al. Recent developments on the synthesis and applications of betulin and betulinic acid derivatives as therapeutic agents. *Studies in Natural Products Chemistry*, 2017, vol. 53, pp. 45–84. DOI: 10.1016/B978-0-444-63930-1.00002-8

Krivorotova A.I., Eskin V.D. Investigation of methods and modes of processing Siberian pine cones in the manufacture of decorative composite material. *Coniferous boreal zones*, 2022, vol. 40, no. 5, pp. 430–438. DOI: 10.53374/1993-0135-2022-5-430-438. (In Russ.)

Kuznetsova S.A., Kuznetsov B.N., Skurydina E.S. et al. Synthesis and properties of biocomposite fertilizers based on urea and birch bark. *Journal of the Siberian Federal University. Series: Chemistry*, 2013, vol. 6, no. 4, pp. 380–393. (In Russ.)

Michurov D.M., Sharkova A.S., Shkuro A.E., Krivonogov P.S. Investigation of wettability and water absorption of composites with polymer polylactide phase and beech sawdust. *The woodworking industry*, 2023, no. 3, pp. 121–127. (In Russ.)

Mikryukova E.V., Sedykh M.A. Lightweight wood slab materials with internal filling from cardboard sleeves. *The woodworking industry*, 2019, no. 2, pp. 24–30. (In Russ.)

Minin A.N. Technology of piezothermoplastics. M.: Forest industry, 1965. 296 p. (In Russ.)

Page A. et al. Processing possibilities of birch outer banks into green biocomposites. *Environment. Technologies. Resources: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*, 2017, vol. 3, pp. 249–253.

Paze A. et al. Development of Plywood Binder by Partial Replacement of Phenol-Formaldehyde Resins with Birch Outer Bark Components. *Key Engineering Materials*, 2021, vol. 903, pp. 229–234.

Petri V.N. et al. Slab materials and products made of wood and other desalinated residues without the addition of binders. M.: Forest industry, 1976. 360 p.

Prosvirnikov D.B., Safin R.R., Kozlov R.R. Assessment of the influence of conditions of catalytic continuous steam-explosive activation of wood on the physical and operational properties of slab wood composite materials based on activated fibers. *The woodworking industry*, 2020, no. 2, pp. 35–49. (In Russ.)

Rizhikovs J. et al. Characterization of suberinic acids from birch outer bark as bio-based adhesive in wood composites. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2022, vol. 112, p. 102989. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2021.102989.

Safina A.V., Zaripov R.M. The project of production of decorative chips from waste of a woodworking complex. *The woodworking industry*, 2023, no. 2, pp. 36–45. (In Russ.)

Scheffler A. The wound healing properties of betulin from birch bark from bench to bedside. *Planta medica*, 2019, vol. 85, no. 07, pp. 524–527. DOI: 10.1055/a-0850-0224.

Solechnik N.Ya., Natkina L.N., Koromyslova T.S. et al. On the production of wood plastic without binder. *Woodworking industry*, 1963, no. 3, pp. 15–17. (In Russ.)

Sudakova I.G., Garyntseva N.V., Ivanov I.P. et al. Isolation and application of suberin from birch bark bark. *Journal of the Siberian Federal University. Series: Chemistry*, 2012, vol. 5, no. 2, pp. 168–177. (In Russ.)

Valiullina A.I., Grachev A.N., Valeeva A.R. et al. The Use of Biopolyols Obtained from Liquid Birch Sawdust Pyrolysis Products as a Renewable Component in the Production of Rigid Polyurethane Foams. *Polymer Science, Series D*, 2022, vol. 15, no. 2, pp. 300–305. DOI: 10.1134/S1995421222020307.

Vasiliev V.V. Birch bark is a valuable raw material for chemical processing. *Wood slabs and plywood: theory and practice: materials of the XXVI All-Russian Scientific and Practical Conference*, St. Petersburg, March 21–22, 2023. St. Petersburg: SPbGLTU, 2023, pp. 48–52. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 22.12.2023

**Артёмов А.В., Власов Н.Г., Ершова А.С., Вураско А.В., Бuryндин В.Г.**  
Влияния содержания бересты в пресс-сырье на свойства пластика без связующих на основе березовых опилок // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 250. С. 333–352. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.333-352

Были получены образцы пластика без связующего (ПБС) на основе древесного наполнителя с различным соотношением бересты березы. Образцы ПБС прессовались в герметичной пресс-форме под давлением 40 МПа и температуре 180 °С с последующим ее охлаждением без снятия давления до 40 °С. У полученных образцов были исследованы показатели плотности, прочности при изгибе, модуля упругости при изгибе, твердости по Бринеллю, ударной вязкости, водопоглощения и разбухания за 24 ч, биостойкости по отношению к почво-грунту за 90 суток и активному грунту за 105 суток. Также осуществлялась оценка гидрофобности по краевому углу смачивания. На основании полученных результатов испытаний было установлено рациональное соотношение пресс-композиции на основе березовых опилок с добавлением бересты 50%. При данном соотношении достигаются следующие показатели материала: плотность – 909 кг/м<sup>3</sup>; модуль упругости – 1566 МПа; прочность при изгибе – 8,9 МПа; твердость по Бринеллю – 17 МПа; ударная вязкость – 3,818 кДЖ/м<sup>2</sup>; водопоглощение за 24 ч – 32%; разбухание – 7%. Выявлена зависимость роста биостойкости ПБС с увеличением содержания бересты в пресс-материале, что объясняется ее высокой гидрофобностью и антисептическими свойствами.

**Ключевые слова:** пластик, опилки березы, береста, лигнин, физико-механические свойства, водопоглощение, биостойкость, почво-грунт, активный грунт.

**Artyomov A.V., Vlasov N.G., Ershova A.S., Vurasko A.V., Buryndin V.G.**  
Influence of birch bark content in press raw materials on the properties of birch sawdust-based plastic without resins. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2024, iss. 250, pp. 333–352 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.333-352

Samples of plastic without resin (PWR) were produced using a wood filler with varying proportions of birch bark. The PWR samples were pressed in a sealed mold under a pressure of 40 MPa and at a temperature of 180 °C, followed by cooling without pressure release until reaching 40 °C. The resulting samples underwent testing for density, flexural strength, flexural modulus of elasticity, Brinell hardness, impact toughness, water absorption, and swelling after 24 hours. Additionally, biostability was assessed in soil for 90 days and in active soil for 105 days. Hydrophobicity was also evaluated based on the contact angle. Based on the test results, the optimal composition ratio for the press material was determined using birch sawdust with a 50% addition of birch bark. At this ratio, the material exhibited the following

properties: density – 909 kg/m<sup>3</sup>, modulus of elasticity – 1566 MPa, flexural strength – 8.9MPa, Brinell hardness – 17 MPa, impact toughness – 3.818 kJ/m<sup>2</sup>, water absorption in 24 hours – 32%, and swelling – 7%. A correlation was found between increased birch bark content in the press material and enhanced biostability, attributed to its high hydrophobicity and antiseptic properties.

**Keywords:** plastic, sawdust, birch bark, lignin, physical-mechanical properties, water absorption, biostability, soil, active soil.

---

**АРТЁМОВ Артём Вячеславович** – доцент кафедры технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров Уральского государственного лесотехнического университета, кандидат технических наук, доцент.

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

**ARTYOMOV Artyom V.** – PhD (Technical), Associate Professor of the department technology of pulp and paper industries and polymer processing of the Ural State Forest Engineering University.

620100. Siberian tract str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: artemovav@m.usfeu.ru @yandex.ru

**ВЛАСОВ Николай Геннадьевич** – магистр кафедры технологии органического синтеза химико-технологического института Уральского федерального университета.

620062, ул. Мира, д. 28, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: sierra146888@gmail.com

**VLASOV Nicolay G.** – master student of 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: sierra146888@gmail.com

**ЕРШОВА Анна Сергеевна** – ассистент кафедры технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров Уральского государственного лесотехнического университета.

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

**ERSHOVA Anna S.** – assistant of 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: ershovaas@m.usfeu.ru

**ВУРАСКО Алеся Валерьевна** – профессор кафедры технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров Уральского государственного лесотехнического университета, доктор технических наук.

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

**VURASKO Alesya V.** – DSc (Technical), Professor of the department technology of pulp and paper industries and polymer processing of the Ural State Forest Engineering University.

620100. Siberian tract str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: vuraskoav@m.usfeu.ru @yandex.ru

**БУРЫНДИН Виктор Гаврилович** – профессор кафедры технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров Уральского государственного лесотехнического университета, доктор технических наук.

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

**BURYNDIN Victor G.** – DSc (Technical), Professor of the department technology of pulp and paper industries and polymer processing of the Ural State Forest Engineering University.

620100. Siberian tract str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: buryndinv@m.usfeu.ru

## 4. ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ. БИОТЕХНОЛОГИЯ

---

УДК 66.081.32

С.Р. Мамбетова, А.В. Бахтиярова

### СОРБЦИОННАЯ ОЧИСТКА КСИЛОЗНОГО ГИДРОЛИЗАТА АКТИВИРОВАННЫМ УГЛЕМ ИЗ ЦЕЛЛЮЛИГНИНА

*Введение.* По данным Международной Федерации Диабета на конец 2021 года диабетом страдает в мире примерно 537 млн, а в Российской Федерации по данным Росстата – 5 млн 168,8 тыс. человек. По прогнозам к 2045 г. ожидается практически двукратное увеличение – до 783 млн человек [Дедов и др., 2023].

Ксилроза – это низкокалорийный альтернативный сахар, используемый для производства ксилита, ароматизаторов и пищевых карамельных красителей [Satyavolu et al., 2020]. Ксилит обладает сладким вкусом и является заменителем сахара, который не требует для своего усвоения инсулин, а также широко используется в пищевой промышленности в качестве подсластителя пищевых продуктов, влагоудерживающего агента, стабилизатора и эмульгатора [Barathikannan et al., 2016; Umai et al., 2022]. Он зарегистрирован как пищевая добавка Е 967 [ГОСТ Р 53904-2010] и служит сырьем в химической промышленности для производства поверхностно-активных веществ (ПАВ), лаков, клеев, эфиров канифоли, ксифталевых алкидных смол, заменителей глицерина и др. [Ковернинский и др., 2002]. Ксилит также широко используется при производстве зубной пасты и ополаскивателей для рта, благодаря его антикариозному свойству и способности восстанавливать твердость зубов [Janket et al., 2019].

Для получения ксилита используется непищевое возобновляемое растительное сырьё богатое пентозанами – березовая древесина и отходы сельскохозяйственного производства. Его получают методом гидролиза и последующего гидрирования пентозных гидролизатов.

На данный момент наиболее перспективным видом сырья для российской ксилитной промышленности является берёзовая древесина. В ней содержится значительно меньше нежелательных компонентов, таких как

зольные элементы, полиуроновые кислоты, азотистые вещества, лигнин, вещества, экстрагируемые горячей водой, затрудняющих процесс выделения ксилита из ксилозных растворов и снижающих качество товарного продукта [Холькин, 1989].

При использовании березовой древесины для производства ксилита процесс химического облагораживания не оказывает существенного влияния на качество гидролизата [Денисенко и др., 2023]. Это позволяет значительно упростить очистку полупродуктов производства. При этом содержание пентозанов в березовой древесине незначительно уступает их содержанию в растительных отходах сельского хозяйства.

Ксилит попал в пятый пакет санкций Евросоюза и основным поставщиком ксилита в Россию стал Китай. Стоимость и качество китайского ксилита ниже, чем финского и составляет около 3,5 \$ за кг [Мамбетова и др., 2023].

Высокие требования к качеству ксилита обусловлены его применением в пищевой и фармацевтической промышленности. Количество основного вещества в составе продукта должно составлять не менее 98,5% (в пересчете на безводный продукт) [ГОСТ Р 53904-2010], а получаемые гидролизаты растительного сырья содержат примеси, которые можно отнести к трем основным группам: производные фурана, алифатические кислоты и фенольные соединения [Carvalho et al., 2005]. Эти соединения образуют комплекс называемый лигногуминовыми или лигнофурановыми веществами, образующимися в результате поликонденсации продуктов частичной деструкции лигнина – фенольных соединений – и моносахаридов – фурановых продуктов. Этот комплекс относится к окрашивающим веществам [Трофимова и др., 2009].

Помимо образования лигногуминовых веществ, продуктами потемнения гидролизата являются неокислительные реакции углеводов, которые включают эффект карамелизации и их взаимодействия с аминными соединениями гидролизата по реакции Майяра. Скорость реакции образования карамельных пигментов увеличивается при увеличении температуры и pH [Нечаев и др., 2007].

Для ксилитного производства важным показателем является цветность гидролизата. Одной из самых главных задач подготовки растворов к гидрированию является их осветление. Для этих целей наиболее часто применяется сорбционная и флокуляционная очистка получаемых растворов [Трофимова и др., 2009], а также мембранные методы очистки [Кинд и др., 2010].



Адсорбция активированным углем широко применяется для очистки гидролизатов для удаления фенолов, фурфурола и гидроксиметилфурфурола [Tavares et al., 2022]. Обработка активированным углем эффективна для снижения концентрации фенольных соединений на 78% [Vardhan et al., 2023], фурфурола на 42%, гидроксиметилфурфурола на 65% [Arminda et al., 2021]. Химизм и механизм этих процессов подробно описан в работе [Выглазов, 2004].

Почти 50% затрат при получении ксилита составляют затраты на очистку гидролизата. Улучшить экономику ксилитного производства позволит замена дорогостоящего осветляющего активированного древесного угля, используемого при сорбционной очистке гидролизата, на активированный уголь из целлюлозы, который является отходом данного производства.

*Материалы и методика исследования.* Гидролиз березовых опилок проводили в лабораторном гидролиз-аппарате (ГА). Для проведения гидролиза брали навеску воздушно-сухих опилок массой 1030 г, равномерно пропитывали раствором серной кислоты концентрацией 0,5%. Оставляли для полной пропитки древесины, а затем подготовленную массу загружали в гидролиз-аппарат, где проводили гидролиз при технологическом режиме:  $T = 160^{\circ}\text{C}$ , соотношение жидкость: твердое вещество=1,0 (ГМ),  $\tau = 30$  мин.

Из гидролизат-массы пентозный гидролизат выделяли методом экстракции горячей водой. Содержание редуцирующих веществ и летучих органических кислот определяли по методикам [Бахтиярова и др., 2018], сухие вещества определяли рефрактометрическим методом [ГОСТ ISO 2173–2013]. В ксилитном производстве важным показателем является доброкачественность гидролизатов, которую определяли как отношение редуцирующих веществ к сухим веществам гидролизата. Цветность гидролизата определяли в единицах Штаммера (ед.Шт.) по формуле

$$\text{Ц} = \frac{100 \times 1000 \times D_{420}}{130 \times C_{CB} \times d \times b}, \text{ ед.Шт.}, \quad (1)$$

где  $D_{420}$  – показание фотометра для анализируемого раствора;  $C_{CB}$  – массовая доля СВ раствора, %;  $\rho$  – плотность, г/см<sup>3</sup>;  $b$  – длина оптического пути, см.

Оставшуюся после экстракции твердую фракцию использовали для получения гранулированного активированного угля посредством формирования целлюлозы и его пирогазетической переработки с последующей активацией полученного при пиролизе угля [Бахтиярова и др., 2019].

Технологические параметры проведения процесса осветления пентозного гидролизата берёзовой древесины: pH гидролизата: 1,2 и 3,0; сорбенты: гранулированный активный уголь (ГАУ) из целлолигнина, древесный активный уголь марки БАУ-А; количество сорбента, вносимого в гидролизат: 5, 10, 15, 17, 20% от СВ гидролизата; температура – 80 °С; продолжительность обработки – 30 мин; перемешивание.

Использованные для осветления гидролизата ГАУ из целлолигнина, подсушенные до воздушно-сухого состояния, регенерировали методом парогазовой активации при температуре 970 °С и продолжительности обработки 10, 15, 20, 25 и 30 минут. Для определения оптимальной продолжительности регенерации, полученные угли использовали для осветления ксилозного гидролизата берёзовой древесины. Осветление проводили в течение 30 минут при перемешивании и температуре 80 °С с внесением регенерированных ГАУ в количестве 17% от СВ гидролизата. Все эксперименты проводились в двух параллельных опытах с расхождением между определениями не более 0,01 единицы и указанием среднего значения.

*Результаты и обсуждение.* Характеристика гидролизата представлена в табл. 1. При концентрации редуцирующих веществ 5%, доброкачественность гидролизата составила 77%. Выход твердого остатка – целлолигнина – 81,5%.

Таблица 1

### Основные показатели гидролизата

#### Main parameters of hydrolysate

Показатели	Содержание
Концентрация редуцирующих веществ (РВ), %	5,0
Концентрация летучих органических кислот, %	0,67
Сухие вещества (СВ), %	6,5
Доброкачественность (D), %	77
pH	1,2
Цветность, ед. Штаммера	94

Получаемый гидролизат с pH 1,2 частично нейтрализовали известковым молоком до pH 3,0 и сравнивали степень осветления гидролизата при обработке гранулированным активным углём из целлолигнина при различных pH раствора (рис. 1).

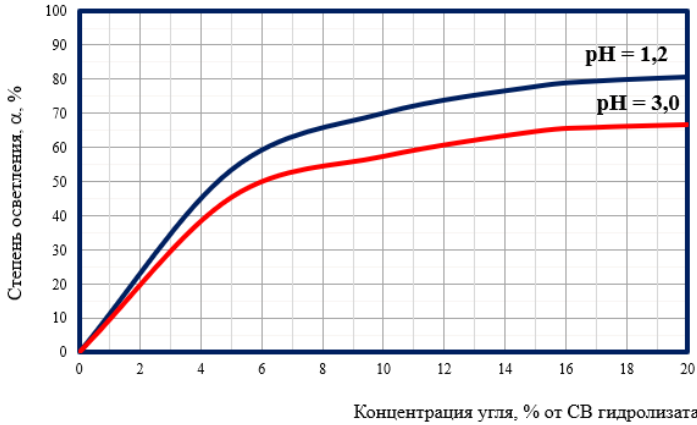


Рис. 1. Зависимость степени осветления гидролизата берёзовой древесины ГАУ от pH гидролизата

Fig. 1. Dependence of the degree of clarification of birch wood hydrolysate by GAU on the pH of the hydrolysate

Данные по сорбционной очистке кислого гидролизата берёзовой древесины (pH = 1,2) и нейтрализованного (pH = 3,0) с гранулированным активным углём из целлюлозы и берёзовым активным углём марки А приведены в табл. 2 и 3. При нейтрализации цветность гидролизата увеличивается с 94,0 до 104,4 ед. Штаммера.

Таблица 2

**Результаты сорбционной очистки кислого гидролизата**  
**Results of sorption purification of acid hydrolysate**

Расход сорбента на осветление, % от СВ	ГАУ			БАУ-А		
	Характеристики гидролизата:					
	оптическая плотность	цветность, ед. Шт.	степень осветления α, %	оптическая плотность	цветность, ед. Шт.	степень осветления α, %
0	0,689	94,0	—	0,689	94,0	—
5	0,321	43,8	53,4	0,378	51,6	45,1
10	0,207	28,3	70,0	0,269	36,7	61,0
15	0,153	20,9	77,8	0,195	26,6	71,7
17	0,142	19,4	79,4	0,178	24,3	74,2
20	0,134	18,3	80,6	0,169	23,1	75,5

Таблица 3

**Результаты сорбционной очистки нейтрализованного гидролизата****Results of sorption purification of neutralized hydrolysate**

Расход сорбента на осветление, % от СВ	ГАУ			БАУ–А		
	Характеристики гидролизата:					
	оптическая плотность	цветность, ед. Шт.	степень осветления α, %	оптическая плотность	цветность, ед. Шт.	степень осветления α, %
0	0,765	104,4	–	0,765	104,4	–
5	0,418	57,0	45,4	0,505	68,9	34,0
10	0,326	44,9	57,4	0,416	56,8	45,6
15	0,270	36,8	64,7	0,362	49,4	52,7
17	0,261	35,6	65,9	0,356	48,6	53,5
20	0,255	34,8	66,7	0,348	48,0	54,5

Сравнение эффективности сорбционной очистки кислого гидролизата берёзовой древесины ( $\text{pH} = 1,2$ ) с использованием в качестве сорбента ГАУ из целлюлогина берёзовой древесины и БАУ–А показало, что степень осветления гидролизата при использовании ГАУ выше, чем при БАУ–А (рис. 2). Вероятно, это связано с тем, что гранулы активного угля из целлюлогина имеют более пористую структуру, чем гранулы БАУ, что обеспечивает лучшее протекание сорбционных процессов. Необходимая цветность гидролизата достигается при добавлении ГАУ в количестве 17% от СВ гидролизата.

Степень осветления значительно зависит от величины  $\text{pH}$  гидролизата (рис.2). При очистке нейтрализованного до  $\text{pH} = 3,0$  гидролизата эффективность осветления гранулированным активным углём из целлюлогина также выше, чем углём марки БАУ–А. Однако, достижение необходимой степени осветления гидролизата невозможно без применения дополнительных методов обработки.

Эффективность осветления кислого гидролизата берёзовой древесины ( $\text{pH} = 1,2$ ) регенерированным гранулированным активным углём из целлюлогина представлена в табл. 4. Регенерированные ГАУ пригодны для использования при сорбционной очистке и для достижения необходимой осветляющей способности активного угля и требуемой цветности гидролизата. Достаточная продолжительность регенерации составляет 20 мин.

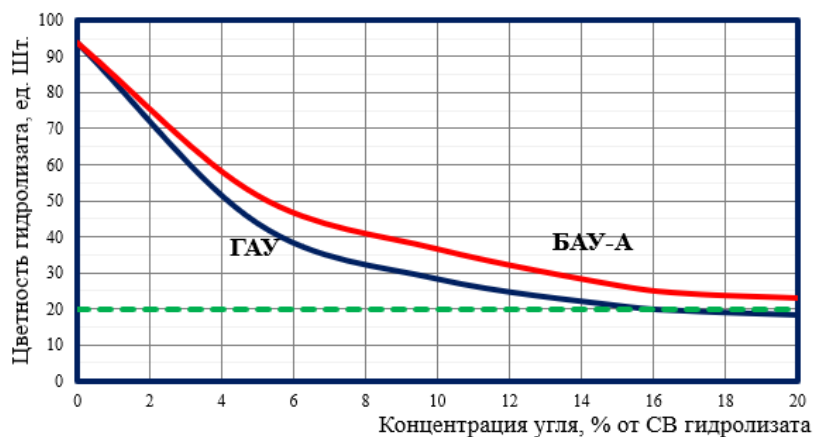


Рис. 2. Сравнение эффективности сорбционной очистки гидролизата с использованием ГАУ и БАУ-А

Fig. 2. Comparison of efficiency of sorption purification of hydrolysate using GAU and BAU-A

Таблица 4

**Эффективность осветления кислого гидролизата березовой древесины регенерированным гранулированным активным углём из целлюлигина**

**Efficiency of clarification of acidic birch wood hydrolysate by regenerated granular active carbon from cellolignin**

Продолжительность регенерации, мин	Оптическая плотность гидролизата, D	Цветность гидролизата, ед. Шт.	Степень осветления гидролизата, α, %
10	0,186	25,4	73,0
15	0,174	23,7	74,8
20	0,114	15,6	83,5
25	0,113	15,4	83,6
30	0,111	15,2	83,9

При использовании для осветления гидролизата берёзовой древесины в качестве сорбента ГАУ из целлюлигина, норма остаточной цветности гидролизата пентозансодержащего сырья после сорбционной очистки,

предусмотренная промышленным регламентом на производство ксилита (< 20 ед. Шт.), достигается при расходе угля на осветление в количестве 17% от СВ гидролизата.

Объем производства гранулированных активных углей для завода производительностью 1000 тонн ксилита в год составит около 2500 т/год, что в 3 раза превышает потребность в активном угле для осветления ксилозного гидролизата. Себестоимость производства ГАУ составляет 12 тыс. руб./т. При стоимости активированного угля 87 тыс. руб/т, экономия предприятия составит 56 млн руб. в год.

При проведении регенерации активного гранулированного угля из целлолигнина методом парогазовой активации установлено, что оптимальная продолжительность процесса, которая позволяет достичь сорбционной способности регенерированного угля, необходимой для осветления пентозного гидролизата берёзовой древесины, составляет 20 мин. При увеличении продолжительности регенерации ГАУ из целлолигнина его сорбционная способность практически не изменяется.

*Заключение.* Гранулированный активный уголь из целлолигнина по своим физико-химическим свойствам близок к древесному углю и его можно эффективно применять для сорбционной очистки пентозных гидролизатов при производстве ксилита. При сравнении эффективности сорбционной очистки гидролизата берёзовой древесины с использованием в качестве сорбентов ГАУ и БАУ-А было выявлено, что степень осветления гидролизата при использовании ГАУ выше, чем при БАУ-А. При регенерации отработанных ГАУ определена оптимальная продолжительность, которая составила 20 минут. Организация производства ГАУ из целлолигнина непосредственно на предприятии по получению ксилита позволит значительно снизить расходы на сорбционную очистку гидролизата, а следовательно уменьшить себестоимость пищевого кристаллического ксилита и повысить экономическую эффективность ксилитного производства.

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

### **Библиографический список**

*Бахтиярова А.В., Белоусов И.И., Кинд А.В., Романенко К.А., Спицын А.А.* Пиролиз и активация уплотненного целлолигнина // Химическая технология. 2019. Т. 20, № 3. С. 98-103. DOI: 10.31044/1684-5811-2019-20-3-98-103

*Бахтиярова А.В., Денисенко Г.Д.* Технология гидролизных и микробиологических производств. СПб.: СПбГЛТУ, 2018. 44 с.

Выглазов В.В. Технология высококачественного ксилита и других полиолов на основе пентозансодержащего растительного сырья: дисс. ... д-ра техн. наук. СПб., 2004. 602 с.

Дедов И.И., Шестакова М.В., Викулова О.К., Железнякова А.В., Исаков М.А., Сазонова Д.В., Мокрышева Н.Г. Сахарный диабет в Российской Федерации: динамика эпидемиологических показателей по данным Федерального регистра сахарного диабета за период 2010–2022 гг. // Сахарный диабет. 2023. 26(2). С. 104–123. doi.org/10.14341/DM13035

Денисенко Г.Д., Румянцева В.Г., Шурыгина М.С. Исследование процесса обогащения древесины лиственных пород в ксилитном производстве // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2023. № 63. С. 352–355.

Кинд А.В., Кинд В.Б., Выглазов В.В. и др. Ультрафильтрационный мембранный аппарат для очистки гидролизатов растительного сырья // Леса России в XXI веке: матер. четвертой Междунар. науч.-практич. интернет-конференции. Апрель 2010 г. СПб.: ЛТА, 2010. С. 161–166.

Ковернинский И.Н., Комаров В.И., Третьяков С.И. Комплексная химическая переработка древесины: учебник. Архангельск: Изд-во Арханг. гос. техн. ун-та, 2002. 347 с.

Мамбетова С.Р., Бахтиярова А.В., Михайлова А.Е. Анализ рынка ксилита // Тенденции развития науки и образования. 2023. № 100-2. С. 112–114. DOI: 10.18411/trnio-08-2023-88.

Нечаев А.П., Траубенберг С.Е., Кочеткова А.А. и др. Пищевая химия. Изд. 4-е, испр. и доп. СПб.: ГИОРД, 2007. 640 с.

Трофимова Н.Н., Бабкин В.А. Изучение кислотного гидролиза полисахаридов древесины лиственницы для получения кристаллической глюкозы // Химия растительного сырья. 2009. № 3. С. 31–37.

Холькин Ю.И. Технология гидролизных производств. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 496 с.

Armind M., Josúe C., Cristina D., Fabiana S., Yolanda M. Use of activated carbons for detoxification of a lignocellulosic hydrolysate: statistical optimisation // J. EnvironManage. 2021. No. 296. doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113320

Barathikannan K., Agastian P. Xylitol: Production, optimization and industrial application // Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci. 2016. 5. P. 324–339.

Carvalho F., Duarte L.C., Lopes S., Parajó J.C., Pereira H., Gírio F.M. Evaluation of the detoxification of brewery's spent grain hydrolysate for xylitol production by *Debaryomyces hansenii* CCM 941 // Proc. Biochem. 2015. 40. P. 1215–1223. DOI: 10.1016/j.procbio.2004.04.015

Janket S.J., Jaspreet B., Isaac P., Leland K.A., Jukka H.M. Oral and systemic effects of xylitol consumption // Caries Res. 2019. 53. P. 491–501. DOI: 10.1159/000499194

Satyavolu J., Ganesh Dattatreya Tadimeti J., Thilakarathne R. Xylose production and the associated integration for biocoal production // Energy Conversion and Management. 2020. X. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2020.100073

Tavares A.P.M., Gonçalves M.J.A., Brás T., Pesce G.R., Xavier A.M.R.B., Fernandes M.C. Cardoon Hydrolysate Detoxification by Activated Carbon or Membranes System for Bioethanol Production // *Energies*. 2022. 15. 1993. URL: <https://doi.org/10.3390/en15061993>

Umai D., Kayalvizhi R., Kumar V., Jacob S. Xylitol: Bioproduction and Applications // *Front. Sustain*. 2022. Vol. 3. P. 2. DOI: 10.3389/frsus.2022.826190

Vardhan H., Sasmal S., Mohanty K. Detoxification of areca nut acid hydrolysate and production of xylitol by *Candida tropicalis* (MTCC 6192) // *Preparative Biochemistry & Biotechnology*. 2023. P. 1–12 DOI: 10.1080/10826068.2023.2207093

### References

Arminda M., Josúe C., Cristina D., Fabiana S., Yolanda M. Use of activated carbons for detoxification of a lignocellulosic hydrolysate: statistical optimisation. *Journal of Environmental Management*, 2021, no. 296, pp. 1–9

Bahtijarova A.V., Belousov I.I., Kind A.V., Romanenko K.A., Spitsyn A.A. Pyrolysis and activation of compacted lignocellulosic materials. *Chemical Technology*, 2019, vol. 20, no. 3, pp. 98–103. DOI: 10.31044/1684-5811-2019-20-3-98-103. (In Russ.)

Bahtijarova A.V., Denisenko G.D. Technology of Hydrolysis and Microbiological Productions. St. Petersburg: SPbGLTU, 2018. 44 p. (In Russ.)

Barathikannan K., Agastian P. Xylitol: Production, optimization and industrial application. *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.*, 2016, no. 5, pp. 324–339. DOI: 10.20546/ijcmas.2016.509.036.

Carvalho F., Duarte L.C., Lopes S., Parajó J.C., Pereira H., Gírio F.M. Evaluation of the detoxification of brewery's spent grain hydrolysate for xylitol production by *Debaryomyces hansenii* CCMI 941. *Proc. Biochem*, 2005, no. 40, pp. 1215–1223. DOI: 10.1016/j.procbio.2004.04.015.

Dedov I.I., Shestakova M.V., Vikulova O.K., Zheleznyakova A.V., Isakov M.A., Sazonova D.V., Mokrysheva N.G. Diabetes mellitus in the Russian Federation: dynamics of epidemiological indicators according to the Federal Register of Diabetes Mellitus for the period 2010–2022. *Diabetes mellitus*, 2023, no. 26, pp. 104–123. DOI: 10.14341/DM13035. (In Russ.)

Denisenko G.D., Rumyancheva V.G., Shurygina M.S. Issledovanie processa oblagorazhivaniya drevesiny' listvenny'x porod v ksilitnom proizvodstve [Investigation of hardwood refining process in xylitol production]. *Aktual'ny'e problemy' lesnogo kompleksa*, 2023, no. 63, pp. 352–355. (In Russ.)

Janket S.J., Jaspreet B., Isaac P., Leland K.A., Jukka H. M. Oral and systemic effects of xylitol consumption. *Caries Res.*, 2019, no. 53, pp. 491–501. DOI: 10.1159/000499194.

Khol'kin Iu.I. Tekhnologii gidroliznykh proizvodstv [Technology of hydrolysis industries]. M.: Lesn. prom-st', 1989. 496 p. (In Russ.)



Kind A.V., Kind V.B., Vy'glazov V.V. i dr. Ul'trafil'tracionny'j membranny'j apparat dlya ochistki gidrolizatov rastitel'nogo sy'r'ya [Ultrafiltration membrane apparatus for purification of plant raw material hydrolysates ]. *Lesa Rossii v XXI veke: materialy' chetvertoj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy internet-konferencii*. Aprel' 2010 g. SPb.: LTA, 2010, pp. 161–166. (In Russ.)

Koverninskij I.N., Komarov V.I., Tret'jakov S.I. Complex chemical processing of wood. Arhangel'sk: Izd-vo Arhang. gos. tehn. un-ta, 2002. 347 p. (In Russ.)

Mambetova S.R., Bahtijarova A.V., Mihajlova A.E. Analysis of the xylitol market. *Trends in the development of science and education*, 2023, no. 100-2, pp. 112–114. DOI: 10.18411/trnio-08-2023-88. (In Russ.)

Nechaev A.P., Traubenberger S.E., Kochetkova A.A. i dr. Pishhevaya ximiya [Food chemistry] / pod red. A.P. Nechaeva. Izd. 4-e, ispr. i dop. SPb.: GIOR, 2007. 640 p. (In Russ.)

Satyavolu J., Tadimetri J.G.D., Thilakarathne R. Xylose production and the associated integration for bioalcohol production. *Energy Conversion and Management*, 2020, no. 10(1). DOI: 10.1016/j.ecmx.2020.100073.

Tavares A.P.M., Gonçalves M.J.A., Brás T., Pesce G.R., Xavier A.M.R.B., Fernandes M.C. Cardoon Hydrolysate Detoxification by Activated Carbon or Membranes System for Bioethanol Production. *Energies*, 2022, no. 15, pp. 1–15. DOI: 10.3390/en15061993.

Trofimova N.N., Babkin V.A. Study of acid hydrolysis of larch wood polysaccharides to obtain crystalline glucose. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2009, no. 3, pp. 31–37. (In Russ.)

Umai D., Kayalvizhi R., Kumar V., Jacob S. Xylitol: Bioproduction and Applications. *Front. Sustain*, 2022, no. 3, pp. 1–16. DOI: 10.3389/frsus.2022.826190.

Vardhan H., Sasmal S., Mohanty K. Detoxification of areca nut acid hydrolysate and production of xylitol by *Candida tropicalis* (MTCC 6192). *Preparative Biochemistry & Biotechnology*, 2023, no. 53, pp. 1–12. DOI: 10.1080/10826068.2023.2207093.

Vyglazov V.V. Technology of high-quality xylitol and other polyols based on pentosan-containing plant raw materials : diss. ... of PhD in Engineering : 05.21.03 : defense of the thesis 2005-02-15 : approved 2005-03-22. St. Petersburg: 2005. 602 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 05.12.2023

---

**Мамбетова С.Р., Бахтиярова А.В.** Сорбционная очистка ксилитового гидролизата активированным углем из целлюлозы // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 250. С. 353–365. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.353-365

Высокие требования к качеству ксилита обусловлены его применением в пищевой и фармацевтической промышленности. Важной задачей при подготовке

ксилозных растворов к гидрированию является осветление раствора, так как ксилит – это белый кристаллический порошок. Для этих целей применяются сорбционная и флокуляционная очистка получаемых растворов, а также мембранные методы. Наиболее часто используется сорбционная очистка активированным углем, обработка которым эффективна для снижения цветности получаемых растворов. В статье рассмотрена необходимость сорбционной очистки ксилозного гидролизата и представлена сравнительная характеристика эффективности процесса осветления пентозного гидролизата берёзовой древесины гранулированным активным углём (ГАУ) из целлюлигина и древесным активным углём марки БАУ-А. Степень осветления гидролизата при использовании ГАУ выше, чем при БАУ-А, и необходимая цветность достигается при добавлении ГАУ в количестве 17% от СВ гидролизата. Использование ГАУ для сорбционной очистки пентозных гидролизатов позволяет снизить расход сорбентов на осветление гидролизатов в 1,3 раза. Приведены данные по регенерации отработанного ГАУ из целлюлигина при различной продолжительности обработки, а также результаты эффективности осветления ксилозных растворов регенерированными ГАУ. Регенерированные ГАУ пригодны для сорбционной очистки гидролизата. Достаточная продолжительность регенерации составила 20 минут. Организация производства ГАУ из целлюлигина позволит значительно снизить расходы на сорбционную очистку гидролизата и повысить экономическую эффективность ксилитного производства.

**Ключевые слова:** Ксилит, ксилозный гидролиз, целлюлигин, гранулированный активный уголь, сорбционная очистка.

**Mambetova S.R., Bakhtiiarova A.V.** Sorption purification of xylose hydrolysate by activated carbon from cellolignin. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2024, iss. 250, pp. 353–365 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.353-365

High quality requirements for xylitol are due to its use in food and pharmaceutical industries. An important task in preparation of xylose solutions for hydrogenation is solution clarification, since xylitol is a white crystalline powder. For this purpose sorption and flocculation purification of the obtained solutions as well as membrane methods are used. The most commonly used sorption purification is activated carbon, the treatment of which is effective in reducing the color of the solutions obtained. The article considers the necessity of sorption purification of xylose hydrolysate and presents a comparative characterization of the efficiency of the process of clarification of pentose hydrolysate of birch wood by granulated active carbon (GAC) from cellolignin and BAU-A wood active carbon. The degree of clarification of hydrolysate when using GAC is higher than that of BAU-A and the required color is achieved when adding GAC in the amount of 17% of the CB of hydrolysate. The use of GAC for sorption purification of pentose hydrolysates allows to reduce the consumption of

sorbents for clarification of hydrolysates in 1.3 times. The data on regeneration of spent GAC from cellulignin at different duration of treatment, as well as the results of efficiency of clarification of xylose solutions by regenerated GAC are presented. The regenerated GAC are suitable for sorption purification of hydrolysate. Sufficient duration of regeneration was 20 minutes. Organization of production of GAC from cellulignin will significantly reduce the cost of sorptive treatment of hydrolysate and increase the economic efficiency of xylitol production.

**Key words:** xylitol, xylose hydrolysis, cellulignin, granulated active carbon, sorption purification.

---

**МАМБЕТОВА Софья Романовна** – магистрант института химической переработки биомассы дерева и техносферной безопасности Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. ORCID: 0000-0003-4617-7824.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: sofya.mam@icloud.com

**МАНБЕТОВА Sofya R.** – Master's student, St.Petersburg State Forest Technical University, Institute of Chemical Processing of Wood Biomass and Technosphere Safety. ORCID: 0000-0003-4617-7824.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: sofya.mam@icloud.com

**БАХТИЯРОВА Анна Валерьевна** – старший преподаватель кафедры технологии лесохимических продуктов, химии древесины и биотехнологии Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. ORCID: 0000-0002-0480-3156

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

**BAKHTIAROVA Anna V.** – Senior Lecturer of the Department of technology of wood chemical products, wood chemistry and biotechnology, St.Petersburg state Forest Technical University. ORCID 0000-0002-0480-3156.

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

**В.И. Рошин, Н.А. Юрина, Д.С. Миксон, В.П. Короткий, В.А. Рыжов**

**ЭКСТРАКТИВНЫЕ ВЕЩЕСТВА  
ХВОЙНОЙ КОРМОВОЙ ФИТОДОБАВКИ  
И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЖИВОТНЫХ ПРИ СТРЕССАХ**

*Введение.* Современное ведение интенсивного животноводства требует сбалансированного по компонентам общего обмена основного рациона, микро- и макроэлементам, витаминам и профилактическим лекарственным средствам по отношению к патогенам [Некрасов и др., 2018; Головань и др., 2007; Менькин, 1997].

Кроме этого, в процессе развития и в продуктивный период животных сопровождают стресс-факторы: послеродовой, кормовой, период отъема, технологический, поствакционный, санитарный, а также связанные с климатическими условиями, например, тепловой [Tao et al., 2014; Tao et al., 2012], влияющие на продуктивность и качество молока.

Все большее внимание уделяется экологизации сельского хозяйства. Одним из методов повышения адаптивных свойств является стимуляция физиолого-биохимических функций организма животного при помощи БАВ – иммуномодуляторов, витаминов, адаптогенов. Для этих целей приобретает популярность применения фитодобавок – природных источников БАВ [Ford, 2005; Podhorsky et al., 2007; Zenkin et al., 2014].

С 60-х годов прошлого столетия Лесотехническая академия (Проблемная лаборатория по использованию живых элементов дерева) совместно с институтами животноводства разработали несколько препаратов кормовых добавок для сельскохозяйственных животных и птицы. В совхозах, животноводческих фермах работало около 2000 установок получения «Хвойной витаминной муки», «хвойной кормовой муки», препараты из древесной зелени – «Паста хвойная хлорофилло-каротиновая», «Провитаминный концентрат». Исследуемые препараты показали безопасность их использования, улучшения качества продукции и увеличения продуктивности сельскохозяйственных животных и птицы. Было установлено, что по наиболее ценным компонентам – белку, высшим жирным кислотам, углеводам и витаминам, хлорофиллу и другим компонентам хвоя превосходит или не уступает сене [Солодкий и др., 1969; Калниньш, 1978; Репях и др., 1988]. Несмотря на по-

ложительный результат проведенных исследований в 60–80 годы прошлого столетия, в современных условиях требуют препараты, отвечающие последним научным достижениям в области подготовки кормов и технологиям кормления. Исходя из современных требований кормления животных, СПбГЛТУ, ООО НТЦ «Химинвест» и рядом научных учреждений сельскохозяйственного профиля была изготовлена кормовая хвойная энергетическая добавка к основному рациону крупному рогатому скоту (КРС). Проведенные исследования показали положительное влияние кормовой добавки ХЭД на увеличение продуктивности стада, улучшения качества молока и показателей рожденных телят, снижения заболеваний в процессе отела [Zenkin et al., 2014; Короткий и др., 2013; Короткий и др., 2017].

Но отсутствовали сведения о составе БАВ новой добавки, влияния технологических параметров на состав ХЭД и её нативность, а также влияния на некоторые стресс-факторы и, в частности, на тепловой стресс.

*Цель исследования* – изучение состава соединений хвойной энергетической фитодобавки, изготовленной в производственных условиях ООО НТЦ «Химинвест», и основных показателей продуктивности и качества молочной продукции, зоотехнических и физиолого-биохимических показателей сельскохозяйственных животных в условиях температурного стресса и отела.

*Материалы и методика исследования.* Исходная древесная зелень (ДЗ) сосны обыкновенной, взятая на изготовление партии хвойной фитодобавки (ХЭД) содержала 72% хвои и 28% побегов диаметром 5–7 мм, заготовленной в 130 км западнее Нижнего Новгорода. Содержание экстрактивных веществ, извлекаемых из измельченной ДЗ, определяли экстракцией в аппарате Сокслета, в качестве экстрагента использовали пропанол-2 (изопропиловый спирт, ИП). После отгонки растворителя экстракт последовательно экстрагировали петролейным эфиром (ПЭ, пределы кипения 40–70 °С), затем диэтиловым эфиром (ДЭ). К остатку добавляли воду, доводили общий объем остатка в воде до 500 мл, отбирали по 20 мл водного раствора остатка экстрактивных веществ, упаривали досуха на водяной бане, затем сушили в шкафу при  $105 \pm 2$  °С до постоянной массы. Количество веществ, экстрагируемых ИП и остатка водорастворимых веществ, после экстракции ПЭ и ДЭ рассчитывали с учетом объема раствора [Роцин, 1995; Колодынская и др., 1984]. Влажность исходной ДЗ и твердого остатка ХЭД определяли перед экстракцией на влагомере.

Вещества, растворимые в ПЭ, разделили на группу кислот и неомыляемых веществ. Щелочной гидролиз (0,5М раствор гидроксида калия в этаноле) проводили в течение 30 минут при температуре кипения этанола

[Рощин и др., 1983]. Продукты гидролиза разделили на сумму кислот и неомыляемые вещества и в отличие от работы [Рощин и др., 1983] на производные хлорофилла. После отгонки 2/3 этанола продукты гидролиза перенесли в делительную воронку, подкислили 12% серной кислотой до  $\sim \text{pH}-3$ , кислоты и неомыляемые вещества экстрагировали ПЭ (1:2) в три приема. Осадок хлорофиллиновых кислот в этих условиях располагался между кислой водой и ПЭ. После отделения ПЭ остаток экстрагировали ДЭ, раствор хлорофиллиновых кислот в ДЭ промывали водой до  $\text{pH}-7$ , сушили сернокислым натрием безводным, эфир отгоняли, остаток взвешивали. Раствор ПЭ, с суммой кислот и неомыляемых веществ, разделили на кислоты и неомыляемые вещества по кислотнo-щелочной схеме [Рощин и др., 1983]. Содержание производных хлорофилла в осадке хлорофиллиновых кислот и каротиноидов в неомыляемых веществах определяли спектрофотометрически на приборе UV-VIS2104PC при длине волны 665 нм (изопропанол) и 440 нм (гексан) соответственно.

Хвойную фитодобавку (ХЭД) [Рыжов и др., 2014] разделили на жидкую (раствор экстрактивных веществ в глицерине) и твердую (измельченная ДЗ) части. ДЗ промыли на фильтре водой, промывные воды присоединили к раствору глицерина, а ДЗ экстрагировали в аппарате Сокслета. Полученный ИП-экстракт из ДЗ после отгонки ИП и водно-глицериновый экстракт ХЭД обрабатывали последовательно ПЭ (40–70 °C) и ДЭ, так же как и ИП-экстракт из исходной ДЗ. Полученные ПЭ-экстракты разделили на сумму кислот, неомыляемые вещества и хлорофиллиновые кислоты аналогично экстракту из исходной ДЗ. Состав кислотной фракции исходной ДЗ и из ХЭД в виде метиловых эфиров (диазометан) устанавливали методом хроматомасс-спектрометрии. Хроматомасс-спектрометр «Agilent Technologies» 5973/6890; детектор-квадрупольный масс-спектрометр; энергия ионизации 70 эВ; режим регистрации полного ионного тока; деление потока 1:100; газ-носитель – гелий, 1 мл/мин. Колонка капиллярная HP-5MS; длина колонки 30 м, внутренний диаметр 0,25 мм. Состав кислот идентифицировали сравнением масс-спектров пиков соединений с данными масс-спектров известных соединений банка данных NIST 0.5.L. и WILEY 275.L., а также с выделенными и идентифицированными ранее соединениями из хвои сосны обыкновенной: кислоты лабданового типа 4-эпизмбрикаталового и антикапалового рядов, окисленные дитерпеновые кислоты дегидроабетинового и абетинового рядов [Рощин и др., 1985; Васильев и др., 1991].

Опыт на глубококостельных и новательных коровах проведен в СПК «Лиманский» Краснодарского края в июле – августе 2018 года, в условиях

экстремально высоких температур воздуха: в тени до 42 °С, среднесуточная 32,7±0,6 °С. Для опыта отобраны методом пар-аналогов три группы коров по 10 голов в каждой за 1,5 месяца до отела. Опыт продолжался до достижения 90 дней лактации. Первая группа животных получала только основной рацион (ОР), вторая – ОР + ХЭД по 150 г/гол за 15 дней до отела и месяц после, третья – ОР + ХЭД 300 г/гол соответственно.

В ходе исследования изучали молочную продуктивность, потери жировой массы при лактации, биохимические показатели сыворотки крови в конце опытного периода, влияние ХЭД на продуктивность и поведение животных в период теплового стресса по содержанию количества адреналина и кортизола в образцах крови радиоиммунологическим методом. Кровь животных брали у 3 голов – аналогов из каждой группы, утром до кормления из под хвостовой вены. Кровь исследовали на автоматическом гематологическом анализаторе MicroCC-20Plus и биохимическом анализаторе Хумалайзер 2000. Обработка полученных результатов исследования проведена методами математической статистики с использованием программы «Статистика», версия 2,6. Разницу по средним показателям между группами считали достоверной при уровне вероятности ( $P=0,05$ ), определенной по критерию Стьюдента.

*Результаты исследования.* Опытный образец ХЭД к основному рациону крупного рогатого скота (КРС), полученного в производственных условиях ООО НТЦ «Химинвест» в количестве 2,55 кг, фильтрованием разделили на жидкую – 2, 11 кг и твердую – измельченную ДЗ, части. Твердую часть ХЭД дополнительно промыли на фильтре 1,0 л воды и получили осадок 0,204 кг в пересчете на сухое вещество. Промывные воды объединили с жидкой частью ХЭД. Твердый остаток экстрагировали ИП в аппарате Сокслета. ИП-экстракт содержал 45,1 г (22,1% от массы сух. твердой части) экстрактивных веществ. Исходную измельченную ДЗ в количестве 0,480 кг (влажность – 51%) аналогично экстрагировали ИП. Выход сухого остатка ИП-экстракта составил 72,4г (30,8% от массы сух.сырья).

Экстрактивные вещества ИП из исходной ДЗ и твердой части ХЭД экстрагировали ПЭ. Получено 27,0г (60,2% от массы ИП-экстракта твердой части ХЭД) и 37,7 г (51,5% от массы ИП-экстракта исходной части ДЗ соответственно). Жидкую часть ХЭД, объединенную с промывной водой 3,04 кг также экстрагировали ПЭ и выделили 2,05 г экстрактивных веществ, которые по данным ТСХ были близки к экстрактивным веществам из твердого остатка ХЭД, их объединяли, общая масса экстрактивных веществ, растворимых в ПЭ из ХЭД, составила 29,1 г.

После экстракции ПЭ остатки ИП-экстрактов из твердой части ХЭД и исходной ДЗ экстрагировали ДЭ. Выход веществ, растворимых в ДЭ, со-

ставил 2,28 г (4,3% от массы ИП-экстракта твердого остатка ХЭД) и 3,69 г (5,1% от массы ИП-экстракта исходной ДЗ). Из жидкой части ХЭД также выделили ДЭ 2,03г экстрактивных веществ. Общее количество экстрактивных веществ из ХЭД, растворимых в ДЭ, составило 4,31г.

Исходя из результатов исследования содержания экстрактивных веществ, растворимых в ПЭ исходной ДЗ (15,9% от массы сухого сырья), и экстрактивных веществ из ХЭД следует, что наименее полярная группа соединений ДЗ (липиды) осталась в твердом остатке (13,2% от массы сухого твердого остатка) и только небольшая часть соединений исходной ДЗ перешла в экстракт – 1,1% от массы исходной сухой ДЗ. Общий баланс экстрактивных веществ, растворимых в ПЭ, из исходной ДЗ и ПЭ-экстракта из твердой и жидкой частей ХЭД близок и составляет соответственно 15,9% и 14,3% от массы сухого сырья.

Вещества, растворимые в ДЭ, распределились в ХЭД в твердой и жидкой части более равномерно, а суммарное их содержание оказалось выше- 2,11% от массы сухой ДЗ, чем определенное в исходной ДЗ (1,57% от массы сухой ДЗ). Это объясняется наличием в ДЗ более полярной части экстрактивных веществ, чем липиды – ароматическими соединениями: производные коричных кислот, флавоноиды, лигнаны и др. [Рошин и др., 1995]. Ожидаемо, что эта часть экстрактивных веществ будет более растворима в водно-глицериновом экстракте, чем липиды.

Вещества, растворимые в ПЭ из исходной ДЗ и ХЭД разделили на группы соединений – производные хлорофилла, сумму кислот и неомыляемые вещества, в которых определили содержание каротиноидов. Результаты исследования групповых экстрактов приведены в табл.1.

Таблица 1

**Групповой состав экстрактивных веществ, растворимых в ПЭ из исходной древесной зелени и хвойной кормовой добавки (ХЭД)**

**Group composition of extractives from PE extract of woody greens and the feed additive**

№ п/п	Группа веществ	Содержание, % от массы экстрактивных веществ	
		исходная ДЗ	хвойная кормовая добавка
1	Кислоты	67,3	70,1
2	Неомыляемые вещества, в т. ч. каротиноиды	28,4 0,92(417)*	26,8 0,84 (323)*
3	Производные хлорофилла	3,60 (5702)*	2,34(3330)*

Примечание: \* в скобках – в мг/1 кг исходной ДЗ и мг/1кг ХЭД



Из результатов определения групповых составов экстрактивных веществ, растворимых в ПЭ, из исходной ДЗ и ХЭД следует, что составы липидной части экстрактивных веществ достаточно близки. Состоят на 67–70% из кислот и 26–28% из неомыляемых веществ. Технологический процесс изготовления ХЭД позволяет обеспечить достаточно высокий уровень производных хлорофилла и каротиноидов в продукте. Состав кислот определили в исходной ДЗ и ХЭД в виде метиловых эфиров (диазометан) методом хроматомасс-спектрометрии. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Состав кислот исходной ДЗ и ХЭД (% площади пика компонента от суммы площадей метиловых эфиров кислот)**

**Composition of the acids from the woody greens and the feed additive (% peak area of the component from the sum of areas of methyl esters of acids)**

Кислоты	ДЗ	ХЭД	
		из сухого остатка	из жидкой части
Лауриновая	0,5	0,4	Следы
Миристиновая	0,6	0,3	Следы
Х	0,7	Следы	–
Пальмитолеиновая	0,2	0,3	Следы
Пальмитиновая	5,4	4,5	3,5
14-Метилпальмитиновая	0,4	0,3	Следы
Х <sub>2</sub>	0,3	Следы	–
6,9,12- Октадекатриеновая	2,1	0,2	0,5
Х <sub>3</sub>	0,7	Следы	–
Линолевая	8,1	6,5	3,2
Линоленовая	9,9	9,0	5,2
Олеиновая	2,5	–	4,0
Стеариновая	0,4	0,5	Следы
Х <sub>4</sub>	0,2	Следы	–
13-Эпиманоилоксид-19-овая	2,4	1,5	Следы
Пимаровая	2,5	1,5	0,5
Сандаракопимаровая	1,0	0,5	Следы

Окончание табл. 2

Кислоты	ДЗ	ХЭД	
		Из сухого остатка	Из жидкой части
5,11,14-Эйкозатриеновая	1,3	0,4	Следы
7,11,14-Эйкозатриеновая	0,5	0,2	Следы
Изопимаровая	4,4	3,5	4,0
Левопимаровая	1,5	Следы	0,2
Дегидроабиетиновая	11,4	8,0	11,9
Абиетиновая	7,0	5,5	2,2
18- Гидроксиантикопаловая	0,9	0,5	Следы
Неоабиетиновая	2,9	1,1	1,5
Пинифоловая + 18-Метилпинифоловая	21,0	24,3	50,9
15- Гидрокси - дегидроабиетиновая	1,6	0,3	3,9
Бегеновая	1,9	0,5	Следы
15- Гидроксиабиетиновая	0,9	0,2	2,1
7-Гидрокси - дегидроабиетиновая	2,5	0,6	0,5
7-Кетодегидроабиетиновая	1,1	0,4	0,2

Из результатов определения состава кислот липидной части исходной ДЗ и ХЭД следует, что по качественному составу соединений исследуемые образцы кислот близки и несколько отличаются по составу компонентов. В кислотах из ХЭД в меньшем количестве представлены  $C_{18}$  и  $C_{20}$  кислоты и в большем количестве определены трициклические дитерпеновые и бициклические (лабдановые) кислоты.

Основными компонентами кислот среди высших жирных кислот являются незаменимые кислоты линолевая, линоленовая и олеиновая. В меньшем количестве присутствуют пальмитолеиновая и важные для арахидонового каскада ненасыщенные  $C-20$  кислоты.

Среди трициклических дитерпеновых кислот основные компоненты: дегидроабиетиновая, абиетиновая и изопимаровая кислоты. Основными компонентами являются пинифоловая и монометиловый эфир пинифоловой кислоты, которые при метилировании дают один компонент – диметиловый

эфир пинифоловой кислоты (кислоты 4-эпиимбрикатового ряда лабданового типа). В меньшем количестве представлены кислоты антикопалового ряда. Ранее идентифицированные представители лабдановых кислот были определены только в хвое сосны обыкновенной [Роцин и др., 1985] и их присутствие является хематаксоническим признаком этого вида древесного растения и, соответственно, сырьевого источника – древесной зелени.

В литературе [Толстиков и др., 2011; Pferschy-Wenzig et al., 2018; Cronzalez et al., 2009; Iwamoto et al., 2003; Obbord et al., 1997; Fujita et al., 1980; Zhebrun et al., 2008] приведено значительное количество работ по изучению биологической активности дитерпеновых кислот. Установлено, что идентифицированные дитерпеновые кислоты относят к малоопасным веществам (практически все нетоксичны к клеткам млекопитающих животных и человека), но обладают высокой бактерицидной, вирулицидной и фунгицидной активностями по отношению к многим патогенам. Показано, что сумма кислот активна по отношению к бактериям *Helicobacter pylori* [Zhebrun et al., 2008; Zhebrun et al., 2012]. Сумма дитерпеновых кислот, содержащихся в препарате, 10 мг/мл показала ингибирующую активность близкую к антибиотику амоксицилину и значительно превосходила эффективность метронидазола. Полученные результаты, по мнению авторов, свидетельствуют о перспективности применения препарата в профилактике, комплексной и монотерапии, обладающего низкой токсичностью, антиоксидантными свойствами и широким спектром антимикробного действия.

Аналогичную высокую антипротозойную активность показал препарат, содержащий дитерпеновые кислоты, по отношению к жгутиковым и безжгутиковым формам *Trichomonas vaginalis* [Zhebrun et al., 2012; Kulyashova et al., 2019]. Установлено, что абиетиновая кислота проявляет противовоспалительное действие, связанное с её способностью подавлять экспрессию фактора некроза (ФНО- $\alpha$ , TNF- $\alpha$ ) и циклооксигеназы-2 (COX-2), вовлеченных в процесс воспаления макрофагов, возбуждают рецепторы пероксисомы, активирующие их полиферацию [Pferschy-Wenzig et al., 2018]. В сравнении с преднизолоном абиетиновая кислота показала одинаковую противовоспалительную активность на модели защиты от экземы, вызываемой каррагенином ингибирование плазмы простагландином E<sub>2</sub>. Обладая близкой к медицинским препаратам противовоспалительным эффектом, абиетиновая кислота значительно менее токсична по отношению к млекопитающим. Известны и другие активности дитерпеновых кислот по отношению к возбудителям различных заболеваний, в том числе и онкологических [Cronzalez et al., 2009; Iwamoto et al., 2003; Obbord et al., 1997; Fujita et al., 1980; Salminen et al., 2008; Son, 2005].

Полученная ХЭД в производственных условиях ООО НТЦ «Химинвест» использовалась в опытах на стельных и новостельных коровах при экстремально высокой температуре воздуха (июль-август месяцы, до 42 °С в тени, среднесуточная 32,7±0,6 °С). При отеле коровы подвергаются послеродовому стрессу. Высокие температуры воздуха в летний период оказывают также стресс, который в период лактации влияет на качество молока и продуктивность КРС. В период отела оба стресса накладываются и под их воздействием запускаются нейрогуморальные механизмы, направленные для устранения их негативного влияния. В этот период отмечена повышенная секреция кортизола, адреналина и мочевины в крови животных. Кортизол выполняет функцию мобилизации питательных веществ в организме во время стресса: белки организма распадаются до аминокислот (в том числе и мышечные), а гликоген – до глюкозы. Уровень аминокислот и глюкозы повышается в крови для того, чтобы в экстренной ситуации обеспечить организм строительным и энергетическим материалом для восстановления поврежденных систем.

При скармливании ХЭД установлено снижения воздействия стресс-факторов, которое проявилось в достоверном снижении содержания кортизола в крови животных на 1,7% – 5,9% ( $P \leq 0,05$ , на 90-й день лактации), адреналина на 4,7–8,4% ( $P \leq 0,05$ ) и в сыворотке крови мочевины на 5,2 – 8,5% ( $P \leq 0,05$ ) относительно контроля и в зависимости от количества добавляемой ХЭД к основному рациону. Наилучшие показатели достигнуты при скармливании 300 г ХЭД на голову коров.

В опытных группах наблюдалось улучшение обмена веществ по сравнению с контролем: определено повышение содержание общего белка в сыворотке крови животных на 1,4–3,3%, глюкозы – на 6,0–19,8%, снижение холестерина на 11,8–18,4%, билирубина на 10,1–22,1%, аспартатами-нотрансферазы (АСТ) и аланинаминотрансферазы (АЛТ) на 2,6–15,3%. Улучшились некоторые гематологические показатели крови: увеличилось содержание эритроцитов на 1,0–2,0%, гемоглобина на 1,5–5,7%, гематокрита на 1,2–2,0% и снизилось содержание лейкоцитов на 1,5–2,0%.

Кроме биохимических и гематологических показателей, в сыворотке крови определены некоторые показатели неспецифического иммунитета. Определено увеличение фагоцитарной активности у коров опытных групп на 12,2–17,3%, концентрации лизоцима на 11,7–18,5% и бактерицидной активности крови на 0,8–1,4%.

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

### Библиографический список

Васильев С.Н., Роцин В.И., Выродов В.А. Состав экстрактивных веществ древесной зелени сосны обыкновенной. М.: ВНИПИЭИЛеспром, 1991. 72 с.

Головань В.Т., Подворок Н.И., Сыроваткин М.И. Прогрессивные технологии выращивания молодняка крупного рогатого скота // Научные труды ГНУ ВНИИМЖ Россельхозакадемии. 2007. Т. 17. № 2. С. 225–234.

Калниньш А.Я. Лес – сельскому хозяйству: Пр-во и применение продуктов перераб. древес. отходов / под ред. А.Я. Калниньша. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 192 с.

Колодынская Л.А., Разина М.Ю., Роцин В.И., Соловьев В.А. О различии в групповом составе экстрактивных веществ хвои и побегов сосны обыкновенной // Химия древесины. 1984. № 5. С. 74–78.

Короткий В.П., Казанцев О.А., Есипович А.Л. Биологически активные кормовые добавки на основе древесной зелени // Современные тенденции в сельском хозяйстве : II Междунар. науч. Интернет-конференция. Казань. 2013. Т. 2. С. 103–104.

Короткий В.П., Рыжов В.А., Зенкин А.С. Антистрессовая фитонцидная кормовая добавка (иммуномодулятор) для животных // Сборник научных трудов Северо-Кавказского научно-исследовательского института животноводства. 2017. Т. 6, № 2. С. 195–200.

Менькин В.К. Кормление сельскохозяйственных животных. М.: Колос, 1997. 250 с.

Некрасов Р., Аникин А., Чабаев М., Головин А. Принципы нормирования комбикормов – концентратов в рационах коров // Комбикорма. 2018. № 2. С. 30–34.

Репях С.М., Левин Э.Д. Кормовые добавки из древесной зелени. М.: Лесн. пром-сть, 1988. 96 с.

Роцин В.И. Состав, строение и биологическая активность терпеноидов из древесной зелени хвойных растений: автореф. дис. ... д-ра. хим. наук. СПб., 1995. 35 с.

Роцин В.И., Баранова Р.А., Белоозерских О.А., Соловьев В.А. Состав экстрактивных веществ хвои и побегов ели европейской // Химия древесины. 1983. № 4. С. 56–61.

Роцин В.И., Колодынская Л.А., Разина Н.Ю., Соловьев В.А. Трициклический дитерпеновые кислоты из обесхвоенных побегов сосны обыкновенной // Химия древесины. 1985. № 2. С. 106–107.

Рыжов В.А., Рыжова Е.С., Короткий В.П. и др. Хвойно-энергетическая кормовая добавка для животноводства // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2014. № Т26. С. 346–350.

Слодкий Ф.Т., Хинич В.И. О применении хвои и продуктов из нее в качестве биоактивных подкормок в животноводстве. Использование живых элементов дерева. 1969. Вып. 1. С. 119–125.

Толстиков Г.А., Толстикова Т.Г., Шульц Э.Э., Толстиков С.Е., Хвостов М.В. Новосибирск: Гео, 2011. 395 с.

Cronzalez M.A., Correa-Royero J., Agudelo L., Mesa A., Betaneur-Galvis L. Synthesis and biological evaluation of abietic acid derivatives // Eur. J. Med. Chem. 2009. Vol. 44. P. 2468–2472.

Ford S. Effects of early gestational undernutrition in the cow on fetal growth and placentomal composition // Journal of Animal Science. 2005. Vol. 83, no. 1. P. 297.

Fujita J., Sempuku K., Kitaguchi K., Mori T., Murai H., Yoshikuni J., Enomoto H., Loser R. New Hypocholesterolemic Abietamide Derivatives. 1. Structure – activity relationship // Chem. Pharm. Bull. 1980. Vol. 28, no. 2. P. 453–458.

Iwamoto M., Minami T., Tokuda H., Ohtsu H., Tanaka R. Potential antitumor promoting diterpenoids from the stem bark of *Thuja standishii* // Planta Medica. 2003. Vol. 69. P. 69–72.

Kulyashova L., Roschina N., Nikitina T., Soultanov V. Antiprotozoal activity of Conifer Green Needle Complex against *Trichomonas vaginalis* // Nat. Prod. Commun. 2019. 14(1). P. 147–150

Obbord E.A., Mac K., Avanti O., Pfeiser A.M.A. Mechanism involved in the chemoprotective effects of rosemary extract studied in human liver and bronchid cells // Cancer Lett. 1997. Vol. 114. P. 275–281.

Pferschy-Wenzig E.M., Kunert O., Presser A., Bauer R. In vitro anti-inflammatory activity of larch (*Larix decidua* L.) sawdust // J. Agric. Food Chem. 2018. Vol. 56. P. 11688–11693.

Podhorsky A., Pechova A., Dvorak R., Paviata L. Metabolic disorders in dairy calves in postpartum period // Acta Veterinaria Brno. 2007. Vol. 76. P. 45–53.

Roschin V.I., Soultanov V.S., Zhebrun A.B., Nikitina T.V., Kuliashova L.B. Medicinal agent exhibiting antiprotozoal activity to *trichomonas vaginalis* in an in-vitro model system // US patents US 9,669,061 B2, 2017.

Salminen A., Lehtonen M., Suuronen T. et al. Terpenoids: natural inhibitors of NK-kB signaling with anti-inflammatory and anticancer potential. *Cell. Mol. Life Sci.* 2008. 65. P. 2979–2999.

Son K.H., Oh H.M., Choi S.K. et al. Anti-tumor abietane diterpenes from the cones of *Sequoia sempervirens* // Bioorg. Med. Chem. Lett. 2005. 15. P. 2019–2021.

Tao S., Monteiro A.P.A., Hayen M.J., Dahl G.E. Maternal heat stress during the dry period alters postnatal whole – body insulin response of calves / Journal of Dairy Science. 2014. Vol. 97. P. 897–901.

Tao S., Monteiro A.P.A., Thompson I.M., Hayen M.J., Dahl G.E. Effect of late – gestation maternal heat stress on growth and immune function of dairy calves // Journal of Dairy Science. 2012. Vol. 95. P. 7128–7136.

Zenkin A.S., Kindyaev V.M., Jedelkin A.V., Korotky V.P., Ryzhov V.A., Roschin V.I. Evaluation of the influence of original conifer-energy feed additive on productivity and metabolism of young cattle // Biol. Med. 2014. Vol. 6, no. 1. BM -004-14.

Zhebrun A.B., Soultanov V.S., Svarval A.V. et al. Study of effect of «Bioeffective A» substance on *Helicobacter Bacteria* (*Helicobacter Pylori* type) using an in vitro model // Proceedings of the International Conference, Institute Pasteur; June 2008; St. Petersburg. Russia. 2008. P. 120.

Zhebrun A.B., Soultanov V.S., Svarval A.V. et.al. Evaluation of the effect of a plant origin therapeutic substance from conifer needles, Bioeffective® A, in relation to bacteria of Helicobacter Genus (Helicobacter pyloriType) using in vitro model, compared with traditional antimicrobial drugs, in Proceedings of the ACM Australian Society for Microbiology Annual Scientific Meeting, Brisbane, Australia, July 2012.

## References

Cronzalez M.A., Correa-Royero J., Agudelo L., Mesa A., Betaneur-Galvis L. Synthesis and biological evaluation of abietic acid derivatives. *Eur. J. Med. Chem.*, 2009, vol. 44, pp. 2468–2472.

Ford S. Effects of early gestational undernutrition in the cow on fetal growth and placentomal composition. *Journal of Animal Science*, 2005, vol. 83, no. 1, p. 297.

Fujita J., Sempuku K., Kitaguchi K., Mori T., Murai H., Yoshikuni J., Enomoto H., Loser R. New Hypocholesterolemic Abietamide Derivatives. 1. Structure – activity relationship. *Chem. Pharm. Bull.*, 1980, vol. 28, no. 2, pp. 453–458.

Golovan V.T., Podvorok N.I., Syrovatkin M.I. Progressive technologies for raising young cattle. *Scientific works of the State Scientific Institution VNIMZH of the Russian Agricultural Academy*, 2007, vol. 17, no. 2, pp. 225–234. (In Russ.)

Iwamoto M., Minami T., Tokuda H., Ohtsu H., Tanaka R. Potential antitumor promoting diterpenoids from the steam bark of Thuja standishii. *Planta Medica*, 2003, vol. 69, pp. 69–72.

Kalnins A.Ya. Forest – agriculture: Production and use of processed products. wood Waste / ed. AND I. Kalninsha. M.: Lesn. industry, 1978. 192 p. (In Russ.)

Kolodynskaya L.A., Razina M.Yu., Roshchin V.I., Soloviev V.A. On the difference in the group composition of extractive substances of Scots pine needles and shoots. *Chemistry of wood*, 1984, no. 5, pp. 74–78. (In Russ.)

Korotkiy V.P., Kazantsev O.A., Esipovich A.L. Biologically active feed additives based on tree greens. *Modern trends in agriculture: II International Scientific Internet Conference*. Kazan, 2013, vol. 2, pp. 103–104. (In Russ.)

Korotkiy V.P., Ryzhov V.A., Zenkin A.S. Anti-stress phytoncidal feed additive (immunomodulator) for animals. *Collection of scientific papers of the North Caucasus Research Institute of Animal Husbandry*, 2017, vol. 6, no. 2, pp. 195–200. (In Russ.)

Kulyashova L., Roschina N., Nikitina T., Soultanov V. Antiprotozoal activity of Conifer Green Needle Complex against Trichomonas vaginalis. *Nat. Prod. Commun.*, 2019, 14(1). pp. 147–150.

Menkin V.K. Agricultural feeding animals. M.: Kolos, 1997. 250 p. (In Russ.)

Nekrasov R., Anikin A., Chabaev M., Golovin A. Principles of rationing of mixed feed – concentrates in cow diets. *Mixed feed*, 2018, no. 2, pp. 30–34. (In Russ.)

Obbord E.A., Mac K., Avanti O., Pfeiser A.M.A. Mechanisms involved in the chemoprotective effects of rosemary extract studied in human liver and bronchid cells. *Cancer Lett.*, 1997, vol. 114, pp. 275–281.

Pferschy-Wenzig E.M., Kunert O., Presser A., Bauer R. In vitro anri-inflammatory activity of larch (*Larix decidua* L.) sawdust *J. Agric.Food Chem.*, 2018, vol. 56, pp. 11688–11693.

Podhorsky A., Pechova A., Dvorak R., Paviata L. Metabolic disorders in dairy calves in postpartum period. *Acta Veterinaria Brno*, 2007, vol. 76, pp. 45–53.

Repyakh S.M., Levin E.D. Feed additives from tree greens. M.: Forest industry, 1988, 96 p. (In Russ.)

Roschin V.I., Soultanov V.S., Zhebrun A.B., Nikitina T.V., Kuliashova L.B. Medicinal agent exhibiting antiprotozoal activity to trichomonas vaginalis in an in-vitro model system. US patents US 9,669,061 B2, 2017.

Roshchin V.I. Composition, structure and biological activity of terpenoids from green wood of coniferous plants: Author's abstract: diss. ... dr. chem. Sci. St. Petersburg, 1995. 35 p. (In Russ.)

Roshchin V.I., Baranova R.A., Beloozerskikh O.A., Soloviev V.A. Composition of extractive substances of Norway spruce needles and shoots. *Chemistry of wood*, 1983, no. 4, pp. 56–61. (In Russ.)

Roshchin V.I., Kolodynskaya L.A., Razina N.Yu., Soloviev V.A. Tricyclic diterpene acids from deconiferous shoots of Scots pine. *Chemistry of wood*, 1985, no. 2, pp. 106–107. (In Russ.)

Ryzhov V.A., Ryzhova E.S., Korotkiy V.P. and others. Coniferous-energy feed additive for livestock. *Scientific and methodological electronic journal «Concept»*, 2014, no. T26, pp. 346–350. (In Russ.)

Salminen A., Lehtonen M., Suuronen T. et al. Terpenoids: natural inhibitors of NK-kB signaling with anti-inflammateri and anticancer potencial. *Cell. Mol. Life Sci.*, 2008, 65, pp. 2979–2799.

Solodky F.T., Khinich V.I. On the use of pine needles and products made from them as bioactive fertilizers in animal husbandry. *Using living wood elements*, 1969, iss. 1, pp. 119–125. (In Russ.)

Son K.H., Oh H.M., Choi S.K et.al. Anti-tumor abietane deterpenes from the cones of Sequoia semprevirens. *Bioorg. Med. Chem. Lett.*, 2005, 15, pp. 2019–2021.

Tao S., Monteiro A.P.A., Hayen M.J., Dahl G.E. Maternal heat stress during the dry period alters postnatal whole – body insulin response of calves. *Journal of Dairy Science*, 2014, vol. 97, pp. 897–901.

Tao S., Monteiro A.P.A., Thompson I.M., Hayen M.J., Dahl G.E. Effect of late – gestation maternal heat stress on growth and immune function of dairy calves. *Journal of Dairy Science*, 2012, vol. 95, pp. 7128–7136.

Tolstikov G.A., Tolstikova T.G., Shultz E.E., Tolstikov S.E., Khvostov M.V. Novosibirsk: Publishing House «Geo», 2011. 395 p. (In Russ.)

Vasiliev S.N., Roshchin V.I., Vyrodov V.A. Composition of extractive substances from the green wood of Scots pine. M.: VNIPIEILesprom, 1991. 72 p. (In Russ.)



Zenkin A.S., Kindyaev V.M., Jedelkin A.V., Korotky V.P., Ryzhov V.A., Roschin V.I. Evaluation of the influence of original conifer-energy feed additive on productivity and metabolism of young cattle. *Biol. Med.*, 2014, vol. 6, no. 1. BM-004-14.

Zhebrun A.B., Soultanov V.S., Svarval A.V. et. al. Study of effect of «Bioeffective A» substance on Helicobacter Bacteria (Helicobacter Pylori type) using an in vitro model. Proceedings of the International Conference, Institute Pasteur; June 2008. St. Petersburg, Russia, p. 120.

Zhebrun A.B., Soultanov V.S., Svarval A.V., et.al. Evaluation of the effect of a plant origin therapeutic substance from conifer needles, Bioeffective® A, in relation to bacteria of Helicobacter Genus (Helicobacter pylori Type) using in vitro model, compared with traditional antimicrobial drugs,” in Proceedings of the ACM Australian Society for Microbiology Annual Scientific Meeting, Brisbane, Australia, July 2012.

*Материал поступил в редакцию 21.03.2024*

---

**Роцин В.И., Юрина Н.А., Миксон Д.С., Короткий В.П., Рыжов В.А.** Экстрактивные вещества хвойной кормовой фитодобавки и их влияние на продуктивность сельскохозяйственных животных при стрессах. // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 250. С. 366–382. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.366-382

Представлены результаты исследования исходной древесной зелени – отхода лесозаготовки и полученной из неё хвойной кормовой добавки, определено влияние хвойной кормовой добавки на продуктивность и качество молочной продукции, физиолого-биохимические показатели животных в период стрессовых факторов – повышенной температуры воздуха и отела. Цель исследования – изучение состава групп веществ и соединений фракции кислот исходной древесной зелени и хвойной кормовой добавки, изготовленной в производственных условиях: основных показателей продуктивности и качества молочной продукции, зоотехнических и физиолого-биохимических показателей сельскохозяйственных животных в условиях температурного стресса и отела. Исследовали среднюю пробу исходной древесной зелени, побеги с хвоей – отход лесозаготовки и изготовленную в производственных условиях ООО НТЦ «Химинвест» хвойную кормовую добавку. Кормовую добавку разделили на твердую и жидкую части. Исходную древесную зелень и твердую часть кормовой добавки экстрагировали пропан-2-олом, остаток последовательно экстрагировали углеводородным экстрагентом (пределы кипения 40–70 °С) и диэтиловым эфиром. Жидкую часть кормовой добавки аналогично экстрагировали углеводородами и диэтиловым эфиром. В углеводородном экстракте определяли основные группы веществ – сумму смоляных и высших жирных кислот, неомыляемые вещества, содержание производных хлорофилла и

каротиноидов. Состав соединений кислот идентифицировали методом ГХ-МС. Результаты исследования показали, что составы групп веществ исходной древесной зелени и изготовленной хвойной кормовой добавки близки. Параметры технологического процесса изготовления кормовой добавки не оказывают влияния на нативность получаемой продукции. Использование хвойной кормовой добавки в период экстремально высоких температур воздуха (до 42 °С) в тени и отела снижало в крови содержание кортизола (на 1,7–5,9%), адреналина на (4,7–8,4%), мочевины (на 5,2–8,5%), повышало содержание общего белка (на 1,2–3,3%) и глюкозы (на 6,2–19,5%) при сравнении с контрольной группой животных. Полученные результаты исследования позволяют положительно оценить влияние хвойной кормовой добавки на физиолого-биохимические процессы животных в период теплового стресса и отела.

**Ключевые слова:** древесная зелень, сосна обыкновенная, кормовая добавка, коровы, стресс.

**Roshchin V.I., Yurina N.A., Mikson D.S., Korotky V.P., Ryzhov V.A.** Extractive substances of coniferous feed phyto additives and their influence of the productivity of farm animals under stress. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoy Akademii*, 2024, iss. 250, pp. 366–382 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.366-382

The results of the study of the initial woody greens –logging waste and the coniferous feed additive obtained from it are presented, the influence of the coniferous feed additive on the productivity and quality of dairy products, physiological and biochemical parameters of animals during the period of stress factors – increased air temperature and calving is determined. The purpose of the study is to study the composition of groups of substances and compounds of the acid fraction of the initial woody greens and coniferous feed additives manufactured under production conditions: the main indicators of productivity and quality of dairy products, zootechnical and physiological and biochemical parameters of farm animals under conditions of temperature stress and calving. An average sample of the initial woody greens, shoots with needles – logging waste, and a coniferous feed additive manufactured under production conditions by STC «Khiminvest» LLC have been studied. The feed additive was divided into solid and liquid parts. The initial woody greens and the solid part of the feed additive were extracted with propane-2-ol, the remainder was sequentially extracted with a hydrocarbon extractant (boiling range 40–70 °С) and diethyl ether. The liquid part of the feed additive was similarly extracted with hydrocarbons and diethyl ether. The main groups of substances were determined in the hydrocarbon extract – the sum of resin and higher fatty acids, unsaponifiable substances, the content of chlorophyll derivatives and carotenoids. The composition of acid compounds was identified by GC-MS method. The results of the study showed

that the compositions of the groups of substances of the original woody greens and the manufactured coniferous feed additive are similar. The parameters of the technological process for the manufacture of feed additives do not affect the nativity of the products obtained. The use of a coniferous feed additive during extremely high air temperatures (up to 42 °C) in the shade and calving reduced the content of cortisol in the blood (by 1.7–5.9 per cent), adrenaline by (4.7–8.4 per cent), urea (by 5.2–8.5 per cent), increased the content of total protein (by 1.2–3.3 per cent) and glucose (by 6.2–19.5 per cent) when compared with the control group of animals. The obtained research results allow us to positively assess the effect of coniferous feed additives on the physiological and biochemical processes of animals during heat stress and calving.

**Key words:** woody greens, *pinus sylvestris*, feed additive, cows, stress.

---

**РОЦИН Виктор Иванович** – заведующий кафедрой технологии лесохимических продуктов, химии древесины и биотехнологии Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, старший научный сотрудник, доктор химических наук. SPIN-код: 4517-6056. ORCID: 0000-0002-5410-9496.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: [kaf.chemdrev@mail.ru](mailto:kaf.chemdrev@mail.ru)

**ROSHCHIN Viktor I.** – DSc (Chemistry), Head of the Department of Technology of Forest Chemical Products, Wood Chemistry and Biotechnology, St.Petersburg State Forest Technical University, Senior Researcher. SPIN-code: 4517-6056. ORCID: 0000-0002-5410-9496.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: [kaf.chemdrev@mail.ru](mailto:kaf.chemdrev@mail.ru)

**ЮРИНА Наталья Александровна** – профессор Кубанского государственного аграрного университета имени И.Т. Трубилина, доктор сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 7033-3840.

350044, ул. Калинина, д. 13, г. Краснодар, Россия.

**YURINA Natalya A.** – DSc (Agricultural), Professor of the Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin. SPIN-code: 7033-3840.

350044. Kalinina str. 13. Krasnodar. Russia.

**МИКСОН Дарья Сергеевна** – доцент кафедры технологии лесохимических продуктов, химии древесины и биотехнологии Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат химических наук. SPIN-код: 2132-0541. ORCID: 0000-0001-7828-2966.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: [ms.mikson@mail.ru](mailto:ms.mikson@mail.ru)

**MIKSON Darya S.** – PhD (Chemistry), Associate Professor of the Department of Technology of Forest Chemical Products, Wood Chemistry and Biotechnology, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 2132-0541. ORCID: 0000-0001-7828-2966.

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

**КОРОТКИЙ Василий Павлович** – генеральный директор ООО НТЦ «Химинвест».

603001, Нижне-Волжская наб., д. 9/1, г. Нижний-Новгород, Россия. E-mail: himinvest@sandy.ru

**KOROTKY Vasily P.** – General Director of LLC Scientific and Technical Center «Himinvest».

603001. Nizhne-Volzhskaya emb. 9/1. Nizhny Novgorod. Russia. E-mail: himinvest@sandy.ru

**РЫЖОВ Виктор Анатольевич** – главный инженер ООО НТЦ «Химинвест». SPIN-код: 5609-7728.

603001, Нижне-Волжская наб., д. 9/1, г. Нижний-Новгород, Россия. E-mail: woodnn@yandex.ru

**RYZHOV Viktor A.** – Chief Engineer of LLC Scientific and Technical Center «Himinvest». SPIN-code: 5609-7728

603001. Nizhne-Volzhskaya emb. 9/1. Nizhny Novgorod. Russia. E-mail: woodnn@yandex.ru

**А.В. Зайцев, В.К. Дубовый, Е.И. Симонова, И.Н. Ковернинский,  
П.М. Кейзер**

## **РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛИМЕРПЕСЧАНЫХ ПЛИТ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ МАКУЛАТУРЫ МАРКИ МС-5Б**

*Введение.* ОАО «Караваево» – одно из старейших предприятий России по производству гофропродукции из макулатуры. Сырьем для производства гофропродукции является макулатура марки МС-5Б по ГОСТ 10700–1997. В виде остатка отходы образуются в гидроразбивателе, отделяются в очистителях высокой концентрации и сортировках вторичного волокна [Дулькин, 2006]. На суточную производительность 60 т в сутки бумажно-картонной продукции в гидроразбивателе образуется до 2500 кг, а в очистителях и сортировках – до 1000 кг отходов; суммарно, более 3500 кг, в пересчете на сухие отходы. Учитывая, что с технологического процесса отходы выходят влажностью 80–85%, то общая масса отходов – до 20 т/сут [Смолин, 2006; Дулькин, 2003]. Эта масса отходов, предварительно обезвоженная свободным отеканием воды до 60–65% влажности, утилизируется на полигоне.

Существенные финансовые потери захоронения отходов на полигоне на период исследования – 2023 год, это более 2000 руб./т или более 7000 руб./сут (2,5 млн руб./год), неуклонное ужесточение экологических требований и риски закрытия полигонов актуализировали проблему рациональной переработки отходов макулатуры у источника образования [Дулькин, 2002]. Решению этой проблемы была посвящена совместная научная работа кафедры технологии бумаги и картона Высшей школы технологии и энергетики СПбГТУПТД и ОАО «Караваево». Результаты работы рассматриваются в настоящей статье.

Полимерминеральные материалы являются многотоннажным продуктом, отличающимся применяемыми полимерами в качестве связующего вещества и минеральными веществами-наполнителями, а также разнообразием форм и целевым назначением. Они производятся многими предприятиями [Звягина, 2007]. Однако отходы макулатуры как смесь пластмасс, волокна, минералов, дерева, металлов, резины, ткани, обладающую связующими и наполняющими свойствами, почти не используется.

Имеются сведения о положительном опыте применения отходов тетрапак и макулатуры от гидроразбивателя в производстве плитных материалов [Анализ образцов..., 2022].

*Цель работы* – исследование процессов технологии полимерпесчаных плит на основе связующих и наполняющих свойств отходов макулатуры МС-5Б с обоснованием выбора оборудования производственной линии.

*Объекты исследования и методики.* Объекты исследования – отходы макулатуры марки МС-5Б, полимерпесчаные плиты.

Методы и методики исследования: определение механических свойств полимерпесчаных плит [Тулузаков, 2011].

*Результаты и обсуждения.* К основным компонентам полимерпесчаных плит относятся полимерное связующее, песок, в качестве наполнителя, и краситель для улучшения эстетического вида. В данном исследовании отходы макулатуры от гидроразбивателя, очистителей высокой концентрации и сортировок волокна использованы в двух вариантах – переработка отходов в полимерные изделия (ПИ) без добавления песка и с добавлением песка в полимерпесчаные изделия (ППИ). Оба вида изделий относятся к строительным материалам, которые отличаются высокой гидрофобностью, механической прочностью, долговечностью, разнообразием форм, узоров и расцветок. С учетом свойств, они широко применяются в городских и дачных ландшафтах, в строительстве [Пальгунов и др., 2009; Звягина, 2007].

Поскольку отходы макулатуры являются сырьем для производства новых изделий, в дальнейшем их будем называть «сырье». Общая производственная линия переработки сырья в ПИ и ППИ состоит из следующих технологических процессов: обезвоживание сырья до 10–15% влажности, измельчение сырья до размеров 12–15 мм, составление композиции и смешение компонентов для прессовочной массы, термообработка с получением однородной прессовочной массы, прессование массы в изделия, упаковка и складирование изделий.

*Процесс обезвоживания сырья* является первым в технологии и предназначен для снижения влажности от 85–80 до 15–10%, позволяющий его качественно измельчать и получать безводную композицию прессовочной массы. Примем, что обезвоживание сырья проводится от влажности 85 до 15% соответственно, от влагосодержания 5,67 кг  $H_2O$ /кг а.с. сырья до 0,18 кг  $H_2O$ /кг а.с. сырья. Обезвоживание проводится в две стадии. В первой стадии после выгрузки сырья вода свободно отекает примерно до 65%

(влагосодержание 1,86  $\text{H}_2\text{O}/\text{кг}$  а.с. сырья), а, во второй стадии, обезвоживается механическим отжимом до конечной влажности 15% (влагосодержание 0,18  $\text{кг H}_2\text{O}/\text{кг}$  а.с. сырья). Свободным отеканием удаляется воды 3,81  $\text{кг}/\text{кг}$  сырья и отжимом – 1,68  $\text{кг}/\text{кг}$  сырья. Всего удаляется воды 5,49  $\text{кг}/\text{кг}$  сырья. Поскольку сырье состоит из разных минеральных (абразивных) частиц, металлических изделий (замки папок, скрепки, гвозди, шурупы, металлическая лента, проволока), деревянных включений (щепки, костра, опилки), резины, пластмасс (пленка, скотч, изолента), для механического обезвоживания был выбран обезвоживающий пресс винтовой. Его особенность в том, что степень отжима воды и производительность пресса регулируется гидравлическим прижимом конического винта в перфорированном коническом корпусе. Мокрое сырье загружается в загрузочную воронку и продвигается шнеком к выгрузочному отверстию. По мере продвижения сырья к выходу из пресса, увеличивается степень уплотнения сырья, вода интенсивно удаляется как за счет механического отжима, так и за счет разогрева смеси. В результате исследования процесса обезвоживания, установлены зависимость влажности сырья от величины прижима шнека. Комбинированное воздействие механического отжима и саморазогрева смеси позволило найти минимальную влажность – 10% (влагосодержание 0,11  $\text{кг H}_2\text{O}/\text{кг}$  а.с. сырья).

Следующим за обезвоживанием следует технологический процесс *измельчения сырья*. Для его выполнения выбрана дробильная машина («дробилка») роторного типа многоножевая (6 ножей), снабженная подроторной сеткой с ячейками для отбора фракции измельченного сырья 12–15 мм. При исследовании измельчения сырья в дробилке установлено, что легче и полнее измельчается более сухое сырье. Поэтому для измельчения сырья выбран интервал влажности 15–10%. Важно, что этот интервал легко обеспечивает выбранный режим работы обезвоживающего пресса.

*Составление композиции и смешение компонентов для прессовочной массы* явилось следующим технологическим процессом. Смешение производится в смесителе. К достоинству смесителя следует отнести интенсивность перемешивания разнородных компонентов смеси. В результате образуется однородная сырьевая смесь, пригодная для дальнейшей термической переработки в прессовочную массу [Пик, 1964].

Технологический процесс *термической переработки смеси в прессовочную массу* следует за составлением композиции и смешением компонентов. Для термической переработки выбран аппарат нагревательно-плавильный (АНП). Аппарат имеет загрузочную горловину и по направле-

нию перемещения композиции 2 шнеками с лопатками разделен на 4 температурные зоны – 170, 180, 230 и 230 °С. Шнеки с лопатками интенсивно перемешивают композицию. Температурные зоны выбраны исходя из физико-химических свойств компонентов сырья. Основным компонентом являются разные полимерные пленки – свыше 50% с интервалом температуры плавления 120–160 °С [Кулезнёв и др., 2014; Перепёлкин, 1963]. Второй по содержанию компонент древесное волокно – более 20%, который при влажности 15–10% и температуре 120–230 °С переходит во высокоэластичное состояние [Аким, 1986]. Расплавленные и высокоэластичные полимеры выполняют роль высокопрочного связующего.

Заключительным технологическим процессом стало *получение плитных изделий из прессовочной массы*. Для прессования изделий выбран гидравлический вертикальный пресс с максимальным давлением 160 т. Прессование осуществляется из прессовочной массы, имеющей температуру в пределах 180–230 °С, с одновременным охлаждением готовых изделий.

Исходя из исходного компонентного состава сырья, 50% полимеры, 20% древесное волокно и 30% компонентов, устойчивых к температуре 120–230 °С, вначале было проведено исследование по первому варианту – переработка 100% сырья, без использования песка. Технологической особенностью прессовочной массы явилось исходное соотношение связующего (полимеры + волокно) и наполнителя (армирующая составляющая), равное 70:30. Производилось полимерное изделие (ПИ) в виде плиток размером 330×330×35 мм. При весе плиток 3,3–3,5 кг/шт., производительность линии 2 т в смену (8 часов) оказалась близка к расчетной при выборе оборудования. Следовательно, линия способна перерабатывать всю массу отходов предприятия, примерно 3,5 т/сут. В результате исследования установлены положительные и отрицательные факторы технологии. К положительным факторам отнесли – визуально хорошее качество изделий, подтвержденное испытаниями механической прочности и жесткости, простота технологии и эксплуатации оборудования, надежность работы оборудования, низкая себестоимость изделий; отрицательные факторы – это наличие неприятного запаха и черный цвет прессовочной массы и плитки.

Второй вариант исследования – производство ППИ, был проведен с целью более полного использования мощности производственной линии, за счет минерального наполнителя – песка и рационального расхода связующего. Были исследованы композиции исходного сырья и песка в следующих соотношениях, %: 50/50; 40/60; 30/70. При использовании соотношения, % – сырье/песок = 50/50 и 40/60, плиты получались



качественными и прочными. С увеличением содержания песка сверх 60%, плитка плохо формируется, ее прочность низкая («рассыпается» при испытании на излом усилиями рук). Положительные факторы – это получение плитки с большей прочностью на излом, при соотношении, % – сырье/песок = 50/50 и 40/60, в сравнении с плиткой из 100% сырья. Объясняется этот факт большей хрупкостью плитки из 100% сырья. Отрицательные факторы – некоторое снижение производительности за счет удлинения времени прессования и увеличения времени охлаждения изделий. Увеличение времени прессования объясняется формированием полимернопесчаной структуры, за счет активного взаимодействия связующего полимера – матрицы и песка – армирующей компоненты. Создаваемая структура отличается меньшей жесткостью (большей эластичностью), а, следовательно, большей прочностью, по сравнению с литкой из 100% сырья.

В настоящее время проведены все работы по компоновке и монтажу оборудования производственной линии в цехе ОАО «Караваево». Налажена работа оборудования, отработаны режимы производства 2 видов изделий: садовая плитка 330×330×35 мм и дорожная плитка 700×700×80 мм для устройства дорог и парковок.

#### *Выводы.*

1. Разработана технологическая схема переработки сырья (отходов макулатуры), состоящая из процессов: обезвоживания сырья до 10–15% влажности, измельчения сырья до размеров 12–15 мм, составления композиции и смешения компонентов для прессовочной массы, термообработки композиции с получением однородной прессовочной массы, прессования массы в изделия.

2. Проведен весь комплекс работы по компоновке и монтажу оборудования производственной линии в цехе ОАО «Караваево». Налажена работа оборудования, отработаны режимы производства 2-х видов изделий: садовая плитка 330×330×35 мм и дорожная плитка 700×700×80 мм для устройства дорог и парковок.

3. С учетом исходного соотношения компонентов прессовочной массы – связующего (полимеры + волокно) и наполнителя (армирующая составляющая), равного 70:30, отработана технология и получено полимерное изделие (ПИ).

4. Исследованы композиции исходного сырья и песка в следующих соотношениях, %: 50/50; 40/60; 30/70. При использовании соотношения, % – сырье/песок = 50/50 и 40/60, получена плитка с большой прочностью на излом.

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

### Библиографический список

Аким Э.Л., Романова В.А. Структура и релаксационные свойства бумаги как основы целлюлозных композиционных материалов // Химия древесины. 1986. № 4. С. 12–17.

Анализ образцов отходов тетрапак и макулатуры от гидроразбивателя путем ручной сортировки и сканирования FTIR / Марджан Султана // Финляндия. Аркадский университет прикладных наук. Технология обработки материалов. 2022. 15 с.

Дулькин Д.А., Ковернинский И.Н., Комаров В.И., Спиридонов В.А. Мировые тенденции в развитии техники и технологии переработки макулатуры. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2002. 108 с.

Дулькин Д.А., Панов А.Н., Ковернинский И.Н., Спиридонов В.А. Ресурсы и качество макулатуры для производства бумаги и картона // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2006. № 5. С. 28–37.

Дулькин Д.А., Спиридонов В.А., Миронова В.Г., Верещак В.В. Анализ эффективности технологических схем производства макулатурной массы // Развитие ресурсосберегающих технологий производства бумаги и картона из вторичного волокнистого сырья: сб. науч. тр. 4-й Междунар. науч.-техн. конф. Караваево, 2003. С. 54–59.

Звягина А.И. Вторичные сырьевые ресурсы и технологии их использования для производства строительных материалов // Экология производства. 2007. № 4. С. 50–51.

Звягина А.И. Вторичные сырьевые ресурсы и технологии их использования для производства строительных материалов // Технология машиностроения. 2007. № 4. С. 50–51.

Кулезнёв В. Н., Шершнев В. А. Химия и физика полимеров. Изд. 3-е, испр. и доп. СПб.: Лань, 2014. 367 с.

Пальгунов П.П., Сумароков М.В. Утилизация промышленных отходов М.: Стройиздат. 1990. 352 с.

Переёлкин В.П. Полипропилен, его свойства и методы переработки. Л.: ЛДНТП, 1963. 256 с.

Пик И.Ш. Прессовочные, литьевые и поделочные пластические массы: справочное пособие / под ред. И.И. Поржицкого. М.; Л.: Химия, 1964. 379 с.

Смолин А.С., Дубовый В.К. Современное состояние и проблемы использования вторичного волокна в производстве бумаги и картона // Современные научные основы и инновационные технологии бумажно-картонных материалов с использованием вторичного волокна из макулатуры: науч. тр. 7-й Междунар. науч.-техн. конф. Караваево, 2006. С. 6–7.

Тулузаков Д.В., Лапшин Ю.Г., Архипов А.С. Определение показателей прочности древесно-стружечных плит при чистом сдвиге // Лесной вестник. 2011. № 5. С. 107.

## References

Akim E.L., Romanova V.A. Structure and relaxation properties of paper as the basis of cellulose composite materials. *Chemistry of wood*, 1986, no. 4, pp. 12–17. (In Russ.)

Analysis of waste samples of tetrapack and waste paper from a hydraulic fracturing machine by manual sorting and scanning FTIR / Marjan Sultan. *Finland. Arcadian University of Applied Sciences. Technology of materials processing*, 2022. 15 p. (In Russ.)

Dulkin D.A., Koverninsky I.N., Komarov V.I., Spiridonov V.A. Global trends in the development of machinery and technology for recycling waste paper. Arkhangelsk: Publishing House of AGTU, 2002. 108 p. (In Russ.)

Dulkin D.A., Panov A.N., Koverninsky I.N., Spiridonov V.A. Resources and quality of waste paper for the production of paper and cardboard. *Cellulose. Paper. Cardboard*, 2006, no. 5, pp. 28–37. (In Russ.)

Dulkin D.A., Spiridonov V.A., Mironova V.G., Vereshchak V.V. Analysis of the effectiveness of technological schemes for the production of waste paper. *Development of resource-saving technologies for the production of paper and cardboard from recycled fibrous raw materials*: collection of scientific tr. 4th International Scientific and Technical conf. Karavaevo, 2003, pp. 54–59. (In Russ.)

Kuleznev V.N., Shershnev V.A. Chemistry and physics of polymers. Ed. 3rd edition and additional edition. St. Petersburg: Publishing house «Lan», 2014. 367 p. (In Russ.)

Palgunov P.P., Sumarokov M.V. Utilization of industrial waste. M.: Stroyizdat, 1990. 352 p. (In Russ.)

Perepelkin V.P. Polypropylene, its properties and processing methods. L.: LDNTP, 1963. 256 p. (In Russ.)

Pik I.Sh. Pressing, injection molding and ornamental plastic masses: A reference guide / Ed. by I.I. Porzhitsky. M.; L.: Khimiya, 1964. 379 p. (In Russ.)

Smolin A.S., Dubovy V.K. The current state and problems of using secondary fiber in the production of paper and cardboard. *Modern scientific foundations and innovative technologies of paper and cardboard materials using secondary fiber from waste paper*: scientific tr. 7th International Scientific and Technical Conference conf. Karavaevo, 2006, pp. 6–7. (In Russ.)

Tuluzakov D.V., Lapshin Yu.G., Arkhipov A.S. Determination of strength indicators of chipboard with clean shear. *Lesnoy vestnik*, 2011, no. 5, p. 107. (In Russ.)

Zvyagina A.I. Secondary raw materials and technologies of their use for the production of building materials. *The Ecology Of Production*, 2007, no. 4, pp. 50–51. (In Russ.)

Zvyagina A.I. Secondary raw materials and technologies of their use for the production of building materials. *Mechanical engineering technology*, 2007, no. 4, pp. 50–51. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 24.01.2024

**Зайцев А.В., Дубовый В.К., Симонова Е.И., Ковернинский И.Н., Кайзер П.М.** Разработка технологии полимерпесчаных плит на основе отходов макулатуры марки МС-5Б // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 250. С. 383–392. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.383-392

Переработка макулатуры марки МС-5Б в тест-лайнер и флутинг в ОАО «Каравaeво» сопровождается накоплением отходов, представляющих собой сложную смесь веществ различных видов с переменным массовым составом. В год сдается на полигон свыше 1,2 млн т, таким образом удельное содержание отходов на 1 т продукции составляет около 38 кг. Образующиеся отходы необходимо утилизировать на полигоне, что требует значительных финансовых издержек. Поэтому переработка отходов стала актуальной проблемой переработки макулатуры. Смесь отходов фракционируется на пластики, волокно, дерево, минералы, металлы, резину и ткань. Установлено, что общее содержание пластика и волокна составляет более 71% и может быть использовано в полном объеме в качестве связующего в термопрессовочной технологии. Рассматривается технология полимерпесчаных плит на основе отходов макулатуры марки МС-5Б. Производилось полимерное изделие (ПИ) в виде плиток размером 330×330×35 мм. При весе плиток 3,3–3,5 кг/шт., производительность линии 2 т в смену (8 часов) оказалась близка к расчетной при выборе оборудования. Второй вариант исследования – производство ППИ. Были исследованы композиции исходного сырья и песка в следующих соотношениях, %: 50/50; 40/60; 30/70. В настоящее время налажена работа оборудования, отработаны режимы производства 2 видов изделий: садовая плитка 330×330×35 мм и дорожная плитка 700×700×80 мм для устройства дорог и парковок.

**Ключевые слова:** макулатура, отходы макулатуры, прессовочная масса, полимерные плиты, полимерпесчаные плиты, связующее, наполнитель, полимерная матрица, армирующий компонент.

**Zaitsev A.V., Dubovy V.K., Simonova E.I., Koverninsky I.N., Keizer P.M.** Development of technology for polymer-sanded plates based on waste paper of the MS-5B brand. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2024, iss. 250, pp. 383–392 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.383-392

The recycling of MS-5B waste paper into a test liner and fluting at JSC Karavaevo is accompanied by the accumulation of waste, which is a complex mixture of substances of various types with variable mass composition. More than 1.2 million tons are delivered to the landfill per year, thus the specific content of waste per 1 ton of products is about 38 kg. The resulting waste must be disposed of

at the landfill, which requires significant financial costs. Therefore, waste recycling has become an urgent problem of recycling waste paper. The waste mixture is fractionated into plastics, fiber, wood, minerals, metals, rubber and fabric. It has been established that the total content of plastic and fiber is more than 71% and can be used in full as a binder in thermal pressing technology. The technology of polymer-sanded plates based on waste paper of the MS-5B brand is considered. A polymer product (PI) was produced in the form of tiles with a size of 330×330×35 mm. With a tile weight of 3.3–3.5 kg/piece, the line capacity of 2 tons per shift (8 hours) turned out to be close to the calculated one when choosing equipment. The second option of the study is the production of PPis. The compositions of the feedstock and sand were studied in the following ratios, %: 50/50; 40/60; 30/70. Currently, the operation of the equipment has been adjusted, the production modes of 2 types of products have been worked out: garden tiles 330×330×35 mm and road tiles 700×700×80 mm for roads and parking lots.

**Key words:** waste paper, waste paper, pressing mass, polymer plates, polymer-sanded plates, binder, filler, polymer matrix, reinforcing component.

---

**ЗАЙЦЕВ Артем Валерьевич** – аспирант Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна. ORCID: 0000-0002-2008-311X.

198095, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: ani1997.10@mail.ru

**ZAITSEV Artem V.** – PhD student at the Higher School of Technology and Energy of the St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. ORCID: 0000-0002-2008-311X.

198095. Ivan Chernykh str. 4. St. Petersburg. Russia. E-mail: ani1997.10@mail.ru

**ДУБОВЫЙ Владимир Климентьевич** – профессор кафедры технологии бумаги и картона Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, кандидат технических наук.

198095, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: dubovy2004@mail.ru

**DUBOVIY 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

**КОВЕРНИНСКИЙ Иван Николаевич** – Индивидуальный предприниматель Ковернинский Иван Николаевич. ORCID:0000-0002-7413-6790

127591, ул. Дубнинская, д. 40А, к. 1. кв. 11, г. Москва. E-mail: kovern@list.ru

**KOVERNINSKY Ivan N.** – Individual Entrepreneur Koverninsky Ivan Nikolaevich. ORCID:0000-0002-7413-6790.

127591. Dubninskaya str. 40A. Build. 1. Apt. 11. Moscow. E-mail: kovern@list.ru

**КЕЙЗЕР Павел Матвеевич** – доцент кафедры технологии бумаги и картона Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, кандидат технических наук. SPIN-код: 4864-8012. ORCID: 0000-0002-2008-311X.

198095, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: kpm022@yandex.ru

**KEIZER Pavel M.** – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Paper and Cardboard Technology of the Higher School of Technology and Energy of the St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. SPIN-code: 4864-8012. ORCID: 0000-0002-2008-311X.

198095. Ivan Chernykh str. 4. St. Petersburg. Russia. E-mail: kpm022@yandex.ru

**Т.И. Фомичева, Е.В. Колужникова**

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ОЦЕНКА СОСТАВА КИСЛОТНЫХ КОМПОНЕНТОВ В РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЛАХ**

*Введение.* Предмет настоящих сравнительных экспериментальных исследований обусловлен сходством масел авокадо и тыквы по химическому составу и доступности способов получения. Оба продукта содержат ряд жирных кислот, включая ненасыщенные, что делает их полезными для человеческого организма как в качестве компонентов косметики, так и для применения как биологически активных добавок. Представляет интерес сравнение этих масел по составу насыщенных и ненасыщенных жирных кислот.

Авокадо (или «крокодилову грушу») культивировали племена индейцев Центральной Америки еще более десяти тысяч лет назад, выращивая плоды вечнозелёного дерева семейства лавровых, обладающие особым маслянистым вкусом и ореховым ароматом [Слободская, 2015; Гамаюрова, и др., 2018]. Древние индейцы использовали плоды авокадо как в естественном виде, так и изготавливая из них масло, которое называли «лесное масло» – по-индейски «аукатль» [Гамаюрова, 2015; Лавренев и др., 2007]. Сейчас масло авокадо – густую зеленоватую жидкость с мягким приятным вкусом и оригинальным пикантным запахом получают как методом «холодного» отжима, так и способом рафинирования. В России этот продукт появился сравнительно недавно, что и представляет научный интерес к его сравнительному анализу с нашими традиционными, сходными по составу маслами, в частности – с тыквенным.

Авокадо имеет высокую пищевую ценность и превосходные вкусовые качества, содержит много легко усвояемых жиров (калорийность авокадо составляет 884,5 Ккал/100г), разнообразных витаминов (К, А, С, В<sub>5</sub>, В<sub>6</sub>, В<sub>9</sub>, Е, РР, D) углеводов 15,9 г %, белков 2,1 г %, это питательный и очень полезный продукт [Слободская, 2015; Орасмьэ-Медер и др., 2016; Корнена, 2009], но весьма калорийный. Помимо этого, в мякоти авокадо содержится значительное количество макро- и микроэлементов – кальций, кремний, калий, натрий, фосфор, железо, магний, медь, цинк, кобальт [Гамаюрова и др., 2018, Корнена, 2009].

В плодах содержится алкалоид теобромин, применяемый при изготовлении лекарств.

Масло авокадо, получаемое методом «холодного» отжима, по своему витаминному составу не уступает полезным свойствам необработанного плода (в отличие от рафинированного масла).

Основное достоинство масла авокадо – высокое содержание жирных кислот. Это олеиновая кислота – до 60%, пальмитиновая – до 25%, линолевая – около 40%, пальмитолеиновая кислота, фитостероиды, эфирные масла, хлорофилл. В состав масла входит сквален, уникальное вещество-промежуточный углеводород-участник биологического синтеза стероидов. Сквален участвует в процессе метаболизма, регулирует процент усвояемости и степень всасываемости пищевых продуктов [Оресмяз-Медер и др., 2016], что отражено также в нормативах («Масло авокадо, жировой состав, 100 г. Национальная база данных по питательным веществам США, выпуск 28, Министерство сельского хозяйства США. 2016»). Сквален в составе масла авокадо является иммуностимулятором и антиоксидантом.

При наружном применении масло авокадо легко впитывается кожей благодаря высокому содержанию в нем лецитина. Лецитин – эмульгатор при биохимическом расщеплении которого образуется холин – жизненно важный элемент метаболизма. Лецитин восстанавливает баланс кишечной микрофлоры, защищает организм от патологий сердца и сосудов, улучшает деятельность эндокринной, нервной и мочеполовой систем организма. Также наличие этого соединения в масле авокадо способствует поглощению кожей витаминов А и Е, предотвращая возникновение избыточной сухости и шелушения. По составу комплекс жирных кислот, содержащихся в масле авокадо, сходен с жирными кислотами, составляющими основу липидо-эпидермального барьера кожного покрова человека. Использование масла авокадо в косметических средствах помогает восстановить ее защитные функции [Гамаюрова и др., 2018; Пучкова, 2015; Семенова и др., 2019].

Тыква не является столь экзотическим продуктом, как авокадо. Плоды тыквы выращивают повсеместно в нашей стране, тыква является более доступным продуктом. Тыквенное масло получают из предварительно очищенных тыквенных семян путем холодного прессования [Касьянов и др., 2010]. Однако выход тыквенного масла не большой из-за сравнительно малого количества семян в тыкве по массе относительно массы самой тыквы.



Тыквенное масло характеризуется высоким содержанием жирных кислот различной природы как насыщенных, так и ненасыщенных. Калорийность его составляет 896 Ккал/100 г. Масло семян тыквы – одно из самых сбалансированных растительных масел. Благодаря уникальному составу его компоненты благоприятно влияют на процессы жизнедеятельности организма как в отдельности, так и в сочетании друг с другом.

Помимо собственно жирных кислот, тыквенное масло содержит значительное количество жирорастворимых витаминов (мг/100 г): А (и каротиноиды) – 0,031–0,034; Е ( $\alpha$  – токоферол) – 3,62–6,13; К (филлохинон) – 0,021. Входят в его состав и водорастворимые витамины: С (аскорбиновая кислота) – 3,1; В<sub>1</sub> (тиамин) – 0,06; В<sub>2</sub> (рибофлавин) – 0,056; В<sub>4</sub> (холин) – 1,8; В<sub>9</sub> (фолиевая кислота) – 0,014; РР (никотиновая кислота) – 0,65. Каротиноиды (А) и токоферолы (Е) обладают мощным иммуностимулирующим и мембраностабилизирующим эффектом. Витамин К (антигеморрагический) влияет на свертываемость крови, способствует превращению фибриногена (неактивного белка плазмы крови) в активный фибрин. Содержание в тыквенном масле растительного гемоглобина – хлорофилла, участвующего в процессах окисления-восстановления кислорода, способствует процессам оксигенизации, насыщая ткани организма кислородом, что делает это масло мощным антиоксидантом [Гамаюнова и др., 2018; Крецу и др., 1989; Ковалев и др., 2015].

Помимо основного компонента (полинасыщенных и ненасыщенных жирных кислот) и витаминов, в масле семян тыквы содержится значительное количество макро- и микроэлементов (мг/100г): калий – 205,1; кальций – 27,6; фосфор – 25; сера – 19; хлор – 15,9; железо – 13–15; магний – 13,9; натрий – 3,9; медь – 0,76; цинк – 0,008; селен – 0,08; фтор – 0,0086; марганец – 0,02; йод – 0,0013; кобальт – 0,0013 [4, 8, 10]. Масло семян тыквы активно применяется в качестве биологически активной добавки как источник жирных кислот и полезных компонентов – витаминов, микро- и макроэлементов [Оресмяз-Медер и др., 2016; Пучкова, 2015; Касьянов, 2010]. Высокое содержание токоферолов (витамина Е), имеющиеся в составе масла каротиноиды, фосфолипиды, витамины В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub> и др., С, Р, К [Гамаюрова и др., 2018; Крецу и др., 1989; Ковалев и др., 2015], флавоноиды так же, как ненасыщенные и полиненасыщенные жирные кислоты позволяют активно использовать масло в качестве антиоксиданта, предотвращая повреждение клеток свободными радикалами [Крецу и др., 1989; Новокрещенова и др., 2017].

Используют это масло и как средство для снижения риска сердечно-сосудистых заболеваний поскольку его компоненты обладают способностью снижать концентрацию вредного холестерина крови, а также повышать эластичность сосудов и оказывать антисклеротическое действие. Доказана эффективность воздействия его компонентов для уменьшения рисков возникновения хронических заболеваний органов пищеварения и печени.

Также тыквенное масло, как и масло авокадо, используется в качестве косметического агента и входит в состав косметических средств как источник насыщенных и полиненасыщенных жирных кислот, витаминов, микро- и макроэлементов, что стимулирует выработку коллагена и препятствует разрушению структурных элементов дермы и предотвращает процессы увядания кожи [Новокрещенова и др., 2017].

*Цель данных экспериментальных исследований* – сравнение качественного и количественного состава исследуемых масел путем изучения содержания в их образцах основных компонентов – полиненасыщенных и насыщенных жирных кислот и оценка эффективности воздействия обоих масел на организм человека.

*Материалы и методика исследования.* Установление достоверной структуры жирных кислот успешно осуществляется хроматографическими методами анализа. Анализ образцов масла авокадо и тыквенных семян на содержание жирных кислот осуществляли на газовом хроматографе модели «Кристалл» 5000.2 с капиллярной ГХ-колонкой DB-FFAP/YP-FFAP/ZB-FFAP [Лакиза, 2015]. Образцы для анализа были подготовлены согласно ГОСТ 31663-2012 «Масла растительные и масла животные. Определение методом газовой хроматографии массовой доли метиловых эфиров жирных кислот». Анализ осуществляли также в соответствии с методикой ГОСТ 31663-2012, используя для сравнения в качестве стандартных образцов смесь метиловых эфиров 37 жирных кислот.

*Результаты исследования.* Основными компонентами масла авокадо и тыквенного масла являются насыщенные и полиненасыщенные жирные кислоты (ПНЖК). В маслах обнаружено 14 видов триглицеридов (табл. 1 и 2).

*Обсуждение.* Результаты эксперимента показывают, что в исследуемых образцах обоих масел содержатся жирные предельные (насыщенные) кислоты. В частности, пальмитиновая кислота, обеспечивающая энергобаланс организма, нормализующая деятельность мембран нервных клеток и клеток мозга, а также способствующая сохранению здорового эпидермиса и устранению признаков старения кожи.

Таблица 1

**Жиринокислотный состав образцов масла авокадо****Fatty acid composition of avocado oil samples**

Название кислоты	Жиринокислотный состав триглицеридов, % к сумме кислот
C14 Миристиновая	0,18
C16 Пальмитиновая	6,26
C16:1 Пальмитолеиновая	0,19
C18:1 Гептадекановая	0
C18:1 n1 Вакценовая	1,65
C18 Стеариновая	2,81
C18:2 n9 C18: 1 t-9 Олеиновая	45,64
C18:2 n6 Линолевая	41,77
C18:3 n3 $\alpha$ -Линоленовая	0,39
C20:1 Арахидовая	0,22
C20: 1n9 Гондоиновая	0,3
C20: 1n11 Гадолеиновая	0
C22:0 Бегеновая	0,42
C24:0 Лигноцериновая	0,12

Таблица 2

**Жиринокислотный состав образцов масла из семян тыквы****Fatty acid composition of pumpkin seed oil samples**

Название кислоты	Жиринокислотный состав триглицеридов, % к сумме кислот
C14 Миристиновая	0,11
C16 Пальмитиновая	11,2
C16:1 Пальмитолеиновая	0,19
C18:1 Гептадекановая	0,11
C18:1 n1 Вакценовая	1,18
C18 Стеариновая	5,39
C18:2 n9 C18: 1 t-9 Олеиновая	36,30
C18:2 n6 Линолевая	47,48
C18:3 n3 $\alpha$ -Линоленовая	0,19
C20:1 Арахидовая	0,40
C20: 1n9 Гондоиновая	0,00
C20: 1n11 Гадолеиновая	0,21
C22:0 Бегеновая	0,29
C24:0 Лигноцериновая	0,11

В образцах обоих масел есть стеариновая кислота, которая является профилактическим средством естественной защиты организма, способствует эффективному усвоению витаминов и ценных минеральных веществ. Установлено содержание в исследуемых продуктах и миристиновой кислоты, способствующей улучшению памяти и укрепляющей кожные барьеры. Также обнаружено в обоих маслах достаточное количество бегеновой кислоты, которая помогает организму в борьбе с воспалительными процессами, снижает риск развития некоторых онкологических заболеваний, снижает уровень холестерина крови и улучшает функционирование сердечно-сосудистой системы. На долю этих соединений приходится в масле авокадо 9,9% в сумме, а в тыквенном масле – 18,6%.

В итоге в разумных пределах насыщенные жирные кислоты обеспечивают организм энергией, служат материалом для построения мембран клеток, необходимы для работы мозга, участвуют в усвоении жирорастворимых витаминов А, Е, D, К. Но крайне важно учитывать, что избыток жирных кислот в организме может нарушать равновесие естественных физиологических процессов в организме человека и привести к некоторым нарушениям, что особенно необходимо учитывать при приеме тыквенного масла. Содержание подобных кислот в суточном рационе не должно превышать 10% [Швейнов, 2017], т. е. по содержанию жирных кислот более диетическим является масло авокадо.

В соответствии с нормативными документами («Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации. Методические рекомендации: М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 36 с). потребность в ПНЖК составляет для взрослых 6–10%, а для детей – 5–10% от калорийности суточного рациона. ПНЖК, необходимые человеку, но не синтезируемые в их организмах, называют незаменимыми (эссенциальными). С целью профилактики риска онкологических, сердечно-сосудистых заболеваний, сахарного диабета, укрепления иммунитета в пожилом возрасте целесообразно включать из полиненасыщенных кислот в состав рациона в основном мононенасыщенные кислоты, в частности олеиновую, гондоиновую ( $\omega$ -9) и пальмитолеиновую ( $\omega$ -7) кислоты [Швейнов, 2017].

В масле семян тыквы  $\omega$ - кислот – 10–32,1%, а в масле авокадо – 46,8%, что показывает преимущество последнего для потребления в пожилом возрасте. Также важным фактором поддержания нормального

функционирования организма является потребление ненасыщенных жирных кислот групп  $\omega$ -6 и  $\omega$ -3 [Волгарев и др., 2003; Уколова и др., 2018]. Омега-6 кислоты (линолевая, арахидоновая) способствуют стабилизации обменных процессов в организме, потенцируют синтез гормоноподобных веществ, снижают психоэмоциональное напряжение, улучшают функционирование эпидермиса. Полиненасыщенные жирные кислоты группы омега-3 ( $\alpha$ -линоленовая), обладают противовоспалительным эффектом, укрепляют суставы, снимают синдром хронической усталости, способствуют метаболизму эссенциальных веществ [Волгарев и др., 2003; Уколова и др., 2018].

Целесообразность и эффективность использования масел авокадо и семян тыквы для поддержания сбалансированного количества незаменимых кислот при приеме в виде масла существенно облегчает процесс усвоения всех полезных компонентов организмом как при применении жидкого масла, так и при использовании его в виде капсулированного продукта.

*Заключение.* Результаты проведенных исследований доказывают, что в образцах масел авокадо и тыквы присутствует значительное содержание насыщенных и ненасыщенных жирных кислот различной природы, что позволяет обеспечить физиологические потребности человека в соответствии с «Нормами физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации».

Ненасыщенные кислоты преобладают в масле семян тыквы, где их содержание составляет 81%, а насыщенных – около 18%. В масле авокадо содержание ненасыщенных кислот превышает 86%. Следовательно, оба масла являются ценнейшими источниками полиненасыщенных жирных кислот для организма человека. Содержание пальмитиновой и пальмитолеиновой кислот в масле авокадо более 6,3%, тогда как в тыквенном масле – 12,9%. Масло авокадо превышает тыквенное масло по количеству олеиновой кислоты – 45,64%, что является высоким показателем. Линолевой кислоты в тыквенном масле больше, чем в масле авокадо. Линолевая ( $\omega$ -6) и линоленовая ( $\omega$ -3) кислоты являются незаменимыми, так как в человеческом организме эти кислоты не синтезируются и поступают в организм исключительно извне.

Входящие в состав масел исследованные компоненты оказывают чрезвычайно благотворное разностороннее влияние на функцио-

нирование организма человека в целом. Установлено некоторое преимущество масла авокадо как более диетического продукта с наиболее сбалансированным количеством насыщенных и ненасыщенных жирных кислот.

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

### **Библиографический список**

*Волгарёв М.Н., Мустафина О.К., Трушина Э.Н.* О механизмах действия полиненасыщенных жирных кислот на иммунную систему. *Вопросы питания.* 2003. № 3. С. 35–40.

*Гамаюрова В.С., Ржещицкая Л.Э.* Пищевая химия: учебник для студентов вузов: учеб. пособие, электронное издание сетевого распространения. М.: КДУ, Добросвет, 2018.

*Касьянов Г.И., Деревенко В.В., Франко Е.П.* Технология переработки плодов и семян бахчевых культур: монография. Краснодар: Экоинвест, 2010. 148 с.

*Ковалев В.Б., Великородов А.В., Тырков А.Г., Носачев С.Б., Щепетова Е.В., Абдурахманова Н.М.* Химический состав масел семян некоторых бахчевых культур астраханской области, выделенных методом сверхкритической флюидной экстракции // *Фундаментальные исследования.* 2015. № 12-1. С. 54–57.

*Корнена Е.П.* Экспертиза масел, жиров и продуктов их переработки. Качество и безопасность: учеб.-справ. пособие. 3-е изд., испр. и доп. Сибирское университетское изд., 2009. 384 с.

*Крецу Л.Г., Домашенко Л.Г., Соколов М.Д.* Мир пищевых растений. Кишинев: Тимпул, 1989. 324 с.

*Лавренов В.К., Лавренова Г.В.* Энциклопедия лекарственных растений народной медицины. М.: ОЛМА Медиа Групп, 2007. С. 16–17.

*Лакиза Н.В.* Анализ пищевых продуктов: [учеб. пособие]. М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. Екатеринбург: Изд во Урал. ун-та, 2015. 188 с.

*Новокрещенова И.В., Гуляева Ю.Н.* Анализ современных технологий масляных экстрактов // *Инновации в здоровье нации: сб. матер. V Всерос. науч.-практич. конференции с междунар. участием.* СПб. 2017. С. 296–299.

*Орасмия-Медер Т., Шатрова О.* Наука красоты: из чего на самом деле состоит косметика. М.: Альпина Паблишер, 2016. 255 с.

*Пучкова Т.В.* Энциклопедия ингредиентов для косметики и парфюмерии. 2-е изд. М.: Школа косметических химиков. 2015, 408 с.

Семёнова Е.В., Васищева Е.Б., Номоконова Е.О. Изучение свойств неомыляемых соединений масел авокадо и соевых бобов на основе препарата «пиаскледин 300» // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2019. № 9. С. 46–50.

Слободская Н.С. Биологически активные добавки- значение и применение // Журнал Гродненского государственного медицинского университета. 2015. № 4. С. 120.

Уколова Н., Исаев А., Амбросов И., Дириш А., Косткина Е. Биоактиваторы нового поколения в омолаживающих процедурах // Kosmetik international. 2018. № 1.

Швейнов А.И. Профилактика аритмических осложнений у пациентов с острым инфарктом миокарда: перспективы применения  $\omega$ -3-полиненасыщенных жирных кислот // Молодежный инновационный вестник: матер. XI Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых-медиков, посвящ. 100-летию ВГМУ им. Н.Н. Бурденко. 2017. Т. 6, № 1. С. 149–151.

## References

Gamayunova V.S., Rzezcycka L.E. Food chemistry: textbook for university students: textbook. Email publication distribution network. M.: KDU, Dobrobut, 2018. (In Russ.)

Kasyanov G.I., Derevenko V.V., Franko E.P. Technology of processing fruits and seeds of melon crops: monograph. Krasnodar: Ekoinvest, 2010. 148 p. (In Russ.)

Kornena E.P. Examination of oils, fats and products of their processing. Quality and safety: study guide. stipend. 3rd ed., ispr. and add. Siberian University ed., 2009. 384 p. (In Russ.)

Kovalev V.B., Velikorodov A.V., Tyrkov A.G., Nosachev S.B., Shchepetova E.V., Abdurakhmanova N.M. Chemical composition of seed oils of some melon crops of the Astrakhan region isolated by supercritical fluid extraction. *Fundamental research*, 2015, no. 12-1, pp. 54–57. (In Russ.)

Kretsu L.G., Domashenko L.G., Sokolov M.D. The world of food plants. Chisinau. Timpul, 1989. 324 p. (In Russ.)

Lakiza N.V.L. Analysis of food products: [study. manual]. Ministry of Education and Science Grew. Federation, Ural. feder. un-t. Yekaterinburg: Ural Publishing House. un-ta, 2015. 188 p. (In Russ.)

Lavrenov V.K., Lavrenova G.V. Encyclopedia of medicinal plants of traditional medicine. M.: OLMA Media Group. 2007, pp. 16–17. (In Russ.)

Novokreschenova I.V. Gulyaeva Yu.N. Analysis of modern technologies of oil extracts. *Innovations in the health of the nation* : Collection of materials of the V All-Russian scientific and practical conference with international participation. St. Petersburg, 2017, pp. 296–299. (In Russ.)

*Orasmae Meder T., Shatrova O.* The science of beauty: What cosmetics really consists of cosmetik. M.: Alpina Publisher, 2016. 255 p. (In Russ.)

*Puchkova T.V.* Encyclopedia of ingredients for cosmetics and perfumes. 2nd ed. M.: School of Cosmetic Chemists, 2015. 408 p. (In Russ.)

*Semenova E.V., Vasishcheva E.B., Nomokonova E.O.* Studying the properties of unsaponifiable compounds of avocado and soy bean oils based on the drug «piaskledin 300». *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2019, no. 9, pp. 46–50. (In Russ.)

*Shveynov A.I.* Prevention of arrhythmic complications in patients with acute myocardial infarction: prospects for the use of omega-3 polyunsaturated fatty acids. *Youth innovation Bulletin: materials of the XI International Scientific and Practical Conference of young medical scientists, dedicated to To the 100th anniversary of the Burdenko State Medical University*, 2017, vol. 6, no. 1, pp. 149–151. (In Russ.)

*Slobodskaya N.S.* Biologically active additives – meaning and application. *Journal of the Grodno state medical University*, 2015, no. 4, p. 120. (In Russ.)

*Ukolova N., Isaev A., Ambrosov I., Dirsh A., Kostkina E.* Bioactivators of a new generation in anti-aging procedures. *Kosmetik international*, 2018, no. 1. (In Russ.)

*Volgarev M.N., Mustafina O.K., Trushina E.N.* On the mechanisms of action of polyunsaturated fatty acids on the immune system. *Nutrition issues*, 2003, no. 3, pp. 35–40. (In Russ.)

*Материал поступил в редакцию 26.01.2024*

---

**Фомичева Т.И., Колужникова Е.В.** Сравнительный анализ состава кислотных компонентов в растительных маслах // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 250. С. 393–404. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.393-404

В качестве предмета сравнения выбраны образцы масел авокадо и семян тыквы, которые при различиях в способах получения и происхождения имеют схожий состав. Целью исследования является сравнение состава жирных кислот масел авокадо и семян тыквы для оценки преимуществ и недостатков их использования в качестве биологически активных веществ для внутреннего и наружного применения. Масла характеризуются высоким содержанием жирных кислот различного химического состава как насыщенных, так и ненасыщенных. В статье имеется обзор сведений об авокадо и тыкве на основе литературных источников, содержится информация о составе масел авокадо и тыквенного. Хроматографический метод анализа позволяет оценить количественные соотношения исследуемых для сравнения компонентов. Установлено, что содержание стеариновой, пальмитиновой и миристиновой



(жирных) кислот в 1,9 раза больше в масел семян тыквы по сравнению с маслом авокадо, что показывает преимущества масла авокадо, как менее калорийного продукта. Определено особенно высокое содержание «незаменимых» ненасыщенных жирных кислот: в масле семян тыквы – 81%, в масле авокадо – 86%. Установлена целесообразность применения обоих масел и для наружного использования, и в качестве лечебного средства для внутреннего применения, в частности, для снижения риска онкологических и сердечно-сосудистых заболеваний.

**Ключевые слова:** масло авокадо и тыквы, полиненасыщенные жирные кислоты, хроматографический анализ.

**Fomicheva T.I., Koluzhnikova E.V.** The avocado oil and pumpkin seed oil may be used as the source of the fatty acids. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 250, pp. 393–404 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.393-404

Avocado and pumpkin seed oils have different origin and methods of production and are characterized by similar content. The purpose of the study is the fatty acids composition research in order to evaluate their advantages and disadvantages and beneficial qualities of this oil's usage as biologically active additives and the part of cosmetic. The oils are characterized by a high content of fatty acids of various types, both saturated and unsaturated. In the article the overview of information about avocado and pumpkin origin and production based on literary sources is included, the composition of avocado and pumpkin oils is described. The chromatographic method of analysis allows to evaluate the quantitative ratios of the components. The content of stearic, palmitic and myristic (fatty) acids was determined is 2 times higher in pumpkin seed oil compared to avocado oil, it means the advantages of avocado oil as a low-calorie product. The analysis revealed especially high content of «essential» unsaturated fatty acids: in pumpkin seed oil it is 80%, in avocado oil it is 87%. Therefore, these oils show the expediency of using as a therapeutic agent for external and internal use particularly to reduce the risk of cardiovascular diseases.

**Keywords:** avocado oil, pumpkin seed oil, unsaturated fatty acids, chromatographic analysis.

---

**ФОМИЧЕВА Татьяна Ивановна** – доцент Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, кандидат технических наук.

190000, ул. Большая Морская, д. 67, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: mukhlenova@mail.ru

**FOMICHEVA Tatiana I.** – PhD (Technical), Associate Professor of the Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

190000. Bolshaya Morskaya str. 67. St. Petersburg. Russia. E-mail: mukhlenova@mail.ru

**КОЛУЖНИКОВА Елена Вениаминовна** – доцент Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук. SPIN-код: 1402-0263.

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

**KOLUZHNIKOVA Elena V.** – PhD (Technical), Associate Professor of the St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 1402-0263.

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

Л.А. Мингазова, Е.В. Крякунова, А.Р. Галиева, З.А. Канарская,  
А.В. Канарский, И.В. Кручина-Богданов, Е.В. Белкина

**ВЛИЯНИЕ СПОСОБА КУЛЬТИВИРОВАНИЯ  
ГРИБА *RHIZOPUS ORIZAE* F-1030  
НА ГИДРОЛИЗАТАХ НЕЙТРАЛЬНО-СУЛЬФИТНОГО ЩЕЛОКА  
НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИНТЕЗА МОЛОЧНОЙ КИСЛОТЫ**

*Введение.* Молочная кислота находит широкое применение в косметической, пищевой, фармацевтической, медицинской и химической промышленности. Молочная кислота также используется в производстве акриловых полимеров и пропиленгликоля, используемых в упаковке и маркировке [Fan et al., 2009].

В настоящее время более 90% молочной кислоты производится путем микробной ферментации источников углерода, представленных в основном сахарами питательной среды. Для регуляции ферментативного производства молочной кислоты немаловажное значение имеет подбор таких факторов, как температура, pH, концентрация питательных веществ в субстрате и концентрация конечного продукта. Минеральные вещества, витамины и азот, доступные в виде неорганических соединений, также необходимы для роста микроорганизмов и синтеза молочной кислоты [Rawoof et al., 2020].

К микроорганизмам, основным продуктом ферментации которых является молочная кислота, относятся мицелиальные грибы рода *Rhizopus*. Показано, что *Rhizopus oryzae* способны синтезировать молочную кислоту на различных углеродсодержащих субстратах, включая отходы офисной бумаги, пшеничную солому и другие сложноутилизуемые субстраты [Saito et al., 2012]. Однако в зависимости от природы субстрата, вязкости питательной среды, видовой принадлежности микроорганизмов, используемых для получения высокого выхода искомого продукта, необходимо осуществлять подбор режимов ферментации.

В производстве молочной кислоты широко используют периодический режим ферментации, характеризующийся простотой реализации, относительно высоким выходом искомого продукта и минимальным количеством поллютантов. Однако недостатком периодического режима является постепенное истощение питательной среды, ограничивающее физиологиче-

скую активность микроорганизмов, что обуславливает низкую продуктивность процесса ферментации [Abdel-Rahman et al., 2013]. Поэтому для компенсации нехватки нутриентов в питательной среде возможно осуществлять или асептическое добавление лимитирующих питательных веществ без удаления ферментационной среды, или замену истощенной питательной среды равным объемом свежей среды, содержащей все необходимые питательные вещества.

Себестоимость производства молочной кислоты на 40-70% состоит из стоимости исходного сырья-субстрата [Tejayadi et al., 1995]. Использование рафинированных сахаров, таких как глюкоза и сахароза, в качестве сырья для производства молочной кислоты экономически нецелесообразно. Поэтому поиск дешевого сырья для ферментативного производства молочной кислоты является актуальной научной проблемой. Для обеспечения экономической эффективности используемое в производстве молочной кислоты сырье должно обеспечить высокий выход конечного продукта, меньшее образование побочных продуктов и минимальное загрязнение окружающей среды. Таким образом, использование для производства молочной кислоты отходов, содержащих сбраживаемый сахар, позволит снизить себестоимость производства молочной кислоты [Dumbrepatil et al., 2008].

Лигноцеллюлозная биомасса представляет собой широко распространенный, но практически не используемый в промышленности природный источник углерода. Из-за сложного строения лигноцеллюлозных материалов их применение в биотехнологической индустрии не представляется возможным без предварительной обработки, позволяющей удалить лигнин и гемицеллюлозу, а также снизить кристалличность целлюлозы и увеличить пористость лигноцеллюлозных материалов.

В связи с вышесказанным, лигноцеллюлозная биомасса может рассматриваться как перспективный субстрат, способный удовлетворить огромный спрос на производство молочной кислоты [Baruah et al., 2018]. Однако на практике сложно осуществить микробиологическое производство молочной кислоты из лигноцеллюлозных материалов, так как большинство микроорганизмов не способно расщеплять лигноцеллюлозу. К проблемам производства молочной кислоты из лигноцеллюлозных материалов также следует отнести образование ингибирующих процесс побочных продуктов, ингибирование субстратом и по типу обратной связи, а также процедуры разделения и очистки.

Решением проблемы микробиологического производства молочной кислоты на лигноцеллюлозных материалах может служить применение в

качестве питательной среды для культивирования микроорганизмов-продуцентов молочной кислоты таких вторичных ресурсов целлюлозно-бумажной промышленности, как щелока. Поскольку щелока содержат простые и олигомерные сахара – потенциальные источники углерода для жизнедеятельности микроорганизмов, то их применение в качестве питательной среды для микробиологического синтеза молочной кислоты позволит снизить себестоимость промышленного производства молочной кислоты.

*Цель работы* – определить условия культивирования гриба *R. oryzae* F-1030 на нейтрально-сульфитных щелоках (НСЩ), позволяющие получить оптимальное соотношение прироста биомассы и количества синтезируемой молочной кислоты.

*Задачи:*

1. Изучить динамику изменения pH питательной среды на основе НСЩ при культивировании на них гриба *R. oryzae* F-1030 периодическим и отъемно-доливным способом.

2. Изучить динамику изменения концентрации редуцирующих веществ (РВ) в питательной среде на основе НСЩ при культивировании на них гриба *R. oryzae* F-1030 периодическим и отъемно-доливным способом.

3. Определить влияние периодического и отъемно-доливного способа культивирования гриба *R. oryzae* F-1030 на питательной среде на основе НСЩ на выход молочной кислоты.

4. Определить влияние периодического и отъемно-доливного способа на прирост биомассы гриба *R. oryzae* F-1030 при культивировании его на питательной среде на основе НСЩ.

*Материалы и методика исследования.* Объектом исследования являлся мицелиальный гриб *R. oryzae* штамм ВКПМ F-1030. Штамм был предоставлен Всероссийской коллекцией промышленных микроорганизмов.

Первоначально выращивание биомассы гриба *R. oryzae* F-1030 осуществляли твердофазным культивированием музейной культуры на картофельно-глюкозном агаре при температуре 28–30 °С в течение 7 суток. Картофельно-глюкозный агар содержал 20 г глюкозы, 20 г бактериологического агара на 1000 см<sup>3</sup> картофельного отвара.

Синтез молочной кислоты осуществлялся грибом *R. oryzae* F-1030 при культивировании на питательной среде на основе гидролизатов НСЩ, полученного при производстве целлюлозы высокого выхода из древесины березы в ООО «Прикамский картон». Используемый в работе исходный НСЩ имел pH 5,3±0,2, содержал 2,5±0,3% редуцирующих веществ и 9,4±0,5% сухих веществ.

Для увеличения содержания простых сахаров производили химическую и биохимическую модификацию НСЦ. При химической модификации НСЦ обрабатывали равным объемом 10%-го раствора соляной кислоты (ГОСТ 857-95) при температуре 100 °С в течение 2 ч. Биохимическая модификация НСЦ производилась с помощью ферментного препарата Revitalenz® 200 («DuPont», США) при температуре 50,0±0,2 °С, pH 5,0–6,0. Активность целлюлазы в препарате Revitalenz® 200 составляла 2000–3000 ABXU/g.

Гидролизаты подвергали центрифугированию при 7000 об/мин в течение 10 мин. Для культивирования гриба *R. oryzae* F-1030 использовали супернатант, pH которого доводили до 5,6±0,1 с помощью 25% водного раствора аммиака.

Культивирование гриба *R. oryzae* F-1030 на гидролизатах НСЦ (pH 5,6±0,1) производили отъемно-доливным и периодическим способом при температуре 28,0±1,0 °С и непрерывном перемешивании со скоростью 120 об./мин. Биомассу гриба в питательную среду вносили фрагментом мицелия в количестве 5,0±0,5% от общего объема питательной среды. В качестве источников азота, фосфора, серы, калия в питательные среды перед началом культивирования вносили 0,04 моль/л (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и 3 ммоль/л KН<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>.

При отъемно-доливном способе через каждые 5 суток культивирования производилась замена 50% культуральной жидкости на равное количество свежей питательной среды для компенсации количества РВ, затраченных грибом *R. oryzae* F-1030 для синтеза молочной кислоты и набора биомассы.

При периодическом способе через каждые 5 суток производили добавление концентрированной стерильной питательной среды для увеличения концентрации РВ. Поскольку при периодическом способе культивирования происходит постепенное истощение питательной среды, то для компенсации возможного дефицита источников фосфора и азота в ферментолит при внесении концентрата НСЦ также добавляли соли (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и KН<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>. Параллельно проводили культивирование гриба *R. oryzae* F-1030 периодическим способом на ферментолитате НСЦ без промежуточного добавления солей (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и KН<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>.

Определение pH питательной среды и культуральной жидкости проводили на pH-метре pH-150МИ.

Определение содержания РВ в питательной среде и культуральной жидкости проводили фотометрическим методом [Морозова и др., 2012].

Выделение молочной кислоты из культуральной жидкости проводили методом, описанным в работе [Мингазова и др., 2020].

Определение содержания молочной кислоты проводили методом, рекомендованным в работе [Борщевская и др., 2016].

Определение выхода молочной кислоты проводили методом, рекомендованным в работе [Мингазова и др., 2021а].

Варианты культивирования гриба *R. oryzae* F-1030 на гидролизатах НСЦ представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Варианты культивирования гриба *Rhizopus oryzae* F-1030  
на гидролизатах нейтрально-сульфитного щелока**

**Cultivating variants for the *Rhizopus oryzae* F-1030 fungus  
on neutral-sulfite liquor hydrolysates**

Вариант культивирования	Питательная среда	Способ культивирования
1	Кислотный гидролизат нейтрально-сульфитного щелока	Периодический
2		Отъемно-доливной
3	Ферментализат нейтрально-сульфитного щелока, полученный при обработке ферментным препаратом Revitalenz® 200	Периодический
4		Периодический с добавлением солей $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ и $\text{KH}_2\text{PO}_4$
5		Отъемно-доливной

Статистическую обработку результатов исследования проводили с использованием программы Microsoft Excel.

*Результаты исследования.* В результате проведенных исследований было установлено, что гриб *R. oryzae* F-1030 не способен осуществлять процессы роста и синтеза искоемых метаболитов при культивировании на питательной среде на основе исходного НСЦ, что, очевидно, связано с низким содержанием в данном субстрате простых сахаров – потенциальных источников углерода, необходимых для нормальной физиологической и метаболической активности продуцента. Следовательно, на начальном этапе культивирования гриб необходимо обеспечить простыми сахарами, увеличения концентрации которых в питательной среде на основе НСЦ можно достичь посредством их каталитической обработки раствором соляной кислоты или целлюлолитическими ферментами.

Как было показано в предыдущих публикациях авторов [Мингазова и др., 2021б], содержание РВ в НСЦ после кислотного гидролиза увеличи-

вается в среднем в 3 раза, тогда как после ферментативного гидролиза – в среднем в 2 раза.

Культивирование гриба *R. oryzae* F-1030 с целью получения молочной кислоты осуществлялось на кислотных гидролизатах и ферментализатах НСЦ отъемно-доливным и периодическим способом согласно вариантам, представленным в табл. 1.

Питательная среда, используемая для культивирования микроорганизмов, должна иметь определенное значение pH, так как этот показатель регулирует физико-химические свойства и биологическую активность белков и нуклеиновых кислот микроорганизма-продуцента. Поэтому для оптимального протекания культивирования необходимо поддерживать pH питательной среды на оптимальном для микроорганизма уровне, при котором наиболее активно протекают процессы его жизнедеятельности. Для используемого в данной работе гриба *R. oryzae* F-1030 оптимальным является pH в пределах 4,5–6,0, при pH 7,7 и выше метаболическая активность гриба значительно замедляется. Поскольку полученные в результате каталитической обработки гидролизаты НСЦ имели низкий pH, физиологически не подходящий для жизнедеятельности гриба, то проводили повышение pH гидролизатов НСЦ 25%-м водным раствором аммиака до  $5,6 \pm 0,1$ .

Динамика изменения pH гидролизатов НСЦ при культивировании на них гриба *R. oryzae* F-1030 представлена на рис. 1.

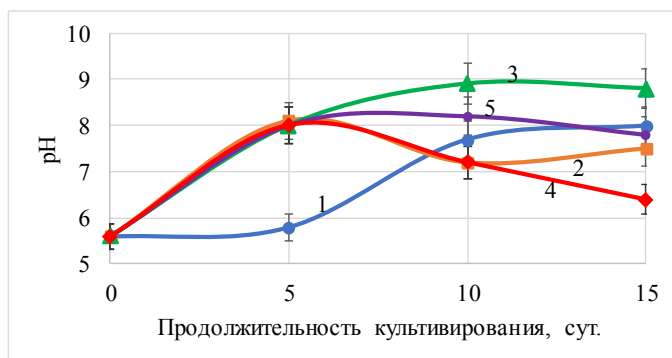


Рис. 1. Динамика изменения pH гидролизатов нейтрально-сульфитных щелочков при культивировании на них *R. oryzae* F-1030

Fig. 1. pH changes in neutral sulfite liquor hydrolysates during *R. oryzae* F-1030 cultivation



Как видно из данных, представленных на рис. 1, в процессе культивирования гриба *R. oryzae* F-1030 на гидролизатах НСЦ происходит постепенное подщелачивание питательной среды. Увеличение pH среды может быть обусловлено следующими причинами:

- деградация белков и аминокислот НСЦ, сопровождаемая выделением аммиака;
- увеличение концентрации карбонат-ионов в питательной среде вследствие аэробного дыхания микроорганизмов, сопровождающегося выделением углекислого газа.

Наблюдаемое к концу культивирования некоторое подкисление питательной среды, очевидно, связано с накоплением в среде конечного продукта – молочной кислоты.

Поскольку гидролизаты НСЦ имели высокое процентное содержание РВ, то в целях оптимизации их усвоения клетками гриба *R. oryzae* F-1030 проводилось разбавление гидролизатов дистиллированной водой до начального содержания РВ  $2,0 \pm 0,1\%$ .

Динамика изменения содержания РВ в гидролизатах НСЦ при культивировании на них гриба *R. oryzae* F-1030 представлена на рис. 2.

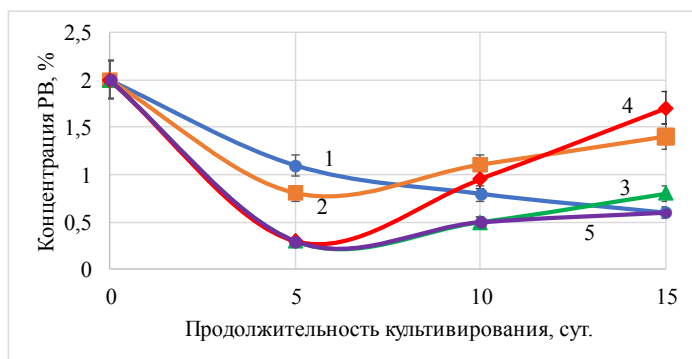


Рис. 2. Динамика изменения содержания редуцирующих веществ в гидролизатах нейтрально-сульфитных щелоков при культивировании на них *R. oryzae* F-1030

Fig. 2. Level of reducing substances in neutral sulfite liquor hydrolysates during *R. oryzae* F-1030 growth

Как видно из данных, представленных на рис. 2, наблюдается закономерное снижение содержания РВ в питательных средах на основе гидроли-

затов НСЦ вследствие ассимиляции их грибом *R. oryzae* F-1030 в процессе культивирования. Как известно, РВ, представленные в основном простыми сахарами, используются микроорганизмами в качестве источников углерода для набора биомассы и синтеза искомого продукта – молочной кислоты [Ха и др., 2019]. Наибольшая ассимиляция РВ грибом-продуцентом наблюдается в первые 5 суток культивирования, что, очевидно, связано с процессами активного роста биомассы гриба и его приспособлением к существованию в гидролизатах НСЦ. В последующие 5–10 суток культивирования ассимиляция РВ происходит в меньшей степени, что объясняется следующими причинами:

- замедление процесса набора биомассы грибом *R. oryzae* F-1030;
- активация целлюлолитических ферментов гриба *R. oryzae* F-1030 (целлюлазы и ксиланазы) и, как следствие, увеличение общей концентрации РВ в питательной среде в результате расщепления присутствующих в гидролизатах НСЦ олигомеров глюкозы и ксилозы до простых сахаров;
- сокращение общей физиологической активности гриба *R. oryzae* F-1030 вследствие естественных процессов старения культуры.

Однако установлено, что при культивировании гриба *R. oryzae* F-1030 на кислотном гидролизате периодическим способом (кривая 1 на рис. 2) наблюдается постепенное снижение содержания РВ в питательной среде без выхода на плато. Поскольку при кислотном гидролизе произошло значительное изменение углеводного состава НСЦ вследствие расщепления остаточных гемицеллюлоз до моносахаров, которые гриб планомерно ассимилирует в процессе культивирования, то отсутствие доступных для расщепления ксиланазой и целлюлазой гриба олигосахаров в кислотном гидролизате НСЦ исключает возможность увеличения концентрации РВ в питательной среде за счет действия собственных целлюлолитических ферментов. В случае культивирования гриба на кислотном гидролизате отъемно-доливным способом (кривая 2 на рис. 2) наблюдается некоторое сокращение ассимиляции РВ вследствие необходимости микроорганизму после каждой замены среды заново приспосабливаться к изменившимся условиям окружающей среды, что замедляет его метаболическую активность, ускоряет старение продуцента и, как следствие, снижает продуктивность синтеза молочной кислоты.

Показано, что при культивировании гриба *R. oryzae* F-1030 на ферментализатах НСЦ (кривые 3–5 на рис. 2) существенных различий в количестве ассимилируемых РВ в зависимости от способа культивирования

(периодический или отъемно-доливной) не наблюдается. Однако добавление в питательную среду на основе ферментолита НСЦ солей  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  и  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (кривая 4 на рис. 2) приводит к сокращению потребления РВ, сопровождаемому высоким выходом биомассы гриба.

Динамика выхода молочной кислоты при культивировании гриба *R. oryzae* F-1030 на гидролизатах НСЦ представлена на рис. 3.

Как видно из данных, представленных на рис. 3, наибольшее увеличение выхода молочной кислоты наблюдается в первые 5 сут. культивирования, тогда как в последующие 10 сут. выход молочной кислоты достигает максимума. Минимальный выход молочной кислоты наблюдается при культивировании гриба на кислотных гидролизатах НСЦ отъемно-доливным способом (кривая 2 на рис. 3), что коррелирует с медленным изменением pH питательной среды и низким уровнем ассимиляции РВ.

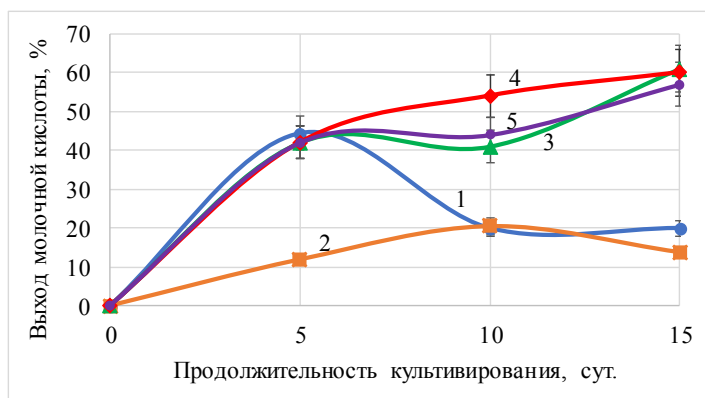


Рис. 3. Динамика выхода молочной кислоты при культивировании *R. oryzae* F-1030 на гидролизатах нейтрально-сульфитных щелоков

Fig. 3. Lactic acid yield in neutral sulfite liquor hydrolysates during *R. oryzae* F-1030 growth

Установлено, что при культивировании гриба на кислотном гидролизате периодическим способом (кривая 1 на рис. 3) высокий выход молочной кислоты в первые 5 сут. культивирования сменяется спадом в последующие 10 сут., в результате чего общий выход молочной кислоты при таком способе культивирования также незначителен. Статистически значимых различий в количестве синтезируемой молочной кислоты при куль-

тивировании гриба на ферментоллизате НСЦ (кривые 3–5 на рис. 3) в зависимости от способа культивирования и наличия дополнительных источников азота, фосфора, серы, калия обнаружено не было.

Как видно из данных, представленных в табл. 2, наименьший выход молочной кислоты наблюдается при культивировании гриба *R. oryzae* F-1030 на кислотных гидролизатах НСЦ как периодическим, так и отъемно-доливным способом. Такой эффект, видимо, связан с полным гидролизом олигосахаров НСЦ до простых сахаров при использовании в качестве гидролизующего агента раствора соляной кислоты. Простые сахара, определяемые как РВ в данной работе, быстро ассимилируются клетками гриба в первую треть времени культивирования и расходуются в основном на прирост биомассы. На последующих этапах культивирования на кислотных гидролизатах наблюдается снижение выхода молочной кислоты и замедление прироста биомассы гриба вследствие нехватки доступных источников углерода и энергии в среде.

Таблица 2

### Влияние способа культивирования на продуктивность *R. oryzae* F-1030

#### The cultivation method effect on *R. oryzae* F-1030 productivity

Питательная среда	Сухая биомасса, г/дм <sup>3</sup>	Общий выход молочной кислоты, %
1	2	3
Периодический способ культивирования		
Гидролизат, полученный при обработке НСЦ раствором соляной кислоты	3,4±0,5	28,1±2,5
Ферментоллизат, полученный при обработке НСЦ ферментным препаратом Revitalenz® 200	6,6±0,5	47,0±4,5
Ферментоллизат, полученный при обработке НСЦ ферментным препаратом Revitalenz® 200 с добавлением солей (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> и KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	9,1±1,0	51,6±5,0
Отъемно-доливной способ культивирования		
Гидролизат, полученный при обработке НСЦ раствором соляной кислоты	13,6±3,5	15,4±1,5
Ферментоллизат, полученный при обработке НСЦ ферментным препаратом Revitalenz® 200	2,0±0,2	46,2±4,5

Установлено, что наибольший выход молочной кислоты достигается при культивировании гриба *R. oryzae* F-1030 на ферментоллизате НСЩ с добавлением солей  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  и  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ . Однако высокий выход молочной кислоты сопровождается и высоким выходом биомассы гриба, так как очевидно, что избыток азота, фосфора, серы, калия стимулирует пролиферацию клеток мицелия. При микробиологическом производстве молочной кислоты утилизация биомассы гриба-продуцента является экономически невыгодной проблемой, решение которой значительно увеличит себестоимость продукта. Поэтому при промышленном производстве молочной кислоты использование дополнительных источников азота, фосфора, серы, калия, усиливающих прирост биомассы, авторы считают нерациональным.

Таким образом, в результате проведенных экспериментов, было установлено, что оптимальное соотношение высокого выхода молочной кислоты и низкого прироста биомассы может быть получено при культивировании гриба *R. oryzae* F-1030 на ферментоллизате НСЩ отъемно-доливным способом.

#### Выводы.

1. Определено, что в начальный период культивирования гриба на гидролизатах НСЩ наблюдается подщелачивание питательной среды, тогда как в заключительный – подкисление. Изменение рН питательной среды связано с накоплением различных метаболитов на разных стадиях физиологической зрелости гриба-продуцента.

2. Установлено, что в процессе культивирования на гидролизатах НСЩ наблюдается постепенное снижение количества РВ, ассимилируемых грибом *R. oryzae* F-1030, что может быть связано как с замедлением процессов роста биомассы гриба, так и с активацией собственных целлюлолитических ферментов гриба, что привело к увеличению общей концентрации РВ в питательной среде.

3. Статистически значимых различий в количестве синтезируемой молочной кислоты при культивировании гриба *R. oryzae* F-1030 на ферментоллизате НСЩ в зависимости от способа культивирования обнаружено не было. При этом культивирование гриба *R. oryzae* F-1030 на кислотном гидролизате НСЩ периодическим способом предпочтительнее.

4. Показано, что на прирост биомассы гриба *R. oryzae* F-1030 при культивировании его на питательной среде на основе гидролизатов НСЩ в большей степени оказывает влияние состав питательной среды, зависящий от вида гидролизующего агента и добавления солей  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  и  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ,

тогда как подтверждения влияния способа культивирования на выход биомассы гриба обнаружено не было.

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

### Библиографический список

Борщевская Л.Н., Гордеева Т.Л., Калинина А.Н., Синеокий С.П. Спектрофотометрическое определение молочной кислоты // Журнал аналитической химии. 2016. Т. 71. № 8. С. 787–790. DOI: 10.7868/S004445021608003X.

Мингазова Л.А., Канарский А.В., Крякунова Е.В., Канарская З.А. Синтез молочной кислоты грибом *Rhizopus oryzae* F-1030 на питательных средах из сульфитных щелоков // ИВУЗ. Лесной журнал. 2020. № 2. С. 146–158. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-146-158.

Мингазова Л.А., Крякунова Е.В., Канарская З.А., Канарский А.В. Применение сульфитных щелоков в качестве питательной среды для культивирования продуцента молочной кислоты *Rhizopus oryzae* F-1030 // ИВУЗ. Лесной журнал. 2021а. № 5. С. 163–173. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-163-173.

Мингазова Л.А., Крякунова Е.В., Канарская З.А., Канарский А.В., Кручина-Богданов И.В., Белкина Е.В. Влияние гидролитической обработки на содержание редуцирующих веществ в нейтрально-сульфитных щелоках // Химия растительного сырья. 2021б. № 3. С. 309–316. DOI: 10.14258/jcrpm.2021039160.

Морозова Ю.А., Скворцов Е.В., Алимова Ф.К., Канарский А.В. Биосинтез ксиланаз и целлюлаз грибами рода *Trichoderma* на послеспиртовой барде // Вестник технологического университета. 2012. Т. 15. № 19. С. 120–122.

Ха Т.З., Канарская З.А., Канарский А.В., Щербаков А.В., Щербакова Е.Н. Влияние источника углерода на синтез биомассы и экзополисахаридов бактериями *Paenibacillus mucilaginosus* // ИВУЗ. Прикладная химия и биотехнология. 2019. Т. 9. № 3. С. 509–518. DOI: 10.21285/2227-2925-2019-9-3-509-518.

Abdel-Rahman M.A., Tashiro Y., Sonomoto K. Recent advances in lactic acid production by microbial fermentation processes // Biotechnology Advances. 2013. Vol. 31. P. 877–902. Doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.04.002.

Baruah J., Nath B.K., Sharma R., Kumar S., Deka R.C., Baruah D.C., Kalita E. Recent trends in the pretreatment of lignocellulosic biomass for value-added products // Frontiers in Energy Research. 2018. Vol. 6. P. 1–19. Doi.org/10.3389/fenrg.2018.00141.

Dumbrepatil A., Adsul M., Chaudhari S., Khire J., Gokhale D. Utilization of molasses sugar for lactic acid production by *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *delbrueckii* mutant Uc-3 in batch fermentation // Applied and Environmental Microbiology. 2008. Vol. 74. P. 333–335. DOI: 10.1128/AEM.01595-07.

Fan Y., Zhou C., Zhu X. Selective catalysis of lactic acid to produce commodity chemicals // Catalysis Reviews: Science and Engineering. 2009. Vol. 51. P. 293–324. Doi.org/10.1080/01614940903048513.

Rawoof S.A.A., Kumar P.S., Vo D.-V.N., Devaraj K., Man, Y., Devaraj T., Subramanian S. Production of optically pure lactic acid by microbial fermentation // *Environmental Chemistry Letters*. 2020. Vol. 19. P. 539–556. Doi.org/10.1007/s10311-020-01083-w.

Saito K., Hasa Y., Abe H. Production of lactic acid from xylose and wheat straw by *Rhizopus oryzae* // *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 2012. Vol. 114. P. 166–169. Doi.org/10.1016/j.jbiosc.2012.03.007.

Tejayadi S., Cheryan M. Lactic acid from cheese whey permeate. Productivity and economics of a continuous membrane bioreactor // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 1995. Vol. 43. P. 242–248.

## References

Abdel-Rahman M.A., Tashiro Y., Sonomoto K. Recent advances in lactic acid production by microbial fermentation processes. *Biotechnology Advances*, 2013, vol. 31, pp. 877–902. Doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.04.002.

Baruah J., Nath B.K., Sharma R., Kumar S., Deka R.C., Baruah D.C., Kalita E. Recent trends in the pretreatment of lignocellulosic biomass for value-added products. *Frontiers in Energy Research*, 2018, vol. 6, pp. 1–19. Doi.org/10.3389/fenrg.2018.00141.

Borshchevskaya L.N., Gordeeva T.L., Kalinina A.N., Sineoky S.P. Spektrofotometricheskoe opredelenie molochnoj kisloty. *Zhurnal analiticheskoy himii*, 2016, vol. 71, no. 8, pp. 787–790. DOI: 10.7868/S004445021608003X. (In Russ.)

Dumbrepatil A., Adsul M., Chaudhari S., Khire J., Gokhale D. Utilization of molasses sugar for lactic acid production by *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *delbrueckii* mutant Uc-3 in batch fermentation. *Applied and Environmental Microbiology*, 2008, vol. 74, pp. 333–335. DOI: 10.1128/AEM.01595-07.

Fan Y., Zhou C., Zhu X. Selective catalysis of lactic acid to produce commodity chemicals. *Catalysis Reviews: Science and Engineering*, 2009, vol. 51, pp. 293–324. Doi.org/10.1080/01614940903048513.

Ha D.T., Kanarskaya Z.A., Kanarsky A.V., Shcherbakov A.V., Shcherbakova E.N. Vliyanie istochnika ugleroda na sintez biomassy i ekzopolisaharidov bakteriyami *Paenibacillus mucilaginosus*. *IVUZ. Prikladnaya himiya i biotekhnologiya*, 2019, vol. 9, no. 3, pp. 509–518. DOI: 10.21285/2227-2925-2019-9-3-509-518. (In Russ.)

Mingazova L.A., Kanarsky A.V., Kryakunova E.V., Kanarskaya Z.A. Sintez molochnoj kisloty gribom *Rhizopus oryzae* F-1030 na pitatel'nyh sredah iz sul'fitnyh shchelokov. *IVUZ. Lesnoj zhurnal*, 2020, no. 2, pp. 146–158. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-146-158. (In Russ.)

Mingazova L.A., Kryakunova E.V., Kanarskaya Z.A., Kanarsky A.V. Primenenie sul'fitnyh shchelokov v kachestve pitatel'noj sredy dlya kul'tivirovaniya producenta molochnoj kisloty *Rhizopus oryzae* F-1030. *IVUZ. Lesnoj zhurnal*, 2021a, no. 5, pp. 163–173. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-163-173. (In Russ.)

Mingazova L.A., Kryakunova Ye.V., Kanarskaya Z.A., Kanarskiy A.V., Kruchina-Bogdanov I.V., Belkina YE.V. Vliyanie gidroliticheskoy obrabotki na sodержanie reduciruyushchih veshchestv v nejtral'no-sul'fitnyh shchelokah. *Himiya rastitel'nogo syr'ya*, 2021b, no. 3, pp. 309–316. DOI: 10.14258/jcprm.2021039160. (In Russ.)

Morozova Yu.A., Skvortsov E.V., Alimova F.K., Kanarsky A.V. Biosintez ksilanaz i cellyulaz gribami roda *Trichoderma* na poslespirtovoj barde. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2012, Vol. 15, no. 19, pp. 120–122. (In Russ.)

Rawoof S.A.A., Kumar P.S., Vo D.-V.N., Devaraj K., Man, Y., Devaraj T., Subramanian S. Production of optically pure lactic acid by microbial fermentation. *Environmental Chemistry Letters*, 2020, vol. 19, pp. 539–556. Doi.org/10.1007/s10311-020-01083-w.

Saito K., Hasa Y., Abe H. Production of lactic acid from xylose and wheat straw by *Rhizopus oryzae*. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2012, vol. 114, pp. 166–169. Doi.org/10.1016/j.jbiosc.2012.03.007.

Tejayadi S., Cheryan M. Lactic acid from cheese whey permeate. Productivity and economics of a continuous membrane bioreactor. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1995, vol. 43, pp. 242–248.

Материал поступил в редакцию 27.10.2023

---

**Мингазова Л.А., Крякунова Е.В., Галиева А.Р., Канарская З.А., Канарский А.В., Кручина-Богданов И.В., Белкина Е.В.** Влияние способа культивирования гриба *Rhizopus oryzae* F-1030 на гидролизатах нейтрально-сульфитного щелока на эффективность синтеза молочной кислоты // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 250. С. 405–422. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.405-422

Производство молочной кислоты в промышленном масштабе ведется в основном путем микробиологической ферментации сахаросодержащего сырья. При этом стоимость субстрата для промышленного производства молочной кислоты определяет практически половину стоимости всего производства. Использование индивидуальных сахаров в качестве источника углерода для микробиологического синтеза молочной кислоты приводит к сильному удорожанию производства. Лигноцеллюлозная биомасса является одним из наиболее распространенных природных возобновляемых источников углерода, применение которой в биотехнологическом производстве в качестве сахаросодержащего субстрата ограничено отсутствием у большинства промышленных штаммов микроорганизмов целлюлолитических ферментов. Мицелиальный гриб *Rhizopus oryzae* является промышленным продуцентом молочной кислоты, способным метаболизировать лигноцеллюлозу. Рост микроорганизмов, потребление субстрата и выход молочной кислоты



определяется активностью метаболизма клеток продуцента и зависит от условий культивирования. Регуляция микробиологического производства молочной кислоты осуществляется изменением таких факторов среды, как температура, pH, концентрация питательных веществ в субстрате и концентрация конечного продукта. В работе осуществлялся подбор условий культивирования гриба *R. oryzae* F-1030 на нейтрально-сульфитных щелоках, позволяющие получить оптимальное соотношение биомассы и количества синтезируемой молочной кислоты. Показано, что кислотность питательной среды зависит от концентрации метаболитов, продуцируемых грибом на разных стадиях физиологической зрелости. Изменение содержания редуцирующих веществ в питательной среде обусловлено скоростью роста клеток гриба *R. oryzae* F-1030 и активностью целлюлолитических ферментов. Статистически значимых различий в количестве синтезируемой молочной кислоты и приросте биомассы в зависимости от способа культивирования гриба *R. oryzae* F-1030 на ферментализате нейтрально-сульфитного щелока выявлено не было. На прирост биомассы гриба *R. oryzae* F-1030 оказывает влияние как вид гидролизующего агента (кислота или ферментный препарат), так и состав питательной среды, в частности наличие солей азота, фосфора, серы, калия. При культивировании гриба *R. oryzae* F-1030 на кислотном гидролизате нейтрально-сульфитного щелока рекомендуется использовать периодический способ культивирования.

**Ключевые слова:** нейтрально-сульфитный щелок, кислотный гидролиз, ферментативный гидролиз, гриб *Rhizopus oryzae* F-1030, молочная кислота, периодический способ культивирования, отъемно-доливной способ культивирования.

**Mingazova L.A., Kryakunova E.V., Galieva A.R., Kanarskaya Z.A., Kanarskii A.V., Kruchina-Bogdanov I.V., Belkina E.V.** The fungus *Rhizopus oryzae* F-1030 cultivating mode on neutral sulfite liquor hydrolysates affects the lactic acid synthesis efficiency. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 250, pp. 405–422 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.405-422

The industrial lactic acid production is based on microbiological fermentation of sugar-containing feedstock. Generally, the price on the substrate controls almost half the cost of the entire production. The use of pure individual sugars as a carbon source for the microbiological lactic acid synthesis leads to a significant rise in production expenses. Lignocellulosic biomass is one of the most common natural renewable sources of carbon, the use of which in biotechnological production as a carbohydrate-containing substrate is limited mostly due to the lack of cellulolytic enzymes in most strains of microorganisms used on industrial scale. The filamentous fungus *Rhizopus oryzae* is an industrial lactic acid producing microorganism capable of metabolizing lignocellulose. The growth of microbial mass, substrate consumption rate and lactic

acid yield are controlled by the metabolic activity of the producer cells, the latter depending on the cultivation mode. The microbiological lactic acid production regulation is carried out by changing such factors of nutrient medium as temperature, pH, nutrient concentration in the substrate and the final product concentration. The work involved the conditions' selection for fungus *R. oryzae* F-1030 cultivation on neutral sulfite liquor, which made it possible to attain the optimal ratio of biomass and the synthesized lactic acid yield. It has been shown that the nutrient medium acidification is affected by the physiological maturity of the fungus. The level of reducing substances in the nutrient medium is controlled by the growth rate of the fungus *R. oryzae* F-1030 cells and the activity of its cellulolytic enzymes. There were no statistically significant differences in the amount of synthesized lactic acid and biomass growth depending on the mode of the fungus *R. oryzae* F-1030 cultivation on the neutral sulfite liquor after treatment with externally added enzymes. The growth of fungus *R. oryzae* F-1030 biomass is influenced by both the type of hydrolyzing agent (acid or enzyme) and the composition of the nutrient medium, in particular the presence of nitrogen, phosphorus, sulfur, and potassium salts. The batch cultivation mode was demonstrated as optimal for the fungus *R. oryzae* F-1030 to grow on the neutral sulfite liquor after acid hydrolysis.

**Keywords:** neutral sulfite liquor, acid hydrolysis, enzymatic hydrolysis, fungus *Rhizopus oryzae* F-1030, lactic acid, batch cultivation method, weaning-topping cultivation method.

---

**МИНГАЗОВА Лейсан Азатовна** – старший преподаватель кафедры пищевой инженерии Казанского национального исследовательского технологического университета, кандидат технических наук. SPIN-код: 9532-4010. ORCID: 0000-0003-3289-3977

420015, ул. К. Маркса, д. 68, г. Казань, Республика Татарстан, Россия.  
E-mail: zleisan1@mail.ru

**MINGAZOVA Leysan A.** – PhD (Technical), Senior Lecturer of the Department of Food Engineering, Kazan National Research Technological University. SPIN-code: 9532-4010. ORCID: 0000-0003-3289-3977

420015. K. Marx str. 68. Kazan. Republic of Tatarstan. Russia. E-mail: zleisan1@mail.ru

**КРЯКУНОВА Елена Вячеславовна** – доцент кафедры пищевой инженерии Казанского национального исследовательского технологического университета, кандидат биологических наук. SPIN-код: 1321-1832. ORCID: 0000-0003-4563-9847

420015, ул. К. Маркса, д. 68, г. Казань, Республика Татарстан, Россия.  
E-mail: oscillatoria@rambler.ru

**KRYAKUNOVA Elena V.** – PhD (Biology), Associate Professor, Department of Food Engineering, Kazan National Research Technological University. SPIN code: 1321-1832. ORCID: 0000-0003-4563-9847

420015, К. Маркса, д. 68, Казань, Республика Татарстан, Россия. E-mail: oscillatoria@rambler.ru

**ГАЛИЕВА Айгуль Рафиковна** – ассистент кафедры пищевой инженерии Казанского национального исследовательского технологического университета.

420015, ул. К. Маркса, д. 68, г. Казань, Республика Татарстан, Россия. E-mail: af.signal@mail.ru

**GALIEVA Aigul R.** – Assistant of the Department of Food Engineering, Kazan National Research Technological University.

420015, К. Маркса, д. 68, Казань, Республика Татарстан, Россия. E-mail: af.signal@mail.ru

**КАНАРСКАЯ Зоя Альбертовна** – доцент кафедры пищевой биотехнологии Казанского национального исследовательского технологического университета, кандидат технических наук. SPIN-код: 2787-1694. ORCID: 0000-0002-8194-6185.

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 the Department of Food Biotechnology, Kazan National Research Technological University. SPIN code: 2787-1694. ORCID: 0000-0002-8194-6185

420015, К. Маркса, д. 68, Казань, Республика Татарстан, Россия. E-mail: zosya\_kanarskaya@mail.ru

**КАНАРСКИЙ Альберт Владимирович** – профессор кафедры пищевой биотехнологии Казанского национального исследовательского технологического университета, доктор технических наук, профессор. SPIN-код: 2196-2000. ORCID: 0000-0002-3541-2588

420015, ул. К. Маркса, д. 68, г. Казань, Республика Татарстан, Россия. E-mail: alb46@mail.ru

**KANARSKII Albert V.** – DSc (Technical), Professor of the Department of Food Biotechnology of the Kazan National Research Technological University, SPIN code: 2196-2000. ORCID: 0000-0002-3541-2588

420015, К. Маркса, д. 68, Казань, Республика Татарстан, Россия. E-mail: alb46@mail.ru

**КРУЧИНА-БОГДАНОВ Игорь Вадимович** – генеральный директор ООО «АМТ», кандидат химических наук.

194021, пер. Институтский, д. 5Б, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: igogo011@gmail.com

**KRUCHINA-BOGDANOV Igor V.** – PhD (Chemical), General manager of AMT LLC.

194021. Institutskiy per. 5B. St. Petersburg. Russia. E-mail: igogo011@gmail.com

**БЕЛКИНА Екатерина Васильевна** – инженер-технолог, заместитель директора по качеству ООО «Прикамский картон».

614037, ул. Бумажников, д. 1, г. Пермь, Россия. E-mail: ekaterina.belkina@pcbkr.ru

**BELKINA Ekaterina V.** – Process Engineer, Deputy Director for Quality of Prikamsky Karton LLC.

614037. Bumazhnikov str. 1. Perm. Russia. E-mail: ekaterina.belkina@pcbkr.ru

## СОДЕРЖАНИЕ

---

Предисловие .....	5
<b>1. ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО</b>	
<i>Гурьянов М.О., Антонов О.И.</i> Изменчивость размерно-весовых показателей междупочвенных ветвей деревьев ели европейской различных классов роста .....	6
<i>Лукашик Е.Е., Алексеев А.С.</i> Геоинформационное картирование и типологическая классификация охотничьих угодий на основе данных дистанционного зондирования земли .....	23
<i>Ветчинникова Л.В., Жигунов А.В., Гудкова К.А., Савельев О.А.</i> Современное состояние насаждений карельской березы в Ленинградской области .....	46
<i>Шишкина А.А., Карпун Н.Н.</i> Динамика развития очагов корневой гнили в географических культурах сосны Серебряноборского опытного лесничества .....	67
<i>Панин И.А., Залесов С.В., Аржанников Ю.А.</i> Ресурсы ягодных растений на полигонах добычи золота и платины .....	83
<i>Наквасина Е.Н., Цветков И.В., Давыдов А.В., Корсакова А.О.</i> Трансформация сосняка кустарничково-сфагнового при длительном осушении в северном лесном районе .....	98
<i>Шишлянникова А.Б., Данилов Д.А., Змитрович И.В., Бачериков И.В.</i> Фитопатологическая характеристика дуба черешчатого в различных условиях произрастания .....	116
<i>Мельник А.И., Чанчикова С.А., Вайс А.А., Немич В.Н., Михайлов П.В., Лузина Е.Ф., Мантулина А.В.</i> Углеродный пул древесного опада сосняков подтаежно-лесостепного района Средней Сибири за вегетационный период 2022 года .....	144
<i>Логинова А.А., Егоров А.А., Бялт В.В.</i> Новые таксоны деревьев и кустарников ( <i>Spiraea</i> × <i>Schinabecki</i> , <i>Swida rugosa</i> , <i>Ulmus</i> ‘Columella’) в зеленых насаждениях г. Санкт-Петербурга .....	163
<i>Усольцев В.А., Цепордей И.С., Плюха Н.И.</i> Взаимосвязи диаметров ствола и кроны лесообразующих видов Евразии .....	176
<i>Примаков Н.В.</i> Влияние соотношения угодий в агролесоландшафтах на продуктивность сельскохозяйственных культур .....	200
<i>Двадцатова Т.В., Изотова Т.В., Мельничук И.А., Часовская В.В.</i> Почвенные условия и состояние зеленых насаждений Южно-Приморского парка в Санкт-Петербурге .....	212
	423

## 2. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ЛЕСОЗАГОТОВОК

<i>Анисимов С.Е., Царев Е.М., Рукомойников К.П., Анисимов И.С., Анисимов Н.С., Макаров В.Е.</i> Многозвенный комбинированный манипулятор для рубок ухода за лесом .....	238
<i>Свойкин Ф.В., Королько Н.С., Узрюмов С.А., Россихин К.В.</i> Построение трассы канатной дороги математически-программными методами .....	252
<i>Зверев И.А., Трофимов А.В.</i> Влияние системы выравнивания платформы на нагруженность силовой установки валочно-пакетирующей машины в процессе подтягивания .....	273
<i>Луканин Б.Е.</i> Особенности выбора режимов лазерной термообработки плужного лемеха из стали 65Г .....	288
<i>Новиков М.С., Куницкая О.А., Григорьев И.В.</i> Практическое исследование динамики температур слоев лесного почвогрунта криолитозоны .....	303
<i>Хитров Е.Г., Андронов А.В., Сухов А.С., Никонов В.С., Петросян С.С., Божбов В.Е.</i> Изучение возможностей компьютерного зрения для определения обособленных препятствий на грунтовых лесных дорогах .....	318

## 3. ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ, ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЕРЕВОПЕРЕРАБОТКИ

<i>Артёмов А.В., Власов Н.Г., Ершова А.С., Вураско А.В., Бурындин В.Г.</i> Влияния содержания бересты в пресс-сырье на свойства пластика без связующего на основе березовых опилок .....	333
--	-----

## 4. ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ. БИОТЕХНОЛОГИЯ

<i>Мамбетова С.Р., Бахтиярова А.В.</i> Сорбционная очистка ксиланного гидролизата активированным углем из целлолигнина .....	353
<i>Роцин В.И., Юрина Н.А., Миксон Д.С., Короткий В.П., Рыжов В.А.</i> Экстрактивные вещества хвойной кормовой фитодобавки и их влияние на продуктивность сельскохозяйственных животных при стрессах .....	366
<i>Зайцев А.В., Дубовый В.К., Симонова Е.И., Ковернинский И.Н., Кейзер П.М.</i> Разработка технологии полимерпесчаных плит на основе отходов макулатуры марки МС-5Б .....	383
<i>Фомичева Т.И., Колужникова Е.В.</i> Сравнительный анализ и оценка состава кислотных компонентов в растительных маслах .....	393
<i>Мингазова Л.А., Крякунова Е.В., Галиева А.Р., Канарская З.А., Канарский А.В., Кручина-Богданов И.В., Белкина Е.В.</i> Влияние способа культивирования гриба <i>Rhizopus orizae</i> F-1030 на гидролизатах нейтрально-сульфитного щелока на эффективность синтеза молочной кислоты .....	405

# CONTENTS

---

Preface .....	5
<b>1. FORESTRY</b>	
<i>Guryanov M.O., Antonov O.I.</i> Variability of size-weight parameters of interwhorl branches of European spruce trees of different growth classes .....	6
<i>Lukashik E.E., Alekseev A.S.</i> Geoinformation mapping and classification of hunting grounds based on remote sensing data .....	23
<i>Vetchinnikova L.V., Zhigunov A.V., Gudkova K.A., Savel'ev O.A.</i> Current State of Curly birch Plantations in Leningrad Oblast .....	46
<i>Shishkina A.A., Karpun N.N.</i> Dynamics and development of annosum root rot in Scots pine provenances in Serebryanoborsky experimental forestry .....	67
<i>Panin I.A., Zalesov S.V., Arzhannikov Yu.A.</i> Formation of berry living resources of field layer cover on gold and platinum polygons by washing technologies .....	83
<i>Nakvasina E.N., Tsvetkov I.V., Davydov A.V., Korsakova A.O.</i> Transformation of shrub-sphagnum pine under prolonged drainage in the northern forest area .....	98
<i>Shishlyannikova A.B., Danilov D.A., Zmitrovich I.V., Bacherikov I.V.</i> Phytopathological characteristics of <i>Quercus robur</i> in different growing conditions .....	116
<i>Melnik A.I., Chanchikova S.A., Vais A.A., Nemich V.N., Mikhaylov P.V., Luzina E.F., Mantulina A.V.</i> Carbon pool of tree litter of pine forests in the subtaiga-forest-steppe region of Central Siberia for the growing season of 2022 .....	144
<i>Loginova A.A., Egorov A.A., Byalt V.V.</i> New taxa of trees and shrubs ( <i>Spiraea</i> × <i>schinabecki</i> , <i>Swida rugosa</i> , <i>Ulmus</i> 'Columella') in green spaces of St. Petersburg .....	163
<i>Usoltsev V.A., Tsepordey I.S., Plyukha N.I.</i> Interrelations of stem and crown diameters of forest-forming species of Eurasia .....	176
<i>Primakov N.V.</i> Influence of the ratio of land in agroforest landscapes on the productivity of agricultural crops .....	200
<i>Dvadtsatova T.V., Izotova T.V., Melnichuk I.A., Chasovskaya V.V.</i> Soil conditions and the state of the green spaces of the Yuzhno-Primorskiy Park in St. Petersburg .....	212
	425

## 2. TECHNOLOGY AND EQUIPMENT OF LOGGING INDUSTRIES

<i>Anisimov S.E., Carev E.M., Rukomojnikov K.P., Anisimov I.S., Anisimov N.S., Makarov V.E.</i> Multi-link combination manipulator for care thinning .....	238
<i>Svoikin F.V., Ugryumov S.A., Korolkov N.S., Rossikhin K.V.</i> Construction of a cable car route using mathematical and software methods .....	252
<i>Zverev I.A., Trofimov A.V.</i> The influence of the platform leveling system on the stresses of the power plant of a feller-buncher during the pulling process .....	273
<i>Lukanin B.E.</i> Features of the choice of laser heat treatment modes for a plow share made of 65G steel .....	288
<i>Novikov M.S., Kunitskaya O.A., Grigoriev I.V.</i> Practical study of the temperature dynamics of the layers of the forest soil of the cryolithozone .....	303
<i>Khitrov E.G., Andronov A.V., Sukhov A.S., Nikonov V.S., Petrosyan S.S., Bozhbov V.E.</i> Study of computer vision methods for identifying obstacles on forest roads .....	318

## 3. WOOD SCIENCE. MECHANICAL WOODWORKING INDUSTRY

<i>Artyomov A.V., Vlasov N.G., Ershova A.S., Vurasko A.V., Buryndin V.G.</i> Influence of birch bark content in press raw materials on the properties of birch sawdust-based plastic without resins .....	333
---	-----

## 4. CHEMICAL TECHNOLOGY OF WOOD. BIO TECHNOLOGY

<i>Mambetova S.R., Bakhtiiarova A.V.</i> Sorption purification of xylose hydrolysate by activated carbon from cellolignin .....	353
<i>Roshchin V.I., Yurina N.A., Mikson D.S., Korotky V.P., Ryzhov V.A.</i> Extractive substances of coniferous feed phyto additives and their influence of the productivity of farm animals under stress .....	366
<i>Zaitsev A.V., Dubovy V.K., Simonova E.I., Koverninsky I.N., Keizer P.M.</i> Development of technology for polymer-sanded plates based on waste paper of the MS-5B brand .....	383
<i>Fomicheva T.I., Koluzhnikova E.V.</i> The avocado oil and pumpkin seed oil may be used as the source of the fatty acids .....	393
<i>Mingazova L.A., Kryakunova E.V., Galieva A.R., Kanarskaya Z.A., Kanarskii A.V., Kruchina-Bogdanov I.V., Belkina E.V.</i> The fungus <i>Rhizopus orizae</i> F-1030 cultivating mode on neutral sulfite liquor hydrolysates affects the lactic acid synthesis efficiency .....	405



**ДЛЯ ЗАМЕТОК**

Научное издание

ИЗВЕСТИЯ  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОЙ  
ЛЕСОТЕХНИЧЕСКОЙ  
АКАДЕМИИ

Выпуск 250

*Издаются с 1886 года*

*Редактор Л.Я. Титова*

*Компьютерная верстка Е.А. Корнуковой*

---

Подписано в печать с оригинал-макета 28.10.2024. Выход в свет 29.11.2024. Формат 150\*210.  
Печать цифровая. Уч.-изд. л. 26.75. Печ. л. 26.75. Тираж 500 экз. Заказ № 72 С 208. Свободная цена

---

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет  
имени С.М. Кирова

Издательско-полиграфический отдел СПбГЛТУ  
194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., 5, литер У