

# ЛЕСНОЙ ВЕСТНИК / FORESTRY BULLETIN

Научно-информационный журнал

№ 3 ' 2024 Том 28

## Главный редактор

**Санаев Виктор Георгиевич**, д-р техн. наук, профессор, директор Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

## Редакционный совет журнала

**Артамонов Дмитрий Владимирович**, д-р техн. наук, профессор, Пензенский ГУ, Пенза  
**Ашраф Дарвиш**, ассоциированный профессор, факультет компьютерных наук, Университет Хелуан, Каир, Египет, Исследовательские лаборатории Machine Intelligence (MIR Labs), США  
**Беляев Михаил Юрьевич**, д-р техн. наук, начальник отдела, зам. руководителя НТЦ РКК «Энергия» им. С.П. Королева, Москва  
**Бемманн Альбрехт**, профессор, Дрезденский технический университет, Институт профессуры для стран Восточной Европы, Германия  
**Бессчетнов Владимир Петрович**, д-р биол. наук, профессор, Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия, Нижний Новгород  
**Бугаёв Александр Степанович**, академик РАН, д-р физ.-мат. наук, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва  
**Бурмистрова Ольга Николаевна**, д-р техн. наук, профессор, Ухтинский государственный технический университет  
**Говедар Зоран**, член-корреспондент Академии наук и искусств Республики Сербской (АНИРС), профессор, доктор с.-х. наук, Университет г. Бая Лука, Республика Сербская, Босния и Герцеговина  
**Деглиз Ксавье**, д-р с.-х. наук, профессор, Академик IAWS, академик Французской академии сельского хозяйства, Нанси, Франция  
**Драпалюк Михаил Валентинович**, д-р техн. наук, профессор, ректор ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, Воронеж  
**Евдокимов Юрий Михайлович**, канд. хим. наук, профессор, академик Нью-Йоркской академии наук, чл.-корр. РАЕН, член центрального правления Нанотехнологического общества России, Москва  
**Залесов Сергей Вениаминович**, д-р с.-х. наук, профессор, УГЛТУ, Екатеринбург  
**Запруднов Вячеслав Ильич**, д-р техн. наук, профессор, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва  
**Иванкин Андрей Николаевич**, д-р хим. наук, профессор, академик МАНВШ, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва  
**Кирюхин Дмитрий Павлович**, д-р хим. наук, ИПХФ РАН, Черноголовка  
**Классен Николай Владимирович**, канд. физ.-мат. наук, ИФТТ РАН, Черноголовка  
**Ковачев Атанас**, д-р архитектуры, профессор, член-корр. Болгарской АН, профессор Международной Академии Архитектуры, Иностраный член Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Почетный профессор Московского архитектурного института (Государственной академии), Варненский свободный университет им. «Черноризца Храбра», Варна, Болгария.  
**Кожухов Николай Иванович**, д-р экон. наук, профессор, академик РАН, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва  
**Козлов Александр Ильич**, канд. техн. наук, ученый секретарь Совета ОАО «НПО ИТ», Королёв  
**Комаров Евгений Геннадиевич**, д-р техн. наук, профессор, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва  
**Корольков Анатолий Владимирович**, д-р физ.-мат. наук, профессор, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва  
**Котиев Георгий Олегович**, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва  
**Кох Нильс Элерс**, д-р агрономии в области лесной политики, профессор, Президент IUFRO, Центр лесного и ландшафтного планирования университета, Копенгаген, Дания

**Кротт Макс**, профессор, специализация «Лесная политика», Георг-Аугуст-Университет, Геттинген, Германия  
**Липаткин Владимир Александрович**, канд. биол. наук, профессор, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва  
**Лу Хайбао**, д-р, профессор, заместитель директора Национальной ключевой лаборатории науки и технологий по передовым композитам в особых условиях, Харбинский политехнический университет, Китай  
**Лукина Наталья Васильевна**, член-корреспондент РАН, профессор, директор ЦЭПЛ РАН, зам. Председателя Научного совета по лесу РАН, Москва  
**Макуев Валентин Анатольевич**, д-р техн. наук, доцент, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва  
**Малашин Алексей Анатольевич**, д-р физ.-мат. наук, профессор, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва  
**Мартьянок Александр Александрович**, академик РАН, д-р с.-х. наук, ФБУ ВНИИЛМ, Москва  
**Мелехов Владимир Иванович**, д-р техн. наук, профессор, академик РАЕН, САФУ им. М.В. Ломоносова, Архангельск  
**Моисеев Александр Николаевич**, ст. науч. сотр., Европейский институт леса, г. Йоэнсуу, Финляндия  
**Наквасина Елена Николаевна**, д-р с.-х. наук, профессор, Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, Высшая школа естественных наук и технологий, Архангельск  
**Нимц Петер**, д-р инж. наук, профессор физики древесины, Швейцарская высшая техническая школа Цюриха  
**Обливин Александр Николаевич**, д-р техн. наук, профессор, академик РАЕН, МАНВШ, заслуженный деятель науки и техники РФ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва  
**Павленко Александр Николаевич**, член-корреспондент РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт теплофизики имени С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск  
**Пастори Золтан**, д-р техн. наук, доцент, директор Инновационного центра Шопронского университета, Венгрия  
**Полещук Ольга Митрофановна**, д-р техн. наук, профессор, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва  
**Полуэктов Николай Павлович**, д-р техн. наук, профессор, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва  
**Родин Сергей Анатольевич**, д-р с.-х. наук, профессор, академик РАН, ВНИИЛМ, Москва  
**Рыкунин Станислав Николаевич**, д-р техн. наук, профессор, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва  
**Стрекалов Александр Федорович**, канд. техн. наук, АО «Корпорация Тактическое военное вооружение», Королёв  
**Теодоронский Владимир Сергеевич**, д-р с.-х. наук, профессор, академик РАЕН, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва  
**Титов Анатолий Матвеевич**, канд. техн. наук, зам. начальника отделения, ученый секретарь Совета ЦУП ЦНИИМАШ, Королёв  
**Тричков Нено Иванов**, профессор, доктор, проректор по научной работе Лесотехнического университета, София, Болгария  
**Федотов Геннадий Николаевич**, д-р биол. наук, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва  
**Чубинский Анатолий Николаевич**, д-р техн. наук, профессор, СПбГЛТУ, Санкт-Петербург  
**Чумаченко Сергей Иванович**, д-р биол. наук, профессор, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва  
**Шимкович Дмитрий Григорьевич**, д-р техн. наук, профессор, ООО «Кудесник», Москва  
**Щепаченко Дмитрий Геннадьевич**, д-р биол. наук, доцент, старший научный сотрудник Международного института прикладного системного анализа (IIASA), Австрия

Ответственный секретарь Расева Елена Александровна

Редактор Л.В. Сивай

Перевод М.А. Карлухиной

Электронная версия Ю.А. Ражской

Учредитель МГТУ им. Н.Э. Баумана

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-68118 от 21.12.2016

Входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

Материалы настоящего журнала могут быть перепечатаны и воспроизведены полностью или частично с письменного разрешения издательства  
Выходит с 1997 года

Адрес редакции и издательства  
141005, Мытищи-5, Московская обл.,  
1-я Институтская, д. 1  
(498) 687-41-33,  
les-vest@mgul.ac.ru

Дата выхода в свет 15.05.2024

Тираж 600 экз.

Заказ №

Объем 17,5 п. л.

Цена свободная

# LESNOY VESTNIK / FORESTRY BULLETIN

Scientific Information journal

No. 3 ' 2024 Vol. 28

## Editor-in-chief

**Sanaev Victor Georgievich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Director of BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

## Editorial council of the journal

**Artamonov Dmitriy Vladimirovich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Penza State  
**Ashraf Darwish**, Associate Professor of Computer Science, Faculty of Computer Science, Helwan University, Cairo, Egypt, Machine Intelligence Research Labs (MIR Labs), USA  
**Belyaev Mikhail Yur'evich**, Dr. Sci. (Tech.), Head of Department, Deputy Director of S.P. Korolev RSC «Energia», Moscow  
**Bemman Al'brekht**, Professor, the Dresden technical university, professorate Institute for countries of Eastern Europe, Germany  
**Besschetnov Vladimir Petrovich**, Professor, Dr. Sci. (Biol.), Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, Nizhny Novgorod  
**Bugaev Aleksandr Stepanovich**, Academician of the RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow  
**Burmistrova Olga Nikolaevna**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Ukhta State Technical University, Ukhta  
**Chubinskiy Anatoliy Nikolaevich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Saint Petersburg State Forest Technical University, St. Petersburg  
**Chumachenko Sergey Ivanovich**, Professor, Dr. Sci. (Biol.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Deglise Xavier**, Dr. Sci. (Agric.), Academician of the IAWS, Academician of the French Academy of Agriculture, Nancy, France  
**Drapalyuk Mikhail Valentinovich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Rector of VSUFT, Voronezh  
**Evdokimov Yuriy Mikhaylovich**, Professor, Ph. D. (Chemical); academician of the New York Academy of Sciences, corr. Academy of Natural Sciences, a member of the Central Board of Nanotechnology Society of Russia, Moscow  
**Fedotov Gennadiy Nikolaevich**, Dr. Sci. (Biol.), Lomonosov Moscow State University, Moscow  
**Govedar Zoran**, Corresponding member of the Academy of Sciences and Arts of the Republika Srpska (ASARS), Professor, Doctor of Forestry. University of Banja Luka, Republic Srpska, Bosnia and Herzegovina  
**Ivankin Andrey Nikolaevich**, Professor, Dr. Sci. (Chemical), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Kiryukhin Dmitriy Pavlovich**, Dr. Sci. (Chemical), IPCP RAS, Chernogolovka  
**Klassen Nikolay Vladimirovich**, Ph. D. (Phys.-Math.), ISSP RAS, Chernogolovka  
**Kovachev Atanas**, Corresponding Member of the Bulgarian Academy of Sciences, Dr. Sci., Foreign member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACN), Honorary Professor of the Moscow Architectural Institute (State Academy), Varna, Bulgaria  
**Kokh Nil's Elers**, Professor, the Dr. of agronomics in the field of forest policy, the President of IUFRO, the Center of forest and landscape planning of university Copenhagen, Denmark  
**Komarov Evgeniy Gennadievich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Korol'kov Anatoliy Vladimirovich**, Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Kotiev George Olegovich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Kozlov Aleksandr Il'ich**, Ph. D. (Tech.), Scientific Secretary of the Board of «NPO IT», Korolev  
**Kozhukhov Nikolay Ivanovich**, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Econ.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Krott Maks**, Professor of Forest polity specialization, George-August-Universitet, Goettingen

**Lipatkin Vladimir Aleksandrovich**, Professor, Ph. D. (Biol.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Lu Haibao**, Dr., Tenure-track Professor, Vice Director of the National Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Composites in Special Environments, Harbin Institute of Technology (HIT), China  
**Lukina Natalya Vasilyevna**, Corresponding Member of the RAS, Professor, Director of the Center for Sub-Settlement Research RAS, Deputy Chairperson of the Forest Research Council  
**Makuev Valentin Anatol'evich**, Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Malashin Alexey Anatolyevich**, Professor, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Martynuk Aleksandr Aleksandrovich**, Academician of the RAS, Dr. Sci. (Agric.), VNIILM, Moscow  
**Melekhov Vladimir Ivanovich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, NARFU, Arkhangelsk  
**Moiseyev Aleksandr Nikolaevich**, Senior Researcher, European Forest Institute, Joensuu, Finland  
**Nakvasina Elena Nikolaevna**, Professor, Dr. Sci. (Agric.), Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Higher School of Natural Sciences and Technology, Arkhangelsk  
**Niemz Peter**, Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c., Prof. for Wood Physics, ETH Zurich (Swiss Federal Institute of Technology in Zurich); Eidgenossische Technische Hochschule Zurich  
**Oblivin Aleksandr Nikolaevich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Academician of the Russian Academy of Natural Sciences and MANVSh, Honored worker of science and equipment of the Russian Federation, BMSTU, Moscow  
**Pasztory, Zoltan**, Dr., Ph.D., Director of Innovation Center, University of Sopron, Sopron, Hungary  
**Pavlenko Aleksandr Nikolaevich**, Corresponding Member of the RAS, Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Kutateladze Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk  
**Poleshchuk Ol'ga Mitrofanovna**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Poluektov Nikolai Pavlovich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Rodin Sergey Anatol'evich**, Professor, the Dr. Sci. (Agric.), ARRISMF, Moscow  
**Rykunin Stanislav Nikolaevich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Shchepashchenko Dmitry Gennadievich**, Associate Professor, Dr. Sci. (Biol.), Senior Researcher, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Austria  
**Shimkovich Dmitriy Grigor'evich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), OOO «Kudesnik», Moscow  
**Strekalov Aleksandr Fedorovich**, Ph. D. (Tech.), JSC «Tactical Missiles Corporation», Korolev  
**Teodoronskiy Vladimir Sergeevich**, Professor, Dr. Sci. (Agric.), academician of the Russian Academy of Natural Sciences, BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Titov Anatoliy Matveevich**, Ph. D. (Tech.), Deputy Chief of Department, Scientific Secretary of the Board of MCC TSNIIIMASH, Korolev  
**Trichkov Neno Ivanov**, professor, Dr., Vice-Rector for Research, Forestry University, Sofia, Bulgaria  
**Zalesov Sergey Veniaminovich**, Professor, Dr. Sci. (Agric.), USFEU, Ekaterinburg  
**Zapudnov Vyacheslav Il'ich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

Assistant Editor Raseva Elena Aleksandrovna

Editor L.V. Sivay

Translation by M.A. Karpukhina

Electronic version by Yu.A. Ryazhskaya

## Founder BMSTU

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media

Certificate on registration ПИ № ФС 77-68118 of 21.12.2016

The journal is included in the list of approved VAK of the Russian Federation for

editions for the publication of works of competitors of scientific degrees

Materials of the present magazine can be reprinted and reproduced fully or partly with the written permission of publishing house

It has been published since 1997

Publishing house  
141005, Mytishchi, Moscow Region, Russia  
1st Institutskaya street, 1  
(498) 687-41-33  
les-vest@mgul.ac.ru

It is sent for the press 15.05.2024  
Circulation 600 copies  
Order №  
Volume 17,5 p. p.  
Price free

# СОДЕРЖАНИЕ

## БИОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА

<b>Дерюгин А.А., Глазунов Ю.Б.</b> Территориальное размещение деревьев в южно-таежных березняках с подпологовой популяцией ели .....	5
<b>Осипенко А.Е., Залесов С.В.</b> Обеспеченность подростом сосновых насаждений Алтае-Новосибирского района лесостепей и ленточных боров.....	15
<b>Ковалев Р.Н., Побединский В.В., Иовлев Г.А.</b> Сбалансированное развитие региона и лесной ресурсный потенциал .....	26
<b>Мохначев П.Е., Махнева С.Г., Менщиков С.Л., Поспелова Н.А.</b> Сопряженная изменчивость признаков женской генеративной системы сосны обыкновенной ( <i>Pinus sylvestris</i> L.) в условиях магнетитового загрязнения .....	37
<b>Танцырев Н.В.</b> Условия и перспективы формирования послепожарного зеленомошного кедровника на стадии молодняка .....	48
<b>Кабонен А.В., Грязькин А.В., Гаврилова О.И.</b> Оценка состояния лесных культур с использованием беспилотного летательного аппарата.....	57
<b>Наквасина Е.Н., Коптев С.В., Никитина М.В.</b> Субстраты на основе торфа и компостированного активного ила Архангельского целлюлозно-бумажного комбината для выращивания посадочного материала хвойных пород .....	67
<b>Ушкова Д.А., Горепекин И.В., Федотов Г.Н., Батырев Ю.П.</b> Уточнение представлений о механизме водоустойчивости почв .....	78
<b>Майорова Е.И., Шершнева В.Д.</b> Городские леса Москвы в свете изменений Лесного кодекса Российской Федерации 2023 года.....	87

## ДЕРЕВООБРАБОТКА И ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

<b>Запруднов В.И., Никитин В.В., Карпачев С.П., Махнин Г.А.</b> Деформационные свойства древесно-цементных материалов .....	96
<b>Иванкин А.Н.</b> Оптимизация процесса гидролиза растительных белков в присутствии дрожжевых протеаз .....	105
<b>Юрьев Ю.Л., Свиридов А.В., Дроздова Н.А.</b> Исследование адсорбции спиртов сивушной фракции на активных углях различных марок .....	115
<b>Екимова М.Ю., Цветков В.Е.</b> Синтез и свойства модифицированных аминформальдегидных смол .....	124

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

<b>Полещук О.М., Комаров Е.Г., Поярков Н.Г.</b> Обработка и прогноз данных образовательного процесса на основе нечеткого регрессионного анализа .....	133
---	-----

# CONTENTS

## BIOLOGICAL AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF FORESTRY

<b>IDeryugin A.A., Glazunov Yu.B.</b> Trees spatial location in south taiga birch forests with subordinate spruce crop .....	5
<b>Osipenko A.E., Zalesov S.V.</b> Young pine plantations availability in Altai-Novosibirsk region of forest-steppes and ribbon forests .....	15
<b>Kovalev R.N., Pobedinskiy V.V., Iovlev G.A.</b> Balanced development of region and forest resource potential .....	26
<b>Mokhnachev P.E., Makhneva S.G., Menshchikov S.L., Pospelova N.A.</b> Covariation of Scots pine ( <i>Pinus sylvestris</i> L.) female generative system signs under magnesite pollution .....	37
<b>Tantsyrev N.V.</b> Conditions and prospects for post-fire green-moss Siberian stone pine forest formation at young stage.....	48
<b>Kabonen A.V., Gryazkin A.V., Gavrilova O.I.</b> Forestry crops assessment by using unmanned aerial vehicle .....	57
<b>Nakvasina E.N., Koptev S.V., Nikitina M.V.</b> Arkhangelsk Pulp and Paper Mill' peat-based substrates and composted activated sludge for growing coniferous planting stock .....	67
<b>Ushkova D.A., Gorepekin I.V., Fedotov G.N., Batyrev Yu.P.</b> Clarification of concepts about soil water stability mechanism .....	78
<b>Mayorova E.I., Shershneva V.D.</b> Moscow urban forests in view of Russian Federation Forestry Code changes in 2023 .....	87

## WOODWORKING AND CHEMICAL WOOD PROCESSING

<b>Zaprudnov V.I., Nikitin V.V., Karpachev S.P., Makhnin G.A.</b> Deformation properties of wood-cement materials.....	96
<b>Ivankin A.N.</b> Optimisation of plant protein hydrolysis in presence of yeast proteases.....	105
<b>Yur'ev Yu.L., Sviridov A.V., Drozdova N.A.</b> Fusel fraction alcohols adsorption study on different grades of active charcoals .....	115
<b>Ekimova M.Yu., Tsvetkov V.E.</b> Synthesis and properties of modified aminoformaldehyde resins .....	124

## MATH MODELING

<b>Poleshchuk O.M., Komarov E.G., Poyarkov N.G.</b> Processing and prediction of educational process data based on fuzzy regression analysis .....	133
---	-----

## ТЕРРИТОРИАЛЬНОЕ РАЗМЕЩЕНИЕ ДЕРЕВЬЕВ В ЮЖНО-ТАЕЖНЫХ БЕРЕЗНЯКАХ С ПОДПОЛОВОЙ ПОПУЛЯЦИЕЙ ЕЛИ

А.А. Дерюгин✉, Ю.Б. Глазунов

ФГБУН «Институт лесоведения Российской академии наук» (ИЛАН РАН), Россия, 143030, Московская обл.,  
Одинцовский р-н, с. Успенское, ул. Советская, д. 21

da45@mail.ru

Приведены результаты исследований территориального размещения деревьев березы и ели в южно-таежных кислично-черничных березняках в связи со стадиями их развития (возмужание, зрелость, старение) и с возрастными генерациями подпологовой ели. Анализ выполнен по данным учетов на площадках размером 2,5×2,5 м, выделенных по условным координатам на планах 11 постоянных пробных площадей. Тип размещения деревьев характеризовали следующими показателями: встречаемость, среднее расстояние между деревьями, отношение дисперсии к среднему числу деревьев, индексы Мориситы, Фишера и Одума. Дана оценка сопряженности деревьев березы и ели, а также деревьев ели разных возрастных генераций. По стадиям возрастного развития березняков определена встречаемость деревьев березы и ели. Установлено, что при переходе от стадии возмужания к стадии старения встречаемость первой уменьшается от 64 до 18%, второй — с 70...73 до 53 %. Относительно типа размещения ели выявлено, что от стадии возмужания к стадии зрелости он изменяется от контактного до случайного. В стадии старения он вновь становится контактным, что связано с появлением новой генерации ели. Для деревьев подростка и 2-го яруса ели разного возраста выявлены особенности динамики встречаемости и типа размещения. Последний изменяется от контактного до регулярного. Контактный тип размещения характерен для большинства возрастных групп подпологовой популяции ели. Исключение составляют возрастные группы деревьев ели старше 80 лет, их размещение регулярное или случайное. Установлено, что для выявления доминирующих агрегаций деревьев ели и сопряженности деревьев разных возрастных групп в рассматриваемых древостоях необходим анализ размещения на учетных площадках большего размера.

**Ключевые слова:** березняки, подпологовая популяция ели, территориальное размещение деревьев, южная тайга

**Ссылка для цитирования:** Дерюгин А.А., Глазунов Ю.Б. Территориальное размещение деревьев в южно-таежных березняках с подпологовой популяцией ели // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 3. С. 5–14. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-5-14

Изучение территориального размещения деревьев в лесных фитоценозах является составной частью исследований пространственной, в том числе горизонтальной, структуры древостоев. Эти исследования дают возможность выявить особенности конкурентных отношений между деревьями, прогнозировать процессы формирования и функционирования древостоев. Горизонтальная структура фитоценозов была предметом изучения многих отечественных экологов и лесоводов [1–15], а также зарубежных ученых [16–24].

Формирование горизонтальной структуры древостоев, территориальное размещение деревьев — процессы, обусловленные большим количеством факторов, в частности, различием лесорастительных условий, вертикальной структурой древостоя, межвидовой и внутривидовой конкуренцией, состоянием деревьев, их отпадом, наличием источников семян и другими экзогенными и эндогенными факторами.

Исследования в этой области фитоценологии затрагивают главным образом методические вопросы [2, 5–7, 17, 22–27], а территориальному размещению деревьев в конкретных насаждениях, в том числе в березняках с подпологовой популяцией ели, уделяется недостаточно внимания. Изучение горизонтальной структуры таких лесных фитоценозов даст возможность своевременно назначать виды лесохозяйственных мероприятий, в том числе рубок ухода, для формирования целевых лесных насаждений.

### Цель работы

Цель работы — изучение территориального размещения деревьев березы и ели в южно-таежных березняках, находящихся в конце стадий возрастного развития: возмужания, зрелости, старения.

### Объекты и методы исследования

Исследования выполнены Институтом лесоведения РАН на базе Северной лесной опытной станции, расположенной в Рыбинском районе

Т а б л и ц а 1

## Средние таксационные характеристики березы и ели на постоянных пробных площадях

## Average taxing characteristics of birch and spruce on permanent trial plots

Стадия возрастного развития березняка (возраст, лет)	Ярус	Число деревьев, тыс. шт./га		Возраст, лет		Высота, м		Диаметр ствола на высоте 1,3 м от поверхности земли, см		Запас древесины, м <sup>3</sup> /га	
		Береза	Ель	Береза	Ель	Береза	Ель	Береза	Ель	Береза	Ель
Возмужание (41...50)	1-й	1,11	–	44	–	22,0	–	17,4	–	236	–
	2-й	0,48	0,36	35	41	10,6	6,5	7,1	6,7	11	6
	Подрост	–	2,24	–	24	–	2,1	–	–	–	–
Зрелость (71...80)	1-й	0,50	0,01	75	85	27,3	26,5	25,2	30,0	287	14
	2-й	0,14	1,25	65	66	15,8	11,1	11,6	11,0	12	71
	Подрост	–	0,85	–	49	–	3,4	–	–	–	–
Старение (110...120)	1-й	0,17	0,08	114	97	29,7	25,8	35,3	27,6	213	57
	2-й	0,01	0,44	70	91	19,9	16,8	18,8	17,3	2	91
	Подрост	–	0,71	–	38	–	1,2	–	–	–	–

Ярославской области. Объекты исследований — березняки кислично-черничные с подпологовой популяцией ели, в которых в период с 1993 по 1996 г. было заложено 19 постоянных пробных площадей (ППП). По данным измерений на 11 ППП проводили анализ территориального размещения деревьев березы и ели. Пробные площади по возрасту березы были объединены в возрастные группы, соответствующие окончанию таких стадий возрастного развития березняков, как возмужание, зрелость, старение. Возрастные стадии выделены согласно исследованиям М.В. Рубцова [28, 29]. Рассматриваемые березняки относятся к одному естественному возрастному ряду развития [30]. Средние характеристики насаждений приведены в табл. 1.

В основу анализа положены методы, изложенные в работах Б.А. Быкова [2], В.И. Василевича [5], М.С. Гилярова [6], А.А. Маслова [25].

Аналізу территориального размещения деревьев предшествовало выделение учетных площадок (УП) в пределах ППП. Для полного охвата территории ППП был принят размер УП — 2,5×2,5 м. Выделение УП проводили по условным координатам без обозначения на местности. Присутствие деревьев на каждой УП устанавливали сопоставлением координат УП с координатами конкретных деревьев. При таком подходе практически вся ППП была покрыта УП, число которых и их характеристики приведены в табл. 2.

По данным учета, на УП были определены следующие показатели: встречаемость деревьев березы и ели различного возраста; среднее расстояние между деревьями; индексы, характеризующие тип территориального размещения

Т а б л и ц а 2

## Характеристика учетных площадок

## Characteristics of discount areas

Стадия возрастного развития березняка (возраст, лет)	Число учетных площадок	Общая площадь учетных площадок, м <sup>2</sup>	Общее число деревьев на учетных площадках, шт.	
			Береза	Ель
Возмужание (41...50)	200	1250	213	353
Зрелость (71...80)	1149	7181	413	1454
Старение (110...120)	364	2275	73	312

деревьев. В качестве последних использованы: индекс Мориситы [17, 23], отношение выборочной дисперсии к среднему значению числа деревьев на УП, индекс рассеивания Р.А. Фишера [26], индекс Одума [5].

Расчет показателей проведен по следующим формулам:

для встречаемости

$$W = \frac{n_x}{n},$$

где  $n_x$  — число площадок с данным растением;

$n$  — общее число площадок;

для среднего расстояния между деревьями (м)

$$L = \left( \frac{S}{N} \right)^{0,5},$$

где  $S$  — общая площадь УП (м<sup>2</sup>);

$N$  — общее число растений (шт.);

для индекса Мориситы

$$I_s = \frac{[M \sum (x_i (x_i - 1))]}{[N(N-1)]},$$

где  $M$  — общее число УП;

$x_i$  — число деревьев на  $i$ -й УП;

для отношения дисперсии ( $\delta^2$ ) к среднему числу деревьев на УП ( $m_n$ )

$$U = \frac{\delta^2}{m_n};$$

для индекса Фишера

$$I_F = \frac{\left\{ \left[ \sum (x_i^2 n_x) - \left( \frac{N^2}{n} \right) \right] n \right\}}{[(n-1)N]},$$

где  $x_i$  — число деревьев на  $i$ -й УП;

$n_x$  — число площадок с данным растением;

$N$  — общее число растений (шт.);

$n$  — общее число площадок;

для индекса Одум

$$I_o = \frac{\delta^2 n}{N},$$

где  $\delta^2$  — дисперсия;

$n$  — общее число площадок;

$N$  — общее число растений (шт.).

Кроме анализа территориального размещения деревьев была проанализирована сопряженность деревьев ели и березы, а также деревьев ели поздних генераций с деревьями ранних генераций. Для этого был использован метод, основанный на сопоставлении значений математического ожидания и фактических значений совместных встреч элементов фитоценоза в границах конкретных УП [20].

Аналізу данных предшествовал расчет необходимого минимального числа УП при существующей выборочной дисперсии числа деревьев березы и ели на УП. Расчет выполнен по формуле [19]

$$n_{\min} = \frac{25\delta^2}{P^2},$$

где  $P$  — абсолютная плотность деревьев,

$$\text{равная } \frac{\sum x_i}{n}.$$

Установлено, что минимальное число УП изменяется в интервале от 23 (для березы в стадии возмужания) до 190 (для подростка ели в стадии зрелости). Эти значения существенно меньше фактического числа УП (см. табл. 2), что свидетельствует о надежности результатов анализа.

При обработке использован пакет анализа данных Microsoft Excel 2013 и программа TableCurve2D v5.01.

## Результаты и обсуждение

Доминирующее положение в рассматриваемых фитоценозах принадлежит березе, с развитием которой связано и развитие подполовой популяции ели. Встречаемость деревьев березы, обусловленная преимущественно процессами отпада, изменяется от 64 % в стадии возмужания до 18 % в стадии старения. При этом среднее расстояние между деревьями увеличивается от 2,4 до 5,6 м (табл. 3).

Более детальным анализом по 10-летним возрастным группам березняков установлены связи встречаемости деревьев березы с возрастом березняка ( $A_B$ ), расстоянием между деревьями ( $L$ ), густотой деревьев березы ( $P$ ). Коэффициент детерминации этих связей составляет  $R^2 = 0,93 \dots 0,99$ . Связи достоверны при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  (фактическое значение критерия Фишера  $F_{\text{факт}} = 64,38 \dots 3171,9$  существенно больше табличного  $F_{0,05} = 5,80$ ).

Оценка типа территориального размещения с учетом ошибок рассматриваемых индексов ( $\pm 0,10$  — стадия возмужания,  $\pm 0,04$  — стадия зрелости,  $\pm 0,07$  — стадия старения) показала, что в рассматриваемых стадиях возрастного развития березняков размещение деревьев березы может характеризоваться как случайное (значения всех анализируемых индексов  $\approx 1,00$ ).

В процессе формирования подполовой популяции ели происходит не только отпад деревьев, но и наблюдается пополнение популяции, переход деревьев из подростка во 2-й ярус древостоя. Это сказывается на встречаемости деревьев. В целом для популяции встречаемость деревьев ели достигает максимума в березняках, находящихся в стадии зрелости. При этом ее значение несущественно изменяется при переходе от стадии возмужания к стадии зрелости — от 70 до 73 % (см. табл. 3). Для деревьев 2-го яруса характерны более резкие изменения встречаемости ели. В конце стадии возмужания она составила 20 %, в конце стадии зрелости увеличилась до 57 %, а затем в стадии старения уменьшилась до 33 %.

Для подростка ели характерна иная динамика. В рассматриваемом временном периоде встречаемость деревьев подростка постоянно уменьшается, особенно это заметно при переходе от стадии возмужания к стадии зрелости, когда встречаемость снизилась с 65 до 32 %. В стадии старения она уменьшилась не столь значительно (до 27 %), что является следствием появления новой генерации ели [29].

Т а б л и ц а 3

**Показатели территориального размещения деревьев березы и ели**  
**Indicators of the birch and spruce trees spatial location**

Стадия возраст-ного развития березняка (возраст, лет)	Характеристика территориального размещения деревьев	Береза	Ель		
			подрост	2-й ярус	в целом
Возмужание (41...50)	Встречаемость $W$ , %	64	65	20	70
	Среднее расстояние между деревьями $L$ , м	2,40	2,10	4,80	1,90
	Индекс Мориситы $I_\delta$	0,97	1,52	2,96	1,61
	Отношение дисперсии к среднему числу деревьев на учетных площадках $U$	0,96	1,73	1,53	2,08
	Индекс рассеивания Фишера $I_F$	0,96	1,73	1,53	1,73
	Индекс Одума $I_O$	0,96	1,73	1,53	2,08
Зрелость (71...80)	Встречаемость $W$ , %	30	32	57	73
	Среднее расстояние между деревьями $L$ , м	4,20	3,60	2,80	2,20
	Индекс Мориситы $I_\delta$	1,09	2,10	0,86	0,99
	Отношение дисперсии к среднему числу деревьев на учетных площадках $U$	1,03	1,59	0,89	0,99
	Индекс рассеивания Фишера $I_F$	1,03	1,53	0,89	0,99
	Индекс Одума $I_O$	1,03	2,02	0,89	0,99
Старение (110...120)	Встречаемость $W$ , %	18	27	33	56
	Среднее расстояние между деревьями $L$ , м	5,60	3,50	4,20	2,70
	Индекс Мориситы $I_\delta$	1,00	4,99	0,47	2,10
	Отношение дисперсии к среднему числу деревьев на учетных площадках $U$	1,00	2,99	0,81	2,40
	Индекс рассеивания Фишера $I_F$	1,00	2,99	0,81	1,70
	Индекс Одума $I_O$	1,00	2,99	0,81	2,13

Такие изменения в значениях встречаемости объясняются процессами формирования подпологовой популяции ели. Как показали ранее выполненные исследования [30], в стадии возмужания густота деревьев ели за счет подроста достигает максимума (около 4,0 тыс. шт./га). В стадии зрелости значительная часть подроста отмирает, а другая часть формирует 2-й ярус, густота которого в конце этой стадии составляет около 1,0 тыс. шт./га.

Для популяции в целом и подроста ели установлены статистически достоверные связи встречаемости ( $W$ ) с возрастом березняка ( $A_B$ ), средним расстоянием между деревьями ( $L$ ) и густотой ( $P$ ). Значения коэффициента детерминации ( $R^2$ ) изменяются в интервале 0,91...0,99, фактические значения критерия Фишера существенно больше табличных при уровне значимости 0,05. Не установлены достоверные связи встречаемости деревьев 2-го яруса ( $W$ ) с расстоянием между деревьями ( $L$ ) и густотой ( $P$ ) (табл. 4).

Результаты анализа типа размещения деревьев ели показали следующее. В стадии возмужания, как в целом для популяции, так и составляющим элементом, размещение деревьев может харак-

Т а б л и ц а 4

**Связь встречаемости деревьев ели с возрастом березняков, средним расстоянием между деревьями ели и их густотой**

**The relationship of the spruce trees occurrence with the age of birch trees, the average distance between spruce trees and their density**

Часть популяции ели	Функция	Коэф-фициент детерминации $R^2$	$F$ -критерий	
			$F_{fakt}$	$F_{0,05}$
Подрост	$W = f(A_B)$	0,95	9,88	5,80
	$W = f(L)$	0,98	242,90	5,80
	$W = f(P)$	0,99	609,32	5,80
2-й ярус	$W = f(A_B)$	0,97	17,82	5,80
	$W = f(L)$	0,52	5,51	5,80
	$W = f(P)$	Нет связи		
Популяция в целом	$W = f(A_B)$	0,98	73,40	5,80
	$W = f(L)$	0,92	55,42	5,80
	$W = f(P)$	0,91	47,85	5,80



## Показатели территориального размещения деревьев ели различного возраста

## Indicators of the spruce trees' spatial location of various ages

Стадия возрастного развития березняка (возраст, лет)	Характеристики территориального размещения деревьев	Значение характеристик			
		2...10	11...20	21...30	31...40
Возмужание (41...50)	Возраст ели, лет	2...10	11...20	21...30	31...40
	Встречаемость $W$ , %	14	21	31	35
	Среднее расстояние между деревьями $L$ , м	6,0	4,4	3,6	3,1
	Индекс Мориситы $I_\delta$	2,35	2,13	2,15	2,67
	Отношение дисперсии к среднему числу деревьев на учетных площадках $U$	1,23	1,32	1,55	2,03
	Индекс Фишера $I_F$	1,23	1,23	1,27	2,11
	Индекс Одума $I_O$	1,23	1,31	1,55	2,03
Зрелость (71...80)	Возраст ели, лет	41...50	61...70	71...80	–
	Встречаемость $W$ , %	16	28	19	–
	Среднее расстояние между деревьями $L$ , м	5,4	4,0	5,3	–
	Индекс Мориситы $I_\delta$	3,20	1,76	1,55	–
	Отношение дисперсии к среднему числу деревьев на учетных площадках $U$	1,47	1,30	1,12	–
	Индекс Фишера $I_F$	1,47	1,30	1,12	–
	Индекс Одума $I_O$	1,47	1,30	1,12	–
Старение (110...120)	Возраст ели, лет	21...30	31...40	81...90	91...100
	Встречаемость $W$ , %	10	13	13	17
	Среднее расстояние между деревьями $L$ , м	6,7	5,0	6,7	6,0
	Индекс Мориситы $I_\delta$	5,94	8,44	0,57	0,54
	Отношение дисперсии к среднему числу деревьев на учетных площадках $U$	1,67	2,84	0,94	0,92
	Индекс Фишера $I_F$	1,66	2,84	0,94	0,92
	Индекс Одума $I_O$	1,67	2,84	0,94	0,92

теризоваться как групповое (контагиозное). Значения всех рассматриваемых индексов с учетом ошибок определения, приведенных выше, существенно больше 1,0 (см. табл. 3).

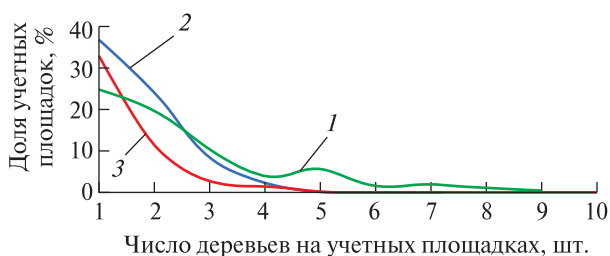
В конце стадии зрелости такой тип территориального размещения сохраняется у деревьев подростка. Тип размещения деревьев 2-го яруса изменяется на равномерный. Значения всех индексов ( $0,86 \pm 0,04$  и  $0,89 \pm 0,04$ ) меньше 1,0. В целом же для популяции размещение может характеризоваться как случайное — индексы существенно отличаются от 1,0.

На тип размещения в стадии старения оказывает влияние появление новой генерации ели. В результате групповой тип размещения становится более выраженным для всей популяции и для деревьев подростка — значения индексов значительно больше 1,00. Размещение деревьев 2-го яруса остается регулярным — индексы с учетом ошибки определения ( $\pm 0,07$ ) существенно больше 1,0 (см. табл. 3).

Нами было проанализировано размещение деревьев ели различных возрастов в рассматриваемых стадиях возрастного развития березняков. В анализ включили возрастные группы ели, встречаемость деревьев в которых 10 % и больше. При меньшей встречаемости по значениям индексов не всегда можно адекватно оценить тип размещения деревьев.

Установлено, что в большинстве случаев значения индексов соответствуют контагиозному типу территориального размещения деревьев ели. Они достоверно превышают 1,0 (табл. 5). Исключение составляют деревья старших возрастных групп (81...90 и 91...100 лет) в стадии старения березняка, где размещение деревьев ели может характеризоваться как регулярное.

Анализ распределения УП по числу деревьев ели показал, что оно характеризуется значительной долей УП без деревьев, на которые приходится от 27 % (стадия зрелости) до 49 % (стадия старения) всех УП. Из площадок с елью наиболее часто



Распределение учетных площадок по числу деревьев ели на них в березняках, находящихся на разных стадиях возрастного развития: 1 — возмужание; 2 — зрелость; 3 — старение

The distribution of discount areas by the number of spruce trees in birch forests located at different stages of age development: 1 — maturation; 2 — maturity; 3 — consenescence

Т а б л и ц а 6

**Сопряженность деревьев ели разных генераций**

**Associations of spruce trees of different generations**

Возрастная стадия березняка	Сопоставляемые возрастные генерации, лет	Число УП с совместными встречами	
		Ожидаемое ( $K_M$ )	Фактическое ( $K_F$ )
Возмужание	1–10 / 11–60	24	19
	11–20 / 21–60	32	22
	21–30 / 31–60	35	34
	31–40 / 41–60	15	10
Зрелость	41–50 / 51–100	145	69
	51–60 / 61–100	161	73
	60–70 / 71–100	136	55
	71–80 / 81–100	18	1
Старение	21–30 / 31–110	29	22
	31–40 / 41–110	37	21
	81–90 / 91–110	28	3
	91–100 / 101–110	7	1

встречаются УП с одним растением (рисунок). Число деревьев на одной площадке изменяется в широком диапазоне — до 9–10 особей. Выделить значимые агрегации не представляется возможным. Можно только отметить несколько увеличенную (до 6 %) долю УП с пятью деревьями в березняках в стадии возмужания.

Отсутствие значимых группировок деревьев ели в границах УП в конце стадии зрелости можно объяснить случайным территориальным размещением деревьев (см. табл. 3).

Для рассматриваемых стадий возрастного развития березняков была предпринята попытка установить сопряженность деревьев ели с березой и деревьев ели поздних генераций (младший возраст) с деревьями ели ранних генераций (старший возраст).

В ходе анализа установлено, что сопряженность деревьев подпоголовой популяции ели с деревьями березы отчетливо проявляется в берез-

няках, находящихся в конце стадии возмужания. Здесь фактическое число встреч ели с березой существенно больше ожидаемых ( $K_M = 67 < K_F = 82$ ). В конце других стадий такая сопряженность, при принятых размерах УП, не наблюдается. Так в стадии старения число фактических встреч этих пород на УП существенно меньше ожидаемых ( $K_M = 48 > K_F = 32$ ).

Для оценки сопряженности деревьев ели разных генераций, как и при рассмотрении территориального размещения деревьев, были выбраны генерации со встречаемостью деревьев ели более 10 %. Установлено, что во всех сопоставляемых вариантах фактические значения коэффициента  $K_F$  меньше значений коэффициента  $K_M$  (табл. 6).

Тем не менее можно отметить небольшую разницу между ожидаемыми и фактическими значениями встреч деревьев ели разных генераций в березняках в стадии возмужания (см. табл. 6). Возможно, что принятые размеры УП, как и в случае с выделением агрегаций деревьев, недостаточны для объективной оценки сопряженности деревьев ели разных генераций. Данное обстоятельство может быть связано с тем, что принятые размеры УП примерно равны размерам деревьев ели, особенно в березняках, находящихся на стадиях зрелости и старения. Так, в первом случае радиус кроны деревьев ели достигает 2,4 м, площадь проекции — 18,4 м<sup>2</sup>. На стадии старения эти значения еще больше — соответственно 3,7 м и 43,4 м<sup>2</sup>, что выше принятых размеров УП. В связи с этим для адекватной оценки территориального размещения деревьев ели в березняках возрастом старше 50 лет целесообразно использовать УП большего размера.

**Выводы**

1. Встречаемость деревьев березы определяется стадиями возрастного развития березняков. В конце стадии старения она уменьшается по сравнению со стадией возмужания на 46 % (с 64 до 18 %). Выявлены статистически достоверные связи встречаемости со средним расстояниями между деревьями березы, возрастом и густотой березняков. Размещение деревьев березы в рассмотренных стадиях возрастного развития может характеризоваться как случайное

2. Встречаемость и тип территориального размещения деревьев ели подпоголовой популяции обусловлены тремя процессами: отпадом, изменениями в вертикальной структуре древостоя, возобновлением. Степень выраженности этих процессов в березняках разного возраста определяет динамику указанных характеристик.

3. Популяция ели в целом в пределах стадий березняков возмужания и зрелости характеризуется примерно одинаковой встречаемостью

деревьев (около 70 %). К концу стадии старения она снижается до 53 %, что является следствием доминирования процессов отпада. В рассматриваемом возрастном интервале березняков тип территориального размещения деревьев ели изменяется от контагиозного в стадии возмужания березняка до случайного в конце стадии зрелости. В стадии старения тип размещения вновь становится контагиозным, что связано с появлением новой генерации ели.

4. Встречаемость деревьев подроста ели уменьшается в рассматриваемом возрастном интервале березняков с 65 до 27 %, что обусловлено процессами отпада и перехода части деревьев во 2-й ярус древостоя. Тип размещения деревьев данного элемента леса — контагиозный.

5. Встречаемость деревьев ели 2-го яруса при переходе из стадии березняка возмужания в стадию зрелости увеличивается с 20 % до 57 %, что объясняется выходом части деревьев подроста во 2-й ярус древостоя. В стадии старения при доминировании процессов отпада это значение уменьшается до 33 %. Тип территориального размещения деревьев этого яруса в конце стадии возмужания березняка — контагиозный, в других стадиях — регулярный.

6. Для популяции ели в целом и для подроста установлены достоверные связи встречаемости с расстоянием между деревьями, возрастом березняка и густотой ели. Для 2-го яруса ели достоверна только связь встречаемости с возрастом березняка.

7. Контагиозный тип размещения характерен для большинства возрастных групп подпологовой популяции ели с встречаемостью более 10 %. Исключение составляют возрастные группы деревьев ели старше 80 лет. Для них размещение может характеризоваться как регулярное или случайное.


8. Для установления доминирующих агрегаций деревьев ели и сопряженности деревьев разных возрастных групп в рассматриваемых древостоях необходим анализ размещения на учетных площадках большего размера.

## Список литературы

- [1] Бузыкин А.И., Гавриков В.Л., Секретенко О.П., Хлебопрос Р.Г. Анализ структуры древесных ценозов. Новосибирск: Наука, 1985. 95 с.
- [2] Быков Б.А. Геоботаника. Алма-Ата: Наука, 1978. 288 с.
- [3] Вайс А.А. Динамика горизонтальной сомкнутости полога и крон на уровне насаждения и био группы // Лесная таксация и лесостроительство, 2001. № 1. С. 62–65.
- [4] Вайс А.А. Оценка распределения расстояний в био группах различных ценозов // Сибирский экологический журнал, 2008. Т. XV. № 2. С. 243–248.
- [5] Василевич В.И. Статистические методы в геоботанике. Л.: Наука, 1969. 230 с.
- [6] Гиляров М.С. Методы почвенно-зоологических исследований. М.: Наука, 1975. 280 с.
- [7] Грабарник П.Я. Анализ горизонтальной структуры древостоя: модельный подход // Лесоведение, 2010. № 2. С. 77–85.
- [8] Грибанов В.Я. Пространственная структура древостоев // Структура и рост древостоев Сибири. Красноярск: Изд-во ИЛ СО РАН, 1993. С. 55–67.
- [9] Стороженко В.Г. Естественное возобновление в коренных разновозрастных ельниках европейской тайги России // Сибирский лесной журнал, 2017. № 3. С. 87–92.
- [10] Ильчуков С.В., Торлопова Н.В. Жизненное состояние сосняков, формирующихся на гарях, сплошных вырубках и подсеках // Вестник института биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, 2004. № 4 (78). С. 19–21.
- [11] Калачев В.А., Вайс А.А., Ануев Е.А. Особенности горизонтальной структуры модальных пихтачей в условиях Канской лесостепи и предгорной части Восточного Саяна // Успехи современного естествознания, 2021. № 6. С. 22–28.
- [12] Кузьмичев В.В. Закономерности динамики древостоев: принципы и модели. Новосибирск: Наука, 2013. 208 с.
- [13] Манов А.В., Кутявин И.Н. Горизонтальная структура древостоев и подроста северо-таежных коренных ельников чернично-сфагновых в Приуралья // ИзВУЗ Лесной журнал, 2018. № 6. С. 78–88.
- [14] Мелехов И.С. Лесоведение и лесоводство. М.: Лесная пром-сть, 1972. 178 с.
- [15] Вайс А.А. Форма крон деревьев сосны обыкновенной (*Pinus silvestris* L.) в чистых высокогустотных насаждениях Минусинской котловины Красноярского края // Хвойные бореальной зоны, 2017. Т. 35. № 3–4. С. 14–20.
- [16] Грейг-Смит П. Количественная экология растений. М.: Мир, 1967. 360 с.
- [17] Морисита М.  $I_{\delta}$ -индекс, мера рассеивания индивидов // Исследования по популяционной экологии, 1962. № 4 (1). С. 1–7.
- [18] Braathe P. Registneringavgienvest 1962–1964 // Meddeleserfradet Norske Skogfors o ksvesen, 1966, v. 21, no. 2, pp. 81–170.
- [19] Elliot J.M. Some methods for the statistical analysis of samples of benthic invertebrates // Freshwater boil. Assoc., 1971, v. 25, pp. 1–144.
- [20] Fager E.W. Diversity: A Sampling // The American Naturalist, 1972, v. 106 (949), pp. 293–310.
- [21] Getzin S., Dean C., He F., Trofymow J.A., Wiegand K., Wiegand T. Spatial patterns and competition of tree species in a Douglas-fir chronosequence on Vancouver island // Ecography, 2006, v. 29, pp. 671–682.
- [22] Illian J., Penttinen A., Stoyan H., Stoyan D. Statistical Analysis and Modelling of Spatial Point Patterns. Chichester: Wiley, 2008, 534 p.
- [23] Morisita M. Measuring the dispersion of individuals and analysis of the distributional patterns // Mem. Fac. Sci. Kyushu Univ., 1959, Ser. E, 2, pp. 215–235.
- [24] Wiegand T., Moloney K.A. Rings, circles, and nullmodels for point pattern analysis in ecology // Oikos, 2004, v. 104, pp. 209–229.
- [25] Маслов А.А. Количественный анализ горизонтальной структуры лесных сообществ. М.: Наука, 1990. 160 с.
- [26] Свалов С.Н. Применение статистических методов в лесоводстве // Лесоведение и лесоводство, 1985. Т. 4. С. 1–164.
- [27] Секретенко О.П., Грабарник П.Я. Анализ горизонтальной структуры древостоев методами случайных точечных полей // Сибирский лесной журнал, 2015. № 3. С. 32–44.

- [28] Воробьев Р.А., Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Тютин А.Ю. Таксационные показатели клонов плюсовых деревьев ели европейской в архиве клонов в Нижегородской области // Хвойные бореальной зоны. 2023. Т. 41. № 1. С. 12-23.
- [29] Рубцов М.В., Дерюгин А.А. Динамика возрастной структуры популяции ели под пологом южно-таежных березняков Русской равнины // Хвойные бореальной зоны, 2013. Т. XXXI. № 1–2. С. 9–14.
- [30] Беляева Н.В., Грязькин А.В., Кази И.А. Оценка успешности естественного возобновления после добровольно-выборочных рубок // Вестник Саратовского госагроуниверситета имени Н.И. Вавилова, 2014. № 5. С. 3–6.
- [31] Дерюгин А.А., Глазунов Ю.Б. Об оценке перспективности подроста ели под пологом березняков южной тайги // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 4. С. 12–18. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-4-12-18
- [32] Матвеева А.С., Беляева Н.В., Кази И.А. Влияние состава материнского древостоя на высотную структуру подроста ели разных фенологических форм // Актуальные проблемы лесного комплекса, 2017. № 47. С. 138–142.
- [33] Беляева Н.В., Грязькин А.В. Закономерности появления подроста ели после сплошных рубок в зависимости от состава материнского древостоя // Актуальные проблемы лесного комплекса, 2015. № 41. С. 3–7.
- [34] Дружинин Ф.Н. Специализированные рубки ухода во вторичных лесах // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2013. № 204. С. 6–14.
- [35] Axelsson R., Angelstam P. Uneven-aged forest management in boreal sweden: local forestry stakeholders' perceptions of different sustainability dimensions // Forestry, 2011, t. 84, no. 5, pp. 567–579.

## Сведения об авторах

**Дерюгин Анатолий Александрович**  — канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр., ФГБУН «Институт лесоведения Российской академии наук» (ИЛАН РАН), da45@mail.ru

**Глазунов Юрий Борисович** — канд. с.-х. наук, вед. науч. сотр., ФГБУН «Институт лесоведения Российской академии наук» (ИЛАН РАН), yu.b.glazunov@mail.ru

Поступила в редакцию 25.09.2023.

Одобрено после рецензирования 12.12.2023.

Принята к публикации 05.04.2024.

## TREES SPATIAL LOCATION IN SOUTH TAIGA BIRCH FORESTS WITH SUBORDINATE SPRUCE CROP

**A.A. Deryugin** , **Yu.B. Glazunov**

Institute of Forest Science RAS, 21, Sovetskaya st., village Uspenskoe, Odintsovo district, 143030, Moscow reg., Russia  
da45@mail.ru

The study results of birch and spruce trees' spatial location in southern taiga wood-sorrel-bilberry (*oxalidosum-myrtillosum*) birch forests concerning the stages of their development (maturation, maturity, consenescence) and the age generations of subordinate spruce crops are presented. The analysis was carried out on the basis of the survey data within 2,5×2,5 m plots, identified by provisional coordinates by the plans of 11 permanent sample plots. The type of tree placements was characterized by the following indicators: occurrence, average distance between trees, dispersion ratio to the average number of trees, Morisita, Fisher and Odum indices. The birch and spruce trees association, as well as spruce trees of different age generations were assessed. The occurrence rate of birch and spruce trees was determined according to the age development stages of birch forests. It has been established that during the transition from the stage of maturation to the stage of maturity the occurrence rate of the birch decreases from 64 to 18 %, for the spruce it ranges from 70...73 to 53 %. Regarding the type of spruce placement, it was found that from the stage of maturation to the stage of maturity it changes from contagious to accidental. During the consenescence stage, it becomes contagious again, which is connected with the emergence of a new spruce generation. For the trees of undergrowth and 2nd storey of spruce of different ages, the peculiarities of the dynamics of occurrence and type of placement were revealed. The latter changes from contagious to regular. The contagious type of placement is typical for most age groups of the subordinate spruce population. The exception is age groups of spruce trees over 80 years old; their placement is regular or random. It has been established that in order to identify the dominant aggregations of spruce trees and the trees associations of different age groups in the tree stands under survey, an analysis of placement on larger survey sites is necessary.

**Keywords:** birch forests, subordinate spruce crop, spatial location of trees, southern taiga

**Suggested citation:** Deryugin A.A., Glazunov Yu.B. *Territorial'noe razmeshchenie derev'ev v yuzhno-taеzhnykh bereznyakakh s podpologovoy populyatsiey eli* [Trees spatial location in south taiga birch forests with subordinate spruce crop]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 3, pp. 5–14.  
DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-5-14

## Reference

- [1] Buzykin A.I., Gavrikov V.L., Sekretenko O.P., Khlebopros R.G. *Analiz struktury drevesnykh tsenozov* [Analysis of the structure of tree censuses]. Novosibirsk: Nauka, 1985, 95 p.
- [2] Bykov B.A. *Geobotanika* [Geobotany]. Alma-Ata: Nauka, 1978, 288 p.
- [3] Vays A.A. *Dinamika gorizontal'noy somkhnosti pologa i kron na urovne nasazhdeniya i biogruppy* [Dynamics of horizontal canopy and crown density at the stand and biogroup level]. *Lesnaya taksatsiya i lesoustroystvo* [Forest taxation and forest management], 2001, no. 1, pp. 62–65.
- [4] Vays A.A. *Otsenka raspredeleniya rasstoyaniy v biogruppakh razlichnykh tsenozov* [Assessment of the distribution of distances in biogroups of various censuses]. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal* [Siberian Ecological Journal], 2008, t. XV, no. 2, pp. 243–248.
- [5] Vasilevich V.I. *Statisticheskie metody v geobotanike* [Statistical methods in geobotany]. Leningrad: Nauka, 1969, 230 p.
- [6] Gilyarov M.S. *Metody pochvenno-zoologicheskikh issledovaniy* [Methods of soil-zoological research]. Moscow: Nauka, 1975, 280 p.
- [7] Grabarnik P.Ya. *Analiz gorizontal'noy struktury drevostoya: model'nyy podkhod* [Analysis of the horizontal structure of a tree stand: a model approach]. *Lesovedenie* [Forest Science], 2010, no. 2, pp. 77–85.
- [8] Griбанov V.Ya. *Prostranstvennaya struktura drevostoev* [Spatial structure of forest stands]. *Struktura i rost drevostoev Sibiri* [Structure and growth of forest stands in Siberia]. Krasnoyarsk: IL SB RAS, 1993, pp. 55–67.
- [9] Storozhenko V.G. *Estestvennoe vozobnovlenie v korennykh raznovozrastnykh el'nikakh Evropeyskoy taygi Rossii* [Natural regeneration in native spruce forests of different ages in the European taiga of Russia]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian Forest Journal], 2017, no. 3, pp. 87–92.
- [10] Il'chukov S.V., Torlopova N.V. *Zhiznennoe sostoyanie sosnyakov, formiruyushchikhsya na garyakh, sploshnykh vyrubkakh i podsekakh* [Life state of pine forests formed in burnt areas, clear-cuts and undercuts]. *Vestnik instituta biologii Komi nauchnogo tsentra Ural'skogo otdeleniya RAN* [Bulletin of the Institute of Biology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences], 2004, no. 4 (78), pp. 19–21.
- [11] Kalachev V.A., Vays A.A., Anuev E.A. *Osobennosti gorizontal'noy struktury modal'nykh pikhtachey v usloviyakh Kanskoy lesostepi i predgornoy chasti Vostochnogo Sayana* [Features of the horizontal structure of modal fir trees in the conditions of the Kansk forest-steppe and the foothills of the Eastern Sayan]. *Uspekhi sovremennoy estestvoznaniya* [Advances in modern natural science], 2021, no. 6, pp. 22–28.
- [12] Kuz'michev V.V. *Zakonomernosti dinamiki drevostoev: printsipy i modeli* [Patterns of forest stand dynamics: principles and models]. Novosibirsk: Nauka, 2013, 208 p.
- [13] Manov A.V., Kutyavin I.N. *Gorizontal'naya struktura drevostoev i podrosta severotaezhnykh korennykh el'nikov chernichnosfagnovykh v Priural'e* [Horizontal structure of stands and undergrowth of northern taiga native bilberry-sphagnum spruce forests in the Urals]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2018, no. 6, pp. 78–88.
- [14] Melekhov I.S. *Lesovedenie i lesovodstvo* [Forestry and forestry]. Moscow: Timber industry, 1972, 178 p.
- [15] Oskorin P.A., Weiss A.A. [Dynamics of the spatial structure of dark coniferous forest stands in Western Siberia]. *IzVUZ Lesnoy zhurnal*, 2009, no. 1, pp. 21–28.
- [16] Greig-Smit P. *Kolichestvennaya ekologiya rasteniy* [Quantitative plant ecology]. Moscow: Mir, 1967, 360 p.
- [17] Morisita M. *I<sub>s</sub>-indeks, mera rasseivaniya individov* [ $I_s$ -index, a measure of the dispersion of individuals]. *Issledovaniya po populyatsionnoy ekologii* [Research on population ecology], 1962, no. 4 (1), pp. 1–7.
- [18] Braathe P. *Registneringavgjenveht 1962–1964. Meddeleslerfradet Norske Skogfors o ksvesen*, 1966, v. 21, no. 2, pp. 81–170.
- [19] Elliot J.M. Some methods for the statistical analysis of samples of benthic invertebrates. *Freshwater boil. Assoc.*, 1971, v. 25, pp. 1–144.
- [20] Fager E.W. Diversity: A Sampling. *The American Naturalist*, 1972, v. 106 (949), pp. 293–310.
- [21] Getzin S., Dean C., He F., Trofymow J.A., Wiegand K., Wiegand T. Spatial patterns and competition of tree species in a Douglas-fir chronosequence on Vancouver island. *Ecography*, 2006, v. 29, pp. 671–682.
- [22] Illian J., Penttinen A., Stoyan H., Stoyan D. *Statistical Analysis and Modelling of Spatial Point Patterns*. Chichester. Wiley, 2008, 534 p.
- [23] Morisita M. Measuring the dispersion of individuals and analysis of the distributional patterns. *Mem. Fac. Sci. Kyushu Univ.*, 1959, Ser. E 2, pp. 215–235.
- [24] Wiegand T., Moloney K.A. Rings, circles, and nullmodels for point pattern analysis in ecology. *Oikos*, 2004, v. 104, pp. 209–229.
- [25] Maslov A.A. *Kolichestvennyy analiz gorizontal'noy struktury lesnykh soobshchestv* [Quantitative analysis of the horizontal structure of forest communities]. Moscow: Nauka, 1990, 160 p.
- [26] Cvalov S.N. *Primenenie statisticheskikh metodov v lesovodstve* [Application of statistical methods in forestry]. *Lesovedenie i lesovodstvo* [Forestry and forestry], 1985, t. 4, pp. 1–164.
- [27] Sekretenko O.P., Grabarnik P.Ya. *Analiz gorizontal'noy struktury drevostoev metodami sluchaynykh tochechnykh poley* [Analysis of the horizontal structure of forest stands using random point field methods]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian Forest J.], 2015, no. 3, pp. 32–44.
- [28] Vorob'ev R.A., Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Tyutin A.Yu. *Taksatsionnye pokazateli klonov plyusovykh derev'ev eli evropeyskoy v arkhive klonov v Nizhegorodskoy oblasti* [Taxation indicators of clones of plus trees of Norway spruce in the archive of clones in the Nizhny Novgorod region]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the boreal zone], 2023, t. 41, no. 1, pp. 12–23.
- [29] Rubtsov M.V., Deryugin A.A. *Dinamika voznastnoy struktury populyatsii eli pod pologom yuzhno-taezhnykh bereznyakov Russkoy ravniny* [Dynamics of the age structure of the spruce population under the canopy of the southern taiga birch forests of the Russian Plain]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the boreal zone], 2013, t. XXXI, no. 1–2, pp. 9–14.

- [30] Belyaeva N.V., Gryaz'kin A.V., Kazi I.A. *Otsenka uspekhov estestvennogo vozobnovleniya posle dobrovol'no-vyborochnykh rubok* [Assessment of the success of natural regeneration after voluntary selective cuttings]. Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N.I. Vavilova [Bulletin of the Saratov State Agrarian University named after. N.I. Vavilova], 2014, no. 5, pp. 3–6.
- [31] Deryugin A.A., Glasunov Yu.B. *Ob otsenke perspektivnosti podrosta eli pod pologom bereznyakov yuzhnoy taygi* [Prospect assessment of undergrowth spruce under canopy of birch forests in southern taiga]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2020, vol. 24, no. 4, pp. 12–18. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-4-12-18
- [32] Matveeva A.S., Belyaeva N.V., Kazi I.A. *Vliyaniye sostava materinskogo drevostoya na vysotnyuyu strukturu podrosta eli raznykh fenologicheskikh form* [Influence of the composition of the maternal forest stand on the altitudinal structure of spruce undergrowth of different phenological forms]. Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa [Current problems of the forest complex], 2017, no. 47, pp. 138–142.
- [33] Belyaeva N.V., Gryaz'kin A.V. *Zakonomernosti poyavleniya podrosta eli posle sploshnykh rubok v zavisimosti ot sostava materinskogo drevostoya* [Patterns of the appearance of spruce regrowth after clear-cutting depending on the composition of the parent forest]. Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa [Actual problems of the forest complex], 2015, no. 41, pp. 3–7.
- [34] Druzhinin F.N. *Spetsializirovannye rubki ukhoda vo vtorichnykh lesakh* [Specialized thinning in secondary forests]. Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii [News of the St. Petersburg Forestry Academy], 2013, no. 204, pp. 6–14.
- [35] Axelsson R., Angelstam P. Uneven-aged forest management in boreal sweden: local forestry stakeholders' perceptions of different sustainability dimensions. Forestry, 2011, t. 84, no. 5, pp. 567–579.

## Authors' information

**Deryugin Anatoliy Aleksandrovich**  — Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, Institut of Forest Science, da45@mail.ru

**Glazunov Yuriy Borisovich** — Cand. Sci. (Agriculture), Head of the Laboratory of Forestry and Biological productivity, Institut of Forest Science, yu.b.glazunov@mail.ru

Received 25.09.2023.

Approved after review 12.12.2023.

Accepted for publication 05.04.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article  
The authors declare that there is no conflict of interest

## ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ ПОДРОСТОМ СОСНОВЫХ НАСАЖДЕНИЙ АЛТАЕ-НОВОСИБИРСКОГО РАЙОНА ЛЕСОСТЕПЕЙ И ЛЕНТОЧНЫХ БОРОВ

А.Е. Осипенко<sup>✉</sup>, С.В. Залесов

ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (УГЛТУ), Россия, 620110, г. Екатеринбург,  
ул. Сибирский тракт, д. 37

osipenkoae@m.usfeu.ru

Приведены данные о количестве подроста в естественных сосновых насаждениях, произрастающих в Алтае-Новосибирском районе лесостепей и ленточных боров. Проанализирована база данных, составленная по материалам лесоустройства одиннадцати лесничеств, на территории которых находятся ленточные боры Алтайского края. Показаны данные по климатическим подзонам региона, лесничествам, типам леса и относительным полнотам древостоев. Приведены данные о доле насаждений VI–XIII классов возраста, обеспеченных подростом в количестве, достаточном для естественного лесовосстановления. Построены линии тренда, отражающие среднее количество подроста под пологом древостоев различной относительной полноты. Установлено, что лучше всего обеспечены подростом сосняки двух типов леса: сухой бор пологих всхолмлений и сухой бор высоких всхолмлений. Определено, что доля насаждений, обеспеченных подростом в количестве достаточном для естественного лесовосстановления, в данных типах леса составляет от 45 до 88 % (в зависимости от относительной полноты древостоев). Выявлено, что в условиях типа леса свежий бор доля сосняков, обеспеченных подростом предварительной генерации, изменяется в пределах от 18 (при полноте 1,0) до 60 % (при полноте 0,5). Изложено, что наименьшая обеспеченность подростом зафиксирована в условиях типов леса травяной бор, сосняк пристепной, согра сосновая. Указано, что в данных типах леса успешному естественному лесовосстановлению препятствуют негативные факторы, обусловленные особенностями этих типов леса. Установлено, что доля насаждений, обеспеченных подростом, в условиях типов леса травяной бор, сосняк пристепной, согра сосновая не превышает 25 %. Выявлено, что оптимальная относительная полнота древостоев для накопления подроста в различных типах леса отличается: сухой бор высоких всхолмлений — 0,6; сухой бор пологих всхолмлений — 0,5; свежий бор — 0,5; сосняк пристепной — 0,4...0,5; травяной бор — 0,7; согра сосновая — 0,3. Определено, что зависимости от типа леса в ленточных борах накапливается в среднем от 0,8 до 3,1 тыс. шт./га подроста предварительной генерации.

**Ключевые слова:** сосна обыкновенная, насаждение, подрост, тип леса, относительная полнота, ленточный бор

**Ссылка для цитирования:** Осипенко А.Е., Залесов С.В. Обеспеченность подростом сосновых насаждений Алтае-Новосибирского района лесостепей и ленточных боров // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 3. С. 15–25. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-15-25

Научно обоснованное ведение лесного хозяйства невозможно без наличия объективных данных об обеспеченности насаждений подростом [1, 2]. Достаточное для естественного лесовосстановления количество подроста предварительной генерации зачастую является обязательным условием для быстрой замены спелых и перестойных насаждений на молодняки хозяйственно ценных древесных пород [3, 4]. Данные о количестве подроста позволяют рационально планировать лесовосстановительные мероприятия и подбирать способы рубок, которые наилучшим образом соответствуют конкретным лесорастительным условиям [5].

На подрост, формирующийся под пологом сосновых древостоев, влияют следующие факторы: лесорастительные условия, развитие живого

напочвенного покрова (ЖНП), сомкнутость и возраст материнского полога, лесохозяйственные мероприятия, рекреационные нагрузки и др. [6–12].

Ленточные боры Алтайского края по целевому назначению относятся к защитным лесам, а значит, сплошные рубки в них запрещены. Переход к выборочной системе рубок в 1947 г. [13] привел к более бережному ведению хозяйства, однако создал проблему омоложения ленточных боров [2, 14], которая на сегодняшний день является камнем преткновения на пути к организации устойчивого лесного хозяйства Алтайского края. Совершенствование системы рубок в ленточных борах, позволяющей перейти к устойчивому лесному хозяйству, широко обсуждается в настоящее время [15–18].

По данным Государственного лесного реестра Российской Федерации, на долю молодняков в ленточных борах Алтайского края приходится

всего 13,5 % площади лесов [18]. При этом, по нашей оценке [19], более 70,1 тыс. га (около 66 % площади всех молодняков) приходится на лесные культуры возрастом от 5 до 40 лет, которые создавались преимущественно на гарях и пустырях. Таким образом, на долю молодняков, сформировавшихся естественным путем, приходится около 6 % площадей, на которых расположены леса. Однако столь незначительная доля молодняков естественного происхождения компенсируется разновозрастностью большей части сосновых древостоев ленточных боров [20–23], но не полностью решает указанную выше проблему.

## Цель работы

Цель работы — оценка обеспеченности подростом предварительной генерации естественных сосновых насаждений VI класса и более высоких классов возраста в условиях Алтае-Новосибирского района лесостепей и ленточных боров.

## Материалы и методы

Данное исследование представляет собой анализ электронной повыведельной базы данных (БД) в формате «.xlsx». Подробное описание БД приводилось в нашей более ранней публикации [23]. Описание природно-климатических условий района исследований и характеристика типов леса, о которых идет речь в настоящей работе, также неоднократно публиковались [2, 13, 18, 24, 25].

Анализ данных осуществлялся в программе MS Excel 2013. Формирование сводных таблиц при анализе данных осуществлялось с применением следующих фильтров: преобладающая порода в насаждении — сосна обыкновенная; категория земель — насаждения естественного происхождения; класс возраста — VI–XIII; тип леса — сухой бор высоких всхолмлений (СБВ), сухой бор пологих всхолмлений (СБП), свежий бор (СВБ), травяной бор (ТРБ), сосняк пристепной (СПР), согра сосновая (СГРС).

В выборку вошли шесть из семи типов леса, выделенных на территории ленточных боров Алтайского края, за исключением типа леса согра лиственная (СГРЛ), так как сосняки в данных условиях не произрастают.

В БД имеется только 25 сосновых древостоев старше 180 лет (X класс возраста и старше), поэтому основной массив выборки состоит из древостоев возрастом от 101 до 180 лет (при среднем значении 119 лет). Имеющиеся у нас материалы лесоустройства имеют давность более 10 лет [25], а значит, средний возраст спелых и перестойных насаждений в ленточных борах на сегодняшний день выше [18].

В анализируемую выборку вошли все спелые и перестойные насаждения, а также часть приспе-

вающих насаждений III класса бонитета и ниже (в количестве 11,2 тыс. выделов общей площадью 56,9 тыс. га). В районе исследований для сосняков II класса бонитета и выше установлен возраст рубки 101...120 лет, а для сосняков III класса бонитета и ниже — 121...140 лет. Такой принцип формирования выборки был применен в связи с более важным значением возраста древостоя для выявления закономерностей накопления подроста по сравнению с искусственно установленным возрастом рубки, который к тому же неоднократно изменялся в ходе истории [26]. Таким образом, исключение из выборки насаждений VI класса возраста III класса бонитета и ниже нецелесообразно.

Достаточным для естественного лесовосстановления количеством соснового подроста в сосняках типа леса СБВ и СБП считалось количество подроста более 1,5 тыс. шт./га, для насаждений типа леса СВБ, СПР, ТРБ и СГРС — более 2,0 тыс. шт./га. Достаточное количество березового подроста для естественного лесовосстановления в сосняках типа леса СБВ, СБП, СВБ, СПР — более 2,5 тыс. шт./га, для сосняков типа леса ТРБ, СГРС — более 3,0 тыс. шт./га [27].

Исследуемый район — 11 лесничеств был поделен на три группы, в зависимости от их принадлежности к климатическим подзонам Алтайского края [28]: к умеренно засушливой колочной степи были отнесены Барнаульское, Павловское, Кулундинское, Панкрушихинское и Новичихинское лесничества, к засушливой степи — Волчихинское и Лебяжинское, к сухой степи — Ракитовское, Степно-Михайловское, Озеро-Кузнецовское и Ключевское.

Объем выборки по площади исследуемых сосняков и по количеству выделов с распределением по типам леса и климатическим подзонам Алтайского края приведен в табл. 1 и 2.

## Результаты и обсуждение

Породами, наиболее распространенными и перспективными для выращивания в условиях ленточных боров, являются сосна и береза [18, 29]. В сформированной выборке выделов площадь сосняков, под пологом которых преобладает сосновый подрост, составляет 98,0 %. Березовый подрост преобладает на площади 4294 га (1,7 %), в том числе на тип леса ТРБ приходится 3256 га насаждений с преобладанием березового подроста, на тип леса СВБ приходится 912 га. Подрост других пород (осина, ель сибирская, сосна кедровая сибирская) преобладает под пологом естественных сосняков на площади 735 га, из которых 708 га приходится на осину.

Данные о доле сосняков, обеспеченных подростом в количестве, достаточном для естественного лесовосстановления, при различной полноте



Т а б л и ц а 1

**Распределение площади исследуемых сосняков по типам леса  
и климатическим подзонам Алтайского края**

**Area distribution of the studied pine forests by forest types and the Altai Krai climatic subzones**

Климатическая подзона		СБВ	СБП	СВБ	ТРБ	СПР	СГРС	Общий итог
Умеренно-засушливая колодная степь	га	11	7024	52 458	39 257	1183	246	100 179
	%	0,0	2,8	20,5	15,3	0,5	0,1	39,2
Засушливая степь	га	9	23 495	29 827	8365	370	28	62 094
	%	0,0	9,2	11,7	3,3	0,1	0,0	24,3
Сухая степь	га	1463	62 658	25 594	3269	265	23	93 272
	%	0,6	24,5	10,0	1,3	0,1	0,0	36,5
Общий итог	га	1483	93 177	107 879	50 891	1818	297	255 545
	%	0,6	36,5	42,2	19,9	0,7	0,1	100,0

Т а б л и ц а 2

**Распределение количества выделов сосновых насаждений по типам леса  
и климатическим подзонам Алтайского края**

**Distribution of pine stands by forest types and the Altai Krai climatic subzones**

Климатическая подзона		СБВ	СБП	СВБ	ТРБ	СПР	СГРС	Общий итог
Умеренно-засушливая колодная степь	шт.	3	1590	11148	10111	160	83	23 095
	%	0,0	3,0	21,0	19,1	0,3	0,2	43,6
Засушливая степь	шт.	2	3571	5817	1888	103	9	11 390
	%	0,0	6,7	11,0	3,5	0,2	0,0	21,5
Сухая степь	шт.	240	10404	6674	1107	108	10	18 543
	%	0,5	19,6	12,6	2,1	0,2	0,0	35,0
Общий итог	шт.	245	15565	23639	13106	371	102	53 028
	%	0,5	29,3	44,6	24,7	0,7	0,2	100,0

древостоев, приведены в табл. 3–5 для трех наиболее распространенных типов леса (СБП, СВБ, ТРБ), охватывающих 98,6 % площади всех сосняков, имеющих в анализируемой БД.

Среднее значение доли обеспеченных подростом насаждений в пределах одного типа леса в трех различных климатических подзонах примерно одинакова: в условиях СБП — 80...91 %; СВБ — 52...59; ТРБ — 14...30 %.

Наибольшая доля обеспеченных подростом сосняков наблюдается в засушливой степи, что можно объяснить систематическим завышением количества подростка в Волчихинском лесничестве или сложившимися в засушливой степи более благоприятными условиями для роста естественного возобновления сосны.

Данные о площади древостоев, обеспеченных подростом, по Барнаульскому лесничеству для условий типа леса СБП (см. табл. 3) значительно отличаются от средних данных по всем лесничествам. В Барнаульском лесничестве площадь обеспеченных подростом насаждений в 6,8 раза ниже, чем в среднем по всем лесничествам и в 7,8 раза меньше, чем в ближайшем к нему Павловском лесничестве. Объяснить это можно систематической ошибкой (в меньшую сторону)

таксаторов, оценивавших насаждения Барнаульского лесничества, или действием какого-либо внешнего фактора (например, высокая антропогенная нагрузка на леса).

В некоторых лесничествах зафиксировано значительное превышение доли насаждений, обеспеченных подростом, относительно среднего значения по всем лесничествам. Для типа леса СВБ в Павловском лесничестве превышение почти в 1,5 раза. Для типа леса ТРБ в Степно-Михайловском лесничестве превышение в 2,8 раза, для Волчихинского — в 2,4 раза. Это также можно объяснить систематической ошибкой таксаторов (но уже в большую сторону) или некоторым неучтенным фактором, который, вероятнее всего, носит антропогенный характер, например, более активное применение мер по содействию естественному лесовосстановлению под пологом сосняков в указанных лесничествах. Подобные примеры описаны в научных работах [10, 30].

Данные по обеспеченности насаждений подростом в Кулундинском и Панкрушихинском лесничествах (по всем типам леса) также весьма выделяются: в них отмечается тенденция на увеличение доли обеспеченных подростом насаждений при увеличении их относительной полноты.

Т а б л и ц а 3

**Площадь сосняков типа леса сухой бор пологих всхолмлений, обеспеченных подростом, %**  
**Dry-forest-on-gentle-slopes type pine forests area provided with young growth, %**

Лесничество и средние значения по подзонам	Относительная полнота							Среднее значение
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	
Умеренно засушливая колючая степь								
Барнаульское	25	4	7	5	11	20	–	12
Павловское	98	95	91	96	94	95	75	94
Кулундинское	79	64	75	78	82	91	99	81
Панкрушихинское	80	91	80	87	76	81	–	83
Новичихинское	78	70	90	79	77	80	29	80
Среднее	81	77	84	81	77	78	73	80
Засушливая степь								
Волчихинское	95	98	98	98	97	94	76	98
Лебяжинское	75	77	84	90	77	48	–	79
Среднее	81	88	94	96	90	78	79	91
Сухая степь								
Ракитовское	82	85	92	94	89	70	50	88
Степно-Михайловское	54	67	78	83	76	71	51	71
Озеро-Кузнецовское	71	84	85	78	68	46	27	78
Ключевское	88	88	90	92	82	–	–	88
Среднее	72	83	86	84	77	63	42	80
В среднем, по всем лесничествам	74	83	88	88	81	69	54	82

Т а б л и ц а 4

**Площадь сосняков типа леса свежий бор, обеспеченных подростом, %**  
**Maiden-forest type pine forests area provided with young growth, %**

Лесничество и средние значения по подзонам	Относительная полнота								Среднее значение
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
Умеренно засушливая колючая степь									
Барнаульское	41	60	59	49	51	53	12	0	47
Павловское	83	80	86	71	79	85	78	76	79
Кулундинское	30	34	31	40	46	52	49	32	46
Панкрушихинское	13	15	16	26	31	37	69	80	36
Новичихинское	33	38	47	41	29	26	29	17	34
Среднее	53	56	54	50	48	55	54	55	52
Засушливая степь									
Волчихинское	57	74	76	69	69	57	47	22	68
Лебяжинское	33	39	53	44	36	33	33	6	39
Среднее	42	55	70	63	57	47	42	11	59
Сухая степь									
Ракитовское	45	56	50	51	55	36	38	–	51
Степно-Михайловское	37	42	57	63	61	58	49	37	54
Озеро-Кузнецовское	43	56	57	54	45	34	27	12	50
Ключевское	56	79	65	67	58	40	–	–	63
Среднее	43	53	56	57	54	43	43	35	52
В среднем, по всем лесничествам	45	54	60	56	52	52	52	51	54

Т а б л и ц а 5

## Площадь сосняков типа леса травяной бор, обеспеченных подростом, %

Area of pine forests of the grass-forest type provided with young growth, %

Лесничество и средние значения по подзонам	Относительная полнота								Среднее значение
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
Умеренно засушливая колочная степь									
Барнаульское	0	8	3	12	11	19	0	0	11
Павловское	6	16	27	24	20	22	19	15	22
Кулундинское	2	4	3	2	2	3	15	30	3
Панкрушихинское	4	10	14	9	11	15	28	20	12
Новичихинское	16	3	12	11	7	2	17	–	8
Среднее	7	10	16	14	12	15	18	20	14
Засушливая степь									
Волчихинское	5	43	50	44	37	36	18	–	41
Лебяжинское	0	11	10	6	4	13	–	–	7
Среднее	2	27	42	34	25	25	18	–	30
Сухая степь									
Ракитовское	0	9	15	15	17	25	–	–	16
Степно-Михайловское	45	53	28	40	56	64	–	–	47
Озеро-Кузнецовское	35	15	35	34	25	12	–	–	28
Ключевское	26	25	25	–	–	–	–	–	25
Среднее	26	15	25	25	25	28	–	–	24
В среднем, по всем лесничествам	10	14	21	18	15	17	18	20	17

Последнее не типично для соснового подростка в связи с его высоким светолюбием [31, 32].

Панкрушихинское и Кулундинское лесничества объединяет расположение в северной части Алтайского края и охват Алеусского и Кулундинского боров, обособленных от других лент [18]. Для того чтобы подтвердить или опровергнуть аномальные данные, приведенные в БД, необходимо осуществить полевой выезд в данные лесничества и изучить влияние относительной полноты спелых и приспевающих древостоев на количество жизнеспособного подростка. Аномальные данные могут объясняться опущенным эффектом [33, 34].

В рамках нашего исследования для построения графиков (рис. 1, 2) все аномальные данные, которые могли значительно повлиять на результаты, были исключены из выборки. Так, для всех типов леса были исключены данные по Панкрушихинскому и Кулундинскому лесничествам. Для условий типа леса СБП был дополнительно исключен набор данных по Барнаульскому лесничеству, а для типа леса СВБ — по Павловскому лесничеству. Для типов леса СБВ, СПР, СГРС при малом (менее 25 шт.) количестве выделов, имеющих определенную полноту, эти категории также исключались.

Построена зависимость площади сосновых насаждений различных типов леса, обеспеченных подростом в количестве, достаточном для естественного лесовосстановления, от относительной

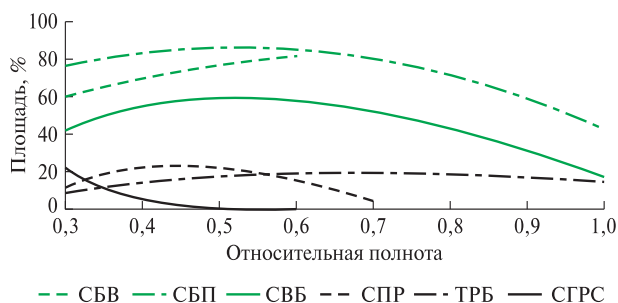


Рис. 1. Зависимость площади сосняков, обеспеченных подростом в количестве, достаточном для естественного лесовосстановления, от относительной полноты древостоя

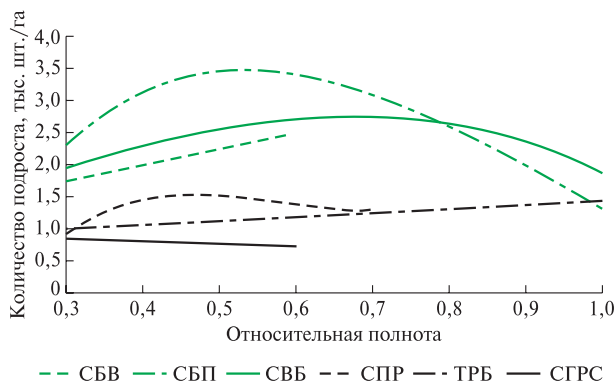
Fig. 1. Dependence of the pine forests area provided with young growth sufficient for natural regeneration on the relative stand density

полноты древостоев (см. рис. 1). Уравнения, описывающие представленные на рис. 1 зависимости приведены в табл. 6.

Наибольшая площадь сосняков, обеспеченных подростом, наблюдается в условиях типа леса СБП (45...88%), в пределах которого наилучшая обеспеченность подростом наблюдается под пологом древостоев с полнотой 0,5. Снижение площади насаждений, обеспеченных подростом, при полнотах 0,3 и 0,4 можно объяснить жесткими климатическими условиями, в которых подрост выживает только в конусе полуденной тени материнских деревьев [35].

Несколько меньшая, по сравнению с СБП, площадь сосняков обеспечена подростом в условиях типа леса СБВ. Этот тип леса характеризуется очень сухими условиями произрастания ( $A_0$ ), меньшей высотой деревьев, а значит, короткой полуденной тенью. Как следствие, наибольшая площадь обеспеченных подростом насаждений имеет полноту 0,6.

В условиях типа леса СВБ доля насаждений, обеспеченных подростом при различной полноте



**Рис. 2.** Зависимость среднего количества подроста под пологом сосновых древостоев различных типов леса, от различной относительной полноты древостоев  
**Fig. 2.** Dependence of the young growth average amount under the canopy of pine stands of various forest types on various relative stand density

древостоев составляет от 18 (при полноте 1,0) до 60 % (при полноте 0,5). Условия произрастания в данном типе леса более благоприятны, чем в СБП и СБВ, в связи с чем зачастую наблюдается мощное развитие подлеска караганы древовидной (*Caragana arborescens* Lam.) [2], кроме того, наблюдается более активное развитие ЖНП [9, 36].

Условия типа леса СПР отличаются от СВБ более плодородными, но при этом более сухими почвами. Кроме того, в ЖНП преобладают степные виды растений, что приводит к снижению площади обеспеченных подростом насаждений до 5...23 %. Наибольшая площадь обеспеченных подростом сосняков данного типа леса имеют полноту древостоя 0,4...0,5.

Из трех наиболее распространенных типов леса наименее обеспечен подростом ТРБ. Площадь обеспеченных насаждений при различной полноте древостоев здесь изменяется от 8 (при полноте 0,3) до 19 % (при полноте 0,6), что объясняется сильным задернением почвы и наличием густого подлеска караганы древовидной и шиповника майского (*Rosa cinnamomea* L.).

Наименьшая площадь насаждений, обеспеченных подростом, наблюдается в условиях типа леса СГРС, для которого характерно близкое залегание грунтовых вод, периодическое подтопление и вымокание растительности в центре выдела,

Т а б л и ц а 6

**Уравнения, описывающие зависимости, представленные на рис. 1**

**Equations describing the dependencies presented in Fig. 1**

Тип леса	Уравнение	Коэффициент детерминации $R^2$	Номер уравнения
СБВ	$y = -105,12x^2 + 165,56x + 20,1$	0,77	(1)
СБП	$y = -184,68x^2 + 191,81x + 35,859$	0,89	(2)
СВБ	$y = 220,77x^3 - 643,94x^2 + 495,46x - 55,144$	0,99	(3)
СПР	$y = 734,42x^3 - 1446,2x^2 + 848,82x - 133,18$	0,96	(4)
ТРБ	$y = 83,243x^3 - 221,72x^2 + 181,36x - 28,637$	0,77	(5)
СГРС	$y = -1468,6x^3 + 2411,2x^2 - 1315,9x + 238,73$	1,00	(6)

Примечание. Уравнения действительны для интервалов линий, показанных на рис. 1.

Т а б л и ц а 7

**Уравнения, описывающие зависимости, представленные на рис. 2**

**Equations describing the dependencies presented in Fig. 2**

Тип леса	Уравнение	Коэффициент детерминации $R^2$	Номер уравнения
СБВ	$y = 2,4603x + 1,0163$	0,99	(1)
СБП	$y = 14,828x^3 - 40,709x^2 + 30,901x - 3,67$	0,97	(2)
СВБ	$y = -3,7734x^3 + 0,5851x^2 + 4,3625x + 0,7003$	0,98	(3)
СПР	$y = 43,224x^3 - 75,015x^2 + 41,755x - 6,0081$	0,83	(4)
ТРБ	$y = 0,5982x + 0,8241$	0,76	(5)
СГРС	$y = -0,375x + 0,9708$	0,60	(6)

Примечание. Уравнения действительны для интервалов линий, показанных на рис. 2.

вследствие чего участки с насаждениями здесь обычно имеют кольцеобразную форму. В таких условиях данного типа леса подрост формируется на микроповышениях.

Построены зависимости среднего количества подростка в различных типах леса от относительной полноты древостоев (см. рис. 2). Уравнения, описывающие зависимости, представленные на рис. 2 приведены в табл. 7.

Линии, отображающие зависимости на осях координат на рис. 2, сходны по форме и расположению с линиями, отображающими зависимости, представленные на рис. 1, за исключением некоторых нюансов: при полноте древостоев 0,8 и более в условиях типа леса СВБ в среднем наблюдается большее количество подростка, чем в условиях СБП; среднее количество подростка под пологом древостоев в условиях типа леса ТРБ линейно возрастает с увеличением относительной полноты; среднее количество подростка в условиях СВБ меньше, чем в условиях СВБ.

В среднем в исследуемых типах леса накапливается следующее количество подростка (тыс. шт./га): СВБ — 2,0; СБП — 3,1; СВБ — 2,6; СПР — 1,3; ТРБ — 1,2; СГРС — 0,8. При этом наибольшее количество подростка (2,8 тыс. шт./га) в среднем по всем типам леса накапливается при полноте древостоев 0,5.

## Выводы

1. Наиболее обеспеченными подростом являются насаждения типов леса СБП и СВБ, что объясняется слабым развитием живого напочвенного покрова и подлеска. Доля сосняков, обеспеченных подростом в количестве, достаточном для естественного лесовосстановления, в данных типах леса составляет от 45 до 88 %, в зависимости от относительной полноты древостоев.

2. В условиях типа леса СВБ площадь насаждений, обеспеченных подростом предварительной генерации, варьирует от 18 (при полноте 1,0) до 60 % (при полноте 0,5). При этом благодаря благоприятным условиям произрастания в данном типе леса в высокополнотных сосняках накапливается большее среднее количество подростка, чем в других типах леса (1,8...2,7 тыс. шт./га).

3. Наименее обеспечены подростом типы леса ТРБ, СПР, СГРС. В данных типах леса успешному естественному лесовосстановлению препятствуют сильное задернение почвы и густой подлесок (для ТРБ), иссушение почвы полевыми видами растений (для СПР), или периодическое избыточное увлажнение почвы (для СГРС). Доля насаждений, обеспеченных подростом, в данных типах леса не превышает 25 %.

4. В исследуемых типах леса насаждения, которые лучше всего обеспечены подростом, имеют


следующую полноту (при среднем количестве подростка): СВБ — 0,6 (2,5 тыс. шт./га); СБП — 0,5 (3,5 тыс. шт./га); СВБ — 0,5 (2,6 тыс. шт./га); СПР — 0,4...0,5 (1,5 тыс. шт./га); ТРБ — 0,7 (1,3 тыс. шт./га); СГРС — 0,3 (0,8 тыс. шт./га).

## Список литературы

- [1] Белов Л.А., Клям О.А., Сураев П.Н. Влияние выборочных рубок на подрост предварительной генерации в сосняках ягодникового типа леса // Леса России и хозяйство в них, 2022. № 1 (80). С. 37–47. DOI 10.51318/FRET.2021.65.76.004
- [2] Залесов С.В., Осипенко А.Е., Толстиков А.Ю., Усов М.В., Гоф А.А., Савин В.В. Воспроизводство и омоложение ленточных боров Алтайского края. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2023. 357 с.
- [3] Усов М.В., Толстиков А.Ю., Савин В.В., Осипенко А.Е., Шубин Д.А., Крюк В.И. Обеспеченность подростом спелых и перестойных насаждений Западно-Сибирского подтаежного лесостепного лесного района // Аграрное образование и наука, 2016. № 3. С. 29.
- [4] Ivanova N., Petrova I. Age structure of coniferous saplings in mountain old-growth forests of the Middle Urals // E3S Web of Conferences, Moscow, 22–24 April, 2021, v. 265. Moscow: EDP Sciences, 2021, pp. 01024. DOI 10.1051/e3sconf/202126501024
- [5] Залесова Е.С., Залесов С.В., Терехов Г.Г., Толкач О.В., Луганский Н.А., Шубин Д.А. Обеспеченность спелых и перестойных светлохвойных насаждений Западно-Уральского таежного лесного района подростом предварительной генерации // Успехи современного естествознания, 2019. № 1. С. 39–44.
- [6] Малиновских А.А., Маленко А.А. Влияние живого напочвенного покрова на процесс естественного возобновления сосны обыкновенной после рубок в спелых и перестойных насаждениях в ленточных борах Алтайского края // Вестник Алтайского государственного аграрного университета, 2017. № 12 (158). С. 58–64.
- [7] Луферов А.О., Лабоха К.В. Содействие естественному возобновлению как основной метод лесовосстановления в условиях усыхания сосны // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов, 2018. № 2 (210). С. 56–62.
- [8] Башегуров К.А., Малиновских А.А., Савин М.А., Годовалов Г.А. Специфика накопления подростка на гарях в различных лесорастительных подзонах ленточных боров Алтая // Леса России и хозяйство в них, 2020. № 1 (72). С. 4–14.
- [9] Малиновских А.А. Степень развития растительного покрова в разных типах лесорастительных условий на гарях в ленточных борах Алтайского края // Лесной вестник. Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 4. С. 43–51. DOI 10.18698/2542-1468-2020-4-43-51
- [10] Huth F, Wehnert A, Wagner S. Natural regeneration of scots pine requires the application of silvicultural treatments such as overstorey density regulation and soil preparation // Forests, 2022, no. 13 (6), p. 817. DOI 10.3390/f13060817
- [11] Гончарова И.А., Барченков А.П., Скрипальщикова Л.Н. Оценка процесса возобновления сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в Красноярской лесостепи // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии, 2023. № 22–1. С. 110–113. DOI 10.14258/pbssm.2023020

- [12] Малиновских А.А. Влияние клена ясенелистного (*Acer negundo* L.) на естественное возобновление сосны обыкновенной в Барнаульском ленточном бору // Лесной вестник. Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 3. С. 48–56. DOI 10.18698/2542-1468-2023-3-48-56
- [13] Парамонов Е.Г. Рыбкина И.Д. Ленточные боры Алтая в период потепления климата // Устойчивое лесопользование, 2017. № 3 (51). С. 33–39.
- [14] Толстиков А.Ю., Усов М.В., Залесова Е.С., Шубин Д.А. Специфика накопления подроста сопутствующей генерации при выборочных рубках // Актуальные проблемы лесного комплекса, 2019. № 54. С. 67–70.
- [15] Усов М.В., Залесов С.В., Шубин Д.А., Толстиков А.Ю., Белов Л.А. Перспективность применения чересполосных постепенных рубок в сосняках Алтая // Аграрный вестник Урала, 2017. № 1 (155). С. 44–48.
- [16] Мартынюк А.А., Родин С.А., Рябцев О.В. Инновационному развитию нет альтернативы // Лесохозяйственная информация, 2019. № 3. С. 7–20. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2019.3.01
- [17] Башегуров К.А., Залесова Е.С., Толстиков А.Ю., Усов М.В. Последствия группово-выборочных рубок в сосняках ленточных боров Алтая // Успехи современного естествознания, 2019. № 9. С. 13–18.
- [18] Желдак В.И., Маленко А.А., Мартынюк А.А., Сидоренков В.М., Лямцев Н.И., Коршунов Н.А., Корякин В.А., Рябцев О.В., Малиновских А.А., Дорошенкова Э.В., Коношенков М.Е., Курщикова Е.С., Сидоренкова Е.М., Трушина И.Г., Трушина Н.И. Ленточные боры и ведение хозяйства в них. Пушкино: Изд-во ВНИИЛМ, 2022. 216 с.
- [19] Osipenko A.E., Zalesov S.V. Evaluation of artificial reforestation efforts in the ribbon forest zone of Altai Krai // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, v. 316. № 1, p. 012047. DOI 10.1088/1755-1315/316/1/012047
- [20] Парамонов Е.Г. Экологические мероприятия в целях лесовосстановления в ленточных борах Алтайского края // Мир науки, культуры, образования, 2014. № 2 (45). С. 396–399.
- [21] Малиновских А.А., Маленко А.А. Процесс естественного возобновления сосны обыкновенной после выборочных рубок в спелых и перестойных насаждениях в ленточных борах Алтайского края // Вестник Алтайского государственного аграрного университета, 2018. № 1 (159). С. 67–72.
- [22] Дебков Н.М., Кузменкин Д.В., Грибков А.В., Пожидаева Л.В. О предельном возрасте сосны обыкновенной и ее древостоев в ленточных борах Алтайского края // Устойчивое лесопользование, 2021. № 1 (65). С. 53–61. DOI 10.47364/2308-541X\_2021\_65\_1\_53
- [23] Осипенко А.Е., Залесов С.В. Разновозрастность сосновых древостоев как фактор гармонизации системы лесохозяйственных мероприятий в ленточных борах Алтайского края // Лесотехнический журнал, 2023. Т. 13. № 1 (49). С. 129–145. DOI 10.34220/issn.2222-7962/2023.1/9
- [24] Кулагина В.В. Современное состояние Барнаульского ленточного бора // География и природопользование Сибири, 2016. № 22. С. 76–81. DOI 10.18500/1819-7663-2020-20-1-4-9
- [25] Осипенко А.Е., Залесов С.В., Белов Л.А., Шубин Д.А. Рост по высоте и диаметру сосновых древостоев в Западно-Сибирском подтаежно-лесостепном районе Алтайского края // Лесохозяйственная информация, 2019. № 1. С. 56–66. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2019.1.05
- [26] Мартынюк А.А., Сидоренков В.М., Желдак В.И., Лямцев Н.И., Рябцев О.В., Жафяров А.В. Ленточные боры Алтайского края — состояние и совершенствование хозяйства в них // Лесохозяйственная информация, 2019. № 1. С. 33–48. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2019.1.03
- [27] Приказ Минприроды России от 29.12.2021 № 1024 «Об утверждении Правил лесовосстановления, формы, состава, порядка согласования проекта лесовосстановления, оснований для отказа в его согласовании, а также требований к формату в электронной форме проекта лесовосстановления» (Зарегистрировано в Минюсте России 11.02.2022 № 67240).
- [28] Харламова Н.Ф. Оценка и прогноз современных изменений климата Алтайского региона. Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2013. 156 с.
- [29] Маленко А.А. Рост и продуктивность искусственных насаждений в ленточных борах Западной Сибири: специальность 06.03.02 «Лесоведение, лесоводство, лесоустройство и лесная таксация»: дис. ... д-ра с.-х. наук. Екатеринбург, 2012. 360 с.
- [30] Lavnyy V., Spathelf P., Kravchuk R., Vytseha R., Yakhnytskyy V.: Silvicultural options to promote natural regeneration of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Western Ukrainian forests // J. of Forest Science, 2022, no. 68, pp. 298–310. DOI 10.17221/73/2022-JFS
- [31] Evstigneev O.I. Ontogenetic scales of relation of trees to light (on the example of eastern European forests) // Russian J. of Ecosystem Ecology, 2018, v. 3. no. 3, pp. 1–18. DOI 10.21685/2500-0578-2018-3-3
- [32] Zawadzka A, Slupska A. Under-Canopy regeneration of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) as adaptive potential in building a diverse stand structure // Sustainability, 2022, no. 14 (2), p. 1044. DOI 10.3390/su14021044
- [33] Coban S., Colak A. H., Rotherham, I. D., Ozalp, G., Caliskan A. Effects of canopy gap size on the regeneration of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Eskisehir-Catacik region of Turkey // Austrian J. of Forest Science / Centralblatt für das gesamte Forstwesen, 2018, v. 135. no. 3, pp. 183–212.
- [34] Topacoglu O., Genc E. Forest edge effects on seedlings in mixed Oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky)-Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands // Applied Ecology & Environmental Research, 2019, v. 17 no. 2, pp. 2219–2231. DOI 10.15666/aeer/1702\_22192231
- [35] Салтыков А.Н. Системная целостность и сходство пространственно-возрастной структуры подроста сосны обыкновенной и сосны крымской // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада, 2021. № 141. С. 44–54. DOI 10.36305/0513-1634-2021-141-44-54
- [36] Малиновских А.А. Флористический состав живого напочвенного покрова на гарях в ленточных борах Западной Сибири // Лесохозяйственная информация, 2021. № 1. С. 5–17. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2021.1.01

## Сведения об авторах

**Осипенко Алексей Евгеньевич**  — канд. с.-х. наук, доцент кафедры лесоводства, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (УГЛТУ), osipenkoae@m.usfeu.ru

**Залесов Сергей Вениаминович** — д-р с.-х. наук, профессор, зав. кафедрой лесоводства, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (УГЛТУ), zalesovsv@m.usfeu.ru

Поступила в редакцию 04.12.2023.

Одобрено после рецензирования 09.01.2024.

Принята к публикации 22.03.2024.

## YOUNG PINE PLANTATIONS AVAILABILITY IN ALTAI-NOVOSIBIRSK REGION OF FOREST-STEPPE AND RIBBON FORESTS

**A.E. Osipenko** , **S.V. Zalesov**

Ural State Forestry University, 37, Sibirskiy trakt st., 620110, Yekaterinburg, Russia

osipenkoae@m.usfeu.ru

Data on the number of young plantations in natural pine stands growing in the Altai-Novosibirsk region of forest-steppes and ribbon forests has been given. The research is based on the analysis of a database compiled from forest management materials of eleven forest districts, on the territory of which there are ribbon forests in the Altai Krai. Data analysis was performed by climatic subzones of the region, forest districts, forest types and relative density of forest stands. Data are presented on the proportion of stands of VI–XIII age classes provided with young plantations in an amount sufficient for natural reforestation. Trend lines were constructed to reflect the average amount of young pine plantations under the canopy of forest stands of varying relative density. It has been established that pine forests of the dry-forest-on-gentle-slopes and dry-forest-on-high-slopes types are best provided with young plantations. It has been found that pine forests of two forest types, namely dry-forest-on-gentle-slopes and dry-forest-on-high-slopes types, are best provided with young plantations. It has been established that the share of crops provided with young pine plantations in quantities sufficient for natural reforestation in these forest types ranges from 45 to 88 % (depending on the relative density of the forest stands). It has been revealed that in conditions of the maiden forest type, the proportion of pine forests provided with young pine plantations of preliminary generation varies from 18 (at a density of 1,0) to 60 % (at a density of 0,5). It has been stated that the lowest provision of young pine plantations was recorded in the grass forest, steppe pine forest, and sogra pine forest. It is indicated that in these forest types, successful natural reforestation is hampered by negative factors determined by the characteristics of these forest types. It has been established that the share of forest stands provided with young plantations in the pine grass forest, steppe pine forest, and sogra pine forest types does not exceed 25 %. It has been revealed that the optimal relative density of tree stands for the accumulation of young pine plantations in different forest types differs as follows: dry-forest-on-high-slopes type — 0,6, dry-forest-on-gentle-slopes type — 0,5, fresh forest type — 0,5, steppe pine forest type — 0,4...0,5, grass forest type — 0,7, and sogra pine forest type — 0,3. It has been established that depending on the forest type, an average of 0,8 to 3,1 thousand pcs/ha of young pine plantations of preliminary generation accumulates in ribbon forests.

**Keywords:** Scots pine, forest stand, young plantation, forest type, relative density, ribbon forest

**Suggested citation:** Osipenko A.E., Zalesov S.V. *Obespechennost' podrostom sosnovykh nasazhdeniy Altai-Novosibirskogo rayona lesostepey i lentochnykh borov* [Young pine plantations availability in Altai-Novosibirsk region of forest-steppes and ribbon forests]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 3, pp. 15–25.

DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-15-25

## References


- [1] Belov L.A., Klyam O.A., Suraev P.N. *Vliyanie vyborochnykh rubok na podrost predvaritel'noy generatsii v sosnyakakh yagodnikovogo tipa lesa* [The effect of selective logging on the undergrowth of preliminary generation in berry-type pine forests]. *Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh* [Forests of Russia and the economy in them], 2022, no. 1 (80), pp. 37–47. DOI 10.51318/FRET.2021.65.76.004
- [2] Zalesov S.V., Osipenko A.E., Tolstikov A.Yu., Usov M.V., Gof A.A., Savin V.V. *Vosproizvodstvo i omolozhenie lentochnykh borov Altayskogo kraya* [Reproduction and rejuvenation of ribbon pine forests in the Altai Territory]. Ekaterinburg: UGLTU, 2023, 357 p.
- [3] Usov M.V., Tolstikov A.Yu., Savin V.V., Osipenko A.E., Shubin D.A., Kryuk V.I. *Obespechennost' podrostom spelykh i perestoynykh nasazhdeniy Zapadno-Sibirskogo podtaezhnogo lesostepnogo lesnogo rayona* [Mature and overmature stands provision with undergrowth in the west Siberian forest steppe forest region]. *Agrarnoe obrazovanie i nauka* [Agricultural education and science], 2016, no. 3, pp. 29.

- [4] Ivanova N., Petrova I. Age structure of coniferous saplings in mountain old-growth forests of the Middle Urals. E3S Web of Conferences, Moscow, 22–24 April 2021, v. 265. Moscow: EDP Sciences, 2021, p. 01024. DOI 10.1051/e3sconf/202126501024
- [5] Zalesova E.S., Zalesov S.V., Terekhov G.G., Tolkach O.V., Luganskiy N.A., Shubin D.A. *Obespechennost' spelykh i perestoynykh svetlokhvoynnykh nasazhdeniy Zapadno-Ural'skogo taezhnogo lesnogo podrostom predvaritel'noy generatsii* [Self-sufficiency of mature and overmature softwood forests of West Ural taiga region in undergrowth of pre-generation]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in current natural sciences], 2019, no. 1, pp. 39–44.
- [6] Malinovskikh A.A., Malenko A.A. *Vliyaniye zhyvogo napochvennogo pokrova na protsess estestvennogo vozobnovleniya sosny obyknovennoy posle rubok v spelykh i perestoynykh nasazhdeniyakh v lentochnykh borakh Altayskogo kraya* [Living soil cover influence on natural regeneration of Scots pine after felling in mature and over-mature stands in belt pine forests of the Altai Territory]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Altai State Agricultural University], 2017, no. 12 (158), pp. 58–64.
- [7] Luferov A.O., Labokha K.V. *Sodeystvie estestvennomu vozobnovleniyu kak osnovnoy metod lesovosstanovleniya v usloviyakh usykhaniya sosny* [Assistance to natural regeneration as the basic method of reforestation in conditions of dieback of pine forests]. *Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe khozyaystvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyayemykh resursov* [BSTU Publications. Series 1: Forestry, environmental management and processing of renewable resources], 2018, no. 2 (210), pp. 56–62.
- [8] Bashegurov K.A., Malinovskikh A.A., Savin M.A., Godovalov G.A. *Spetsifika nakopleniya podrosta na garyakh v razlichnykh lesorastitel'nykh podzonakh lentochnykh borov Altaya* [Specificity of undergrowth with accumulation on learned areal in different forest growing subzones of Altai belt boron]. *Les Rossii i khozyaystvo v nikh* [Forests of Russia and the economy in them], 2020, no. 1 (72), pp. 4–14.
- [9] Malinovskikh A.A. *Stepen' razvitiya rastitel'nogo pokrova v raznykh tipakh lesorastitel'nykh usloviy na garyakh v lentochnykh borakh Altayskogo kraya* [Plant cover development degree under different types of forest growth conditions on burnt areas in the belt pine forests of the Altai Territory]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 4, pp. 43–51. DOI 10.18698/2542-1468-2020-4-43-51
- [10] Huth F, Wehnert A, Wagner S. Natural regeneration of scots pine requires the application of silvicultural treatments such as overstorey density regulation and soil preparation. *Forests*, 2022, no. 13 (6), p. 817. DOI 10.3390/f13060817
- [11] Goncharova I.A., Barchenkov A.P., Skripal'shchikova L.N. *Otsenka protsessa vozobnovleniya sosny obyknovennoy (Pinus sylvestris L.) v Krasnoyarskoy lesostepi* [Restoration assessment of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) at the Krasnoyarsk forest-steppe]. *Problemy botaniki Yuzhnoy Sibiri i Mongolii* [Problems of Botany of Southern Siberia and Mongolia], 2023, no. 22–1, pp. 110–113. DOI 10.14258/pbssm.2023020
- [12] Malinovskikh A.A. *Vliyaniye klena yasenelistnogo (Acer negundo L.) na estestvennoe vozobnovlenie sosny obyknovennoy v Barnaul'skom lentochnom boru* [Influence of ash-leaved maple (*Acer negundo* L.) on Scots pine natural renewal in Barnaul ribbon pine forest]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 3, pp. 48–56. DOI 10.18698/2542-1468-2023-3-48-56
- [13] Paramonov E.G., Rybkina I.D. *Lentochnye bory Altaya v period potepleniya klimata* [Ribbon forests of Altai in the period of climate warming]. *Ustoychivoe lesopol'zovanie* [Sustainable forestry], 2017, no. 3 (51), pp. 33–39.
- [14] Tolstikov A.Yu., Usov M.V., Zalesova E.S., Shubin D.A. *Spetsifika nakopleniya podrosta soputstvuyushchey generatsii pri vyborochnykh rubkakh* [The specificity of the accumulation of undergrowth concomitant generation in selective logging]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex], 2019, no. 54, pp. 67–70.
- [15] Usov M.V., Zalesov S.V., Shubin D.A., Tolstikov A.Yu., Belov L.A. *Perspektivnost' primeneniya cherespolosnykh postepennykh rubok v sosnyakh Altaya* [Perspective of alternate strip felling in pine stands of Altai]. *Agrarnyy vestnik Urala* [Agrarian Bulletin of the Urals], 2017, no. 1 (155), p. 10.
- [16] Martynyuk A.A., Rodin S.A., Ryabtsev O.V. *Innovatsionnomu razvitiyu net al'ternativy* [There is no alternative to innovative development] *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 2019, no. 3, pp. 7–20. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2019.3.01
- [17] Bashegurov K.A., Zalesova E.S., Tolstikov A.Yu., Usov M.V. *Posledstviya gruppovo-vyborochnykh rubok v sosnyakh lentochnykh borov Altaya* [Consequence of group-selective felling in stripe pine forests of Altai]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in current natural sciences], 2019, no. 9, pp. 13–18.
- [18] Zheldak V.I., Malenko A.A., Martynyuk A.A., Sidorenkov V.M., Lyamtsev N.I., Korshunov N.A., Koryakin V.A., Ryabtsev O.V., Malinovskikh A.A., Doroshchenkova E.V., Konyushenkov M.E., Kursikova E.S., Sidorenkova E.M., Trushina I.G., Trushina N.I. *Lentochnye bory i vedenie khozyaystva v nikh* [Pine forests and its management]. *Pushkino: VNIILM*, 2022, 216 p.
- [19] Osipenko A.E., Zalesov S.V. Evaluation of artificial reforestation efforts in the ribbon forest zone of Altai Krai. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, v. 316, no. 1, p. 012047. DOI 10.1088/1755-1315/316/1/012047
- [20] Paramonov E.G. *Ekologicheskie meropriyatiya v tselyakh lesovosstanovleniya v lentochnykh borakh Altayskogo kraya* [Environmental activities in the course of reforestation of belt-shaped pine forests in Altai Territory]. *Mir nauki, kul'tury, obrazovaniya* [The world of science, culture and education], 2014, no. 2 (45), pp. 396–399.
- [21] Malinovskikh A.A., Malenko A.A. *Protsess estestvennogo vozobnovleniya sosny obyknovennoy posle vyborochnykh rubok v spelykh i perestoynykh nasazhdeniyakh v lentochnykh borakh Altayskogo kraya* [Natural regeneration of scots pine after selective felling in mature and over-mature stands in belt pine forests of the Altai Territory]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Altai State Agricultural University], 2018, no. 1 (159), pp. 67–72.
- [22] Debkov N.M., Kuzmenkin D.V., Gribkov A.V., Pozhidaeva L.V. *O predel'nom vozraste sosny obyknovennoy i ee drevostoev v lentochnykh borakh Altayskogo kraya* [On the maximum age of Scots pine and its stands in the Altai Territory ribbon forests]. *Ustoychivoe lesopol'zovanie* [Sustainable forestry], 2021, no. 1 (65), pp. 53–61. DOI 10.47364/2308-541X\_2021\_65\_1\_53
- [23] Osipenko A.E., Zalesov S.V. *Raznovozrastnost' osnovnykh drevostoev kak faktor garmonizatsii sistemy lesokhozyaystvennykh meropriyatiy v lentochnykh borakh Altayskogo kraya* [Age differences of pine stands as a factor of harmonization of the system of forest management activities in ribbon forests of the Altai Territory]. *Lesotekhnicheskyy zhurnal* [Forestry Engineering journal], 2023, v. 13, no. 1 (49), pp. 129–145. DOI 10.34220/issn.2222-7962/2023.1/9
- [24] Kulagina V.V. *Sovremennoe sostoyaniye Barnaul'skogo lentochnogo* [Current state of the Barnaul ribbon forest]. *Geografiya i prirodopol'zovanie Sibiri* [Geography and nature management of Siberia], 2016, no. 22, pp. 76–81. DOI 10.18500/1819-7663-2020-20-1-4-9



- [25] Osipenko A.E., Zalesov S.V., Belov L.A., Shubin D.A. *Rost po vysote i diametru sosnovykh drevostoev v Zapadno-Sibirskom podtaigno-lesostepnom rayone Altayskogo kraya* [Growth in height and diameter of pine stands in the West Siberian subtaiga-forest-steppe region of the Altai Territory]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 2019, no. 1. pp. 56–66. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2019.1.05
- [26] Martynyuk A.A., Sidorenkov V.M., Zheldak V.I., Lyamtsev N.I., Ryabtsev O.V., Zhafyarov A.V. *Lentochnye bory Altayskogo kraya — sostoyanie i sovershenstvovanie khozyaystva v nikh* [Ribbon relict pine forests in the Altai Territory — current forest management and its improvement]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 2019, no. 1, pp. 33–48. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2019.1.03
- [27] *Prikaz Minprirody Rossii ot 29.12.2021 № 1024 «Ob utverzhdenii Pravil lesovosstanovleniya, formy, sostava, poryadka soglasovaniya proekta lesovosstanovleniya, osnovaniy dlya otказа v ego soglasovanii, a takzhe trebovaniy k formatu v elektronnoy forme proekta lesovosstanovleniya» (Zaregistrovano v Minyuste Rossii 11.02.2022 № 67240)* [Order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated December 29, 2021, no. 1024 «On approval of the Rules for reforestation, the form, composition, procedure for approving a reforestation project, the grounds for refusing to approve it, as well as requirements for the format in the electronic form of a reforestation project» (Registered with the Ministry of Justice of Russia February 11, 2022, no. 67240)].
- [28] Kharlamova N.F. *Otsenka i prognoz sovremennykh izmeneniy klimata Altayskogo regiona* [Assessment and forecast of current climate changes in Altai Territory]. Barnaul: AltGU, 2013, 156 p.
- [29] Malenko A.A. *Rost i produktivnost' iskusstvennykh nasazhdeniy v lentochnykh borakh Zapadnoy Sibiri* [The growth and productivity of artificial plantings in the tape forests of Western Siberia]. Dis. Dr. Sci. (Agric.). Ekaterinburg, 2012, 360 p.
- [30] Lavnyy V., Spathelf P., Kravchuk R., Vytseha R., Yakhnytskyy V.: Silvicultural options to promote natural regeneration of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Western Ukrainian forests. *J. of Forest Science*, 2022, no. 68, pp. 298–310. DOI 10.17221/73/2022-JFS
- [31] Evstigneev O.I. Ontogenetic scales of relation of trees to light (on the example of eastern European forests). *Russian J. of Ecosystem Ecology*, 2018, v. 3, no. 3, pp. 1–18. DOI 10.21685/2500-0578-2018-3-3
- [32] Zawadzka A., Slupska A. Under-Canopy regeneration of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) as adaptive potential in building a diverse stand structure. *Sustainability*, 2022, no. 14 (2), p. 1044. DOI 10.3390/su14021044
- [33] Coban S., Colak A. H., Rotherham, I. D., Ozalp, G., Caliskan A. Effects of canopy gap size on the regeneration of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Eskisehir-Catacik region of Turkey. *Austrian J. of Forest Science. Centralblatt für das gesamte Forstwesen*, 2018, v. 135, no. 3, pp. 183–212.
- [34] Topacoglu O., Genc E. Forest edge effects on seedlings in mixed Oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) – Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands. *Applied Ecology & Environmental Research*, 2019, v. 17, no. 2, pp. 2219–2231. DOI 10.15666/aeer/1702\_22192231
- [35] Saltykov A.N. *Sistemnaya tselostnost' i skhodstvo prostranstvenno-vozrastnoy struktury podrosta sosny obyknovennoy i sosny krymskoy* [Systemic integrity and similarity of the spatial and age structure of the undergrowth of Scots pine and Crimean pine]. *Byulleten' Gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada* [Bulletin of the State Nikitsky Botanical Gardens], 2021, no. 141, pp. 44–54. DOI 10.36305/0513-1634-2021-141-44-54
- [36] Malinovskikh A.A. *Floristicheskiy sostav zhivogo napochvennogo pokrova na garyakh v lentochnykh borakh Zapadnoy Sibiri* [The floristic composition of the living soil cover on burnt areas in the belt pine forests of West Siberia]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 2021, no. 1. pp. 5–17. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2021.1.01

## Authors' information

**Osipenko Aleksey Evgen'evich**  — Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the Forestry Department of the Ural State Forestry University, osipenkoae@m.usfeu.ru

**Zalesov Sergey Veniaminovich** — Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Head of the Forestry Department of the Ural State Forestry University, zalesovsv@m.usfeu.ru

Received 04.12.2023.

Approved after review 09.01.2024.

Accepted for publication 22.03.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article  
The authors declare that there is no conflict of interest

## СБАЛАНСИРОВАННОЕ РАЗВИТИЕ РЕГИОНА И ЛЕСНОЙ РЕСУРСНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ

Р.Н. Ковалев<sup>1,2</sup>, В.В. Побединский<sup>1,2</sup>, Г.А. Иовлев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», Россия, 620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, д. 37

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Уральский государственный аграрный университет», Россия, 620075, г. Екатеринбург, ул. Карла Либкнехта, д. 42

pobedinskyvv@mail.ru

Рассмотрена актуальная проблема сбалансированного устойчивого развития регионов, в первую очередь, располагающих большими лесными ресурсами. На основе сравнительного анализа эффективности использования российских и зарубежных лесных ресурсов показаны значительная недооценка продуктивности лесных земель на территории того иного региона РФ и эффективности использования их ресурсного потенциала по всему спектру его полезностей, следовательно, его вклада в ВВП страны. В качестве одной из главных причин такого положения определена методологическая, поэтому в статье изложены концептуальные основы интеграции лесного ресурсного потенциала в сбалансированное социо-эколого-экономическое развитие региона. В научном плане, на основе обобщений результатов предыдущих исследований и новейших научных достижений, изложена новая методология, основанная на современных подходах к исследованиям больших систем и информационных технологиях. Представление результатов практической реализации предложенной методологии в виде прикладного программного обеспечения рекомендуется использовать на всех требуемых уровнях государственного стратегического планирования.

**Ключевые слова:** сбалансированное развитие; лесные регионы; лесные земли; лесной ресурсный потенциал; интеграция; индекс продуктивности территории

**Ссылка для цитирования:** Ковалев Р.Н., Побединский В.В., Иовлев Г.А. Сбалансированное развитие региона и лесной ресурсный потенциал // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 3. С. 26–36. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-26-36

По данным Федерального агентства лесного хозяйства, Россия занимает первое место в мире по обеспеченности лесными ресурсами, на ее территории сосредоточено около 20 % мировых запасов древесины (более 82 млрд м<sup>3</sup>). В целом леса занимают примерно 46,4 % территории страны, тогда как во всем мире только 31,2 %. Площадь земель РФ, покрытых лесами, на начало 2022 г. составляла свыше 794 млн га. Характерно, что около 1/3 (27 %) регионов страны имеют уровень облесенности свыше 50 % (рис. 1).

Однако, несмотря на приведенные выше данные, в настоящее время вклад лесного комплекса в экономику РФ существенно ниже потенциального и аналогичного показателя других стран, схожих с РФ по объемам запасов и заготовки древесины. Например, эта доля в экономике Швеции и Финляндии составляет до 5 % ВВП, а в РФ в 2019 г. она составила только 0,74 % [1]. Отсюда следует, что лесной ресурсный потенциал РФ, возможно, недостаточно реализован в силу тех или иных причин или недооценен по причинам методического характера.

Таким образом, актуальность приобретает проблема выработки комплексного подхода на

уровне методологии как объективной оценки лесного ресурсного потенциала по всему спектру его пользы, так и его интеграции в сбалансированное эколого-социо-экономическое развитие лесного региона.

### Цель работы

Цель работы — разработка нового концептуального подхода к проблеме интеграции лесного ресурсного потенциала в сбалансированное развитие лесных регионов, на основе анализа имеющихся теоретических подходов определить задачи и теоретический инструментарий для реализации модели интеграции лесного ресурсного потенциала в сбалансированное развитие регионов, качественная оценка ориентировочного эффекта, применимости и масштабов внедрения результатов исследований.

### Материалы и методы исследования

В работе использованы данные статической отчетности Федерального агентства лесного хозяйства РФ, нормативные документы Правительства РФ, общенаучные методы исследований, методы системного анализа, экологии, теории устойчивого управления лесами, региональной и отраслевой экономики, теории транспортного ос-

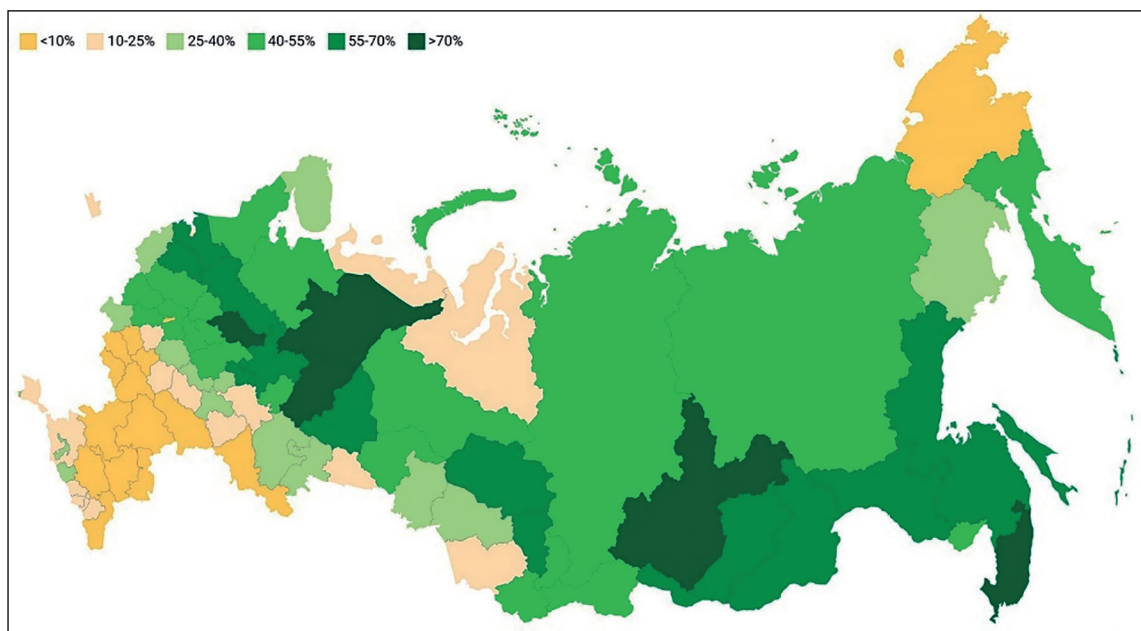


Рис. 1. Лесистость регионов РФ по состоянию на 2022 г.  
Fig. 1. Forest cover of the Russian Federation regions in 2022

воения лесосырьевых баз, современных информационных технологий, концепций и функциональных возможностей систем визуально-блочного имитационного моделирования, анализа больших наборов данных.

**Результаты анализа теоретических подходов к оценкам лесного ресурсного потенциала и обоснование интегрального подхода к проблеме его реализации.** В современных условиях рост экономики страны во многом определяется развитием регионов. Этой проблеме посвящены достаточно крупные исследования [2–8]. Б.Д. Бабаевым и Е.Е. Николаевой [6] хозяйственный механизм региона показан как целостная система, объединяющая саморазвитие региона и внешнее управляющее воздействие в целях повышения благосостояния населения, проживающего на территории, на основе инновационного развития. При этом они обратили внимание на то, что хозяйственный механизм должен ориентировать хозяйствующих субъектов на соединение текущих целей с долгосрочными установками, что требует развития долгосрочного проектирования (планирования).

В связи с этим актуален также вывод д-ра экон. наук С.Н. Мирошникова [5]. Он считает, что к существующим недостаткам регионального управления следует отнести «рассмотрение развития только как увеличения количественных целевых показателей, приращения объема товаров и услуг, а также отсутствие анализа взаимовлияния отдельных направлений деятельности, учета поведения отдельных частей региональных социально-экономических систем, возможностей

создания условий для саморазвития и предпосылок дальнейших позитивных изменений». Упущение, по его мнению, региональными органами государственной власти возможностей реализации качественных изменений в области региональной социально-экономической системы и ее частей при учете только количественных показателей приводит к низкой эффективности выполняемых ими действий, а достигнутые результаты не соответствуют вложенным силам и средствам.

Правительство России в свое время разработало Федеральный закон № 172-ФЗ от 28.06.2014 г. «О стратегическом планировании в Российской Федерации», который нацеливает регионы на сбалансированное устойчивое развитие [9]. Как известно, «система сбалансированного природопользования основана на удовлетворении экономических, экологических и социальных потребностей общества, которые могут достигаться при условии достижения баланса ресурсных, экономических, экологических и социальных факторов развития в конкретном регионе, ориентированном на оценку ресурсной обеспеченности, социальной стабильности, экономического роста и экологической безопасности» [10].

В настоящее время 1/3 регионов страны относятся к многолесным, а если брать в учет суммарную площадь этих регионов, то по этому показателю их доля превысит 50 % всей территории РФ. Отсюда очевидно, что проблема сбалансированного развития лесных регионов является глобальной в масштабах страны, а с учетом поставленной Президентом России задачи — к 2050 г. выйти на экологический уровень

углеродной нейтральности, она выходит на международный уровень по своей значимости. Для решения указанной проблемы актуальность приобретает необходимость разработки методологии интеграции лесного ресурсного потенциала в сбалансированное развитие регионов, основанная именно на учете взаимовлияния отдельных отраслей экономики и социокультурной деятельности для обеспечения условий их сбалансированного саморазвития. Под интеграцией в данном случае следует понимать взаимосвязь различных отраслей хозяйственной и социокультурной деятельности региона с возможностью совместного оптимального функционирования.

Почему важна интеграция именно лесного ресурсного потенциала в развитие прежде всего многолесных регионов? Известно, что ресурсный потенциал лесного фонда страны огромен и может обеспечивать сырьем и продукцией многие отрасли экономики. Он также позволяет, в отличие от всех других природных ресурсов, совершенствовать и развивать любую сферу человеческой деятельности — экологическую, социальную, экономическую. О составе лесного ресурсного потенциала опубликовано много трудов как отечественных, так и зарубежных ученых [11–15]. Из этих источников вытекает, что лес при рациональном использовании может вносить вклад в сбалансированное развитие территорий всеми своими компонентами, что нельзя сказать о других природных ресурсах, включая полезные ископаемые, которые в настоящее время являются основным источником наполняемости бюджетов разных уровней. Тем более что лес, в отличие от всех остальных природных ресурсов, является возобновляемым источником природных благ и может служить человеку вечно при правильном ведении лесного хозяйства.

Отсюда ясно, сколь велик должен быть вклад лесных земель в сбалансированное развитие той или иной территории и что в настоящее время их роль значительно занижена, а их потенциал далеко не использован. Если думать о том, что остается будущим поколениям от нынешней хозяйственной деятельности общества, то забота о лесе может обеспечить им экологическое и социальное благополучие на века, в то время как безудержная эксплуатация невозобновляемых полезных ископаемых принесет значительный рост экологически нарушенных территорий и проблемы моногородов.

В пользу это направления исследований говорят также результаты работы других ученых. Так, по мнению Е.Е. Николаевой и Б.Д. Бабаева, комплексное использование лесных ресурсов является важным фактором устойчивого социально-экономического развития территорий [6].

**Разработка структурной схемы интегральной оценки продуктивности территории региона.** Из изложенного выше можно сделать вывод, что для решения названных проблем, помимо всех прочих мер, необходимо развивать и совершенствовать взаимодействие науки, бизнеса и гражданского общества в условиях современных рисков, экономической и социальной неопределенности. Суть такого взаимодействия — реализация научных идей (учения о научном познании тех или иных сложных систем и принципов — основных исходных положений теории рационального природопользования) в процессе согласования интересов бизнеса с предпочтениями гражданского общества.

Значение науки в совершенствовании и развитии системы природопользования в условиях новых вызовов (западных санкций) заключается в изучении экологических, экономических, социальных и технологических аспектов региональной экономики и обосновании приоритетов научно-технологического развития региона и важнейших направлений его инновационного развития. Значение бизнеса заключается в преодолении проблемы невосприимчивости практического применения результатов научных исследований и технологических разработок, в устранении «боязни» преодоления синхронных затрат на исследование и внедрение прорывных технологий. Роль гражданского общества состоит в формировании в общественном сознании высокого природоохранного мышления и долгосрочной мотивации у субъектов экономической деятельности, в формировании благоприятных условий партнерства бизнеса с государством. Такая направленность исследований соответствует приоритетному направлению научно-технологического развития Российской Федерации: «Возможность эффективного ответа российского общества на большие вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий, социальных институтов на современном этапе глобального развития, в том числе применяя методы гуманитарных и социальных наук» [16]. Большие вызовы понимаются как совокупность экологических, социальных, экономических и технологических проблем и угроз, сложность и масштаб которых не могут быть решены или устранены только за счет увеличения материальных, финансовых и трудовых ресурсов.

При планировании на государственном уровне должны формироваться бюджеты для финансирования мероприятий, предусмотренных стратегией развития того или иного региона. Сделать это достаточно достоверно в масштабах каждого региона без использования результатов научно-исследовательских работ невозможно.



Рис. 2. Алгоритм процесса комплексной оценки продуктивности территории

Fig. 2. Algorithm for the comprehensive assessment process of territory productivity

Назрела необходимость принципиально нового подхода к решению проблемы сбалансированного развития отдельного региона при полном использовании его лесного ресурсного потенциала. Отсюда следует первоочередная задача — создание соответствующей методологии и на этой основе прикладных разработок в современной программно-цифровой среде. Все перечисленные задачи решать невозможно без научно-исследовательских разработок на базе цифровизации всех управленческих процессов.

Предлагаемая схема оценки продуктивности территории региона с учетом основных принципов рационального природопользования в целом показана на рис. 2 [17, 18].

Экологическую составляющую продуктивности территории в данной схеме (см. рис. 2) предлагается оценивать величиной кадастровой стоимости земель, поскольку существующие утвержденные методики их оценки предусматривают прямо пропорциональную зависимость от экологических факторов. Теория оценки кадастровой стоимости земель различных категорий постоянно находится в сфере внимания ведущих научных организаций и отдельных ученых как в РФ, так и за рубежом, что позволяет считать это

надежным инструментом объективности этого показателя. Однако здесь просматривается очень большая проблема — лесные земли в настоящее время выведены из сферы официальной государственной кадастровой оценки и все отдано на откуп индивидуальных оценщиков [19]. В то же время известные таблицы индикаторов устойчивого развития очень громоздки и не направлены на разработку оптимальной траектории устойчивого развития, выработку его стратегии и тактики для конкретных стран, регионов и других территорий [20–22].

Социальную продуктивность можно оценивать по показателю «индекса счастья» населения, теорию оценки которого начали разрабатывать за рубежом и достаточно широко апробировали там на практике [23]. Широко применяемый показатель качества жизни отражает только материальную сторону жизни человека, а не духовную составляющую, что крайне недостаточно. Показателен в этом смысле тот факт, что наибольшее удельное количество самоубийств на душу населения приходится именно на наиболее развитые в экономическом плане страны. В этом смысле лес всегда являлся мощным источником восстановления и пополнения духовных сил

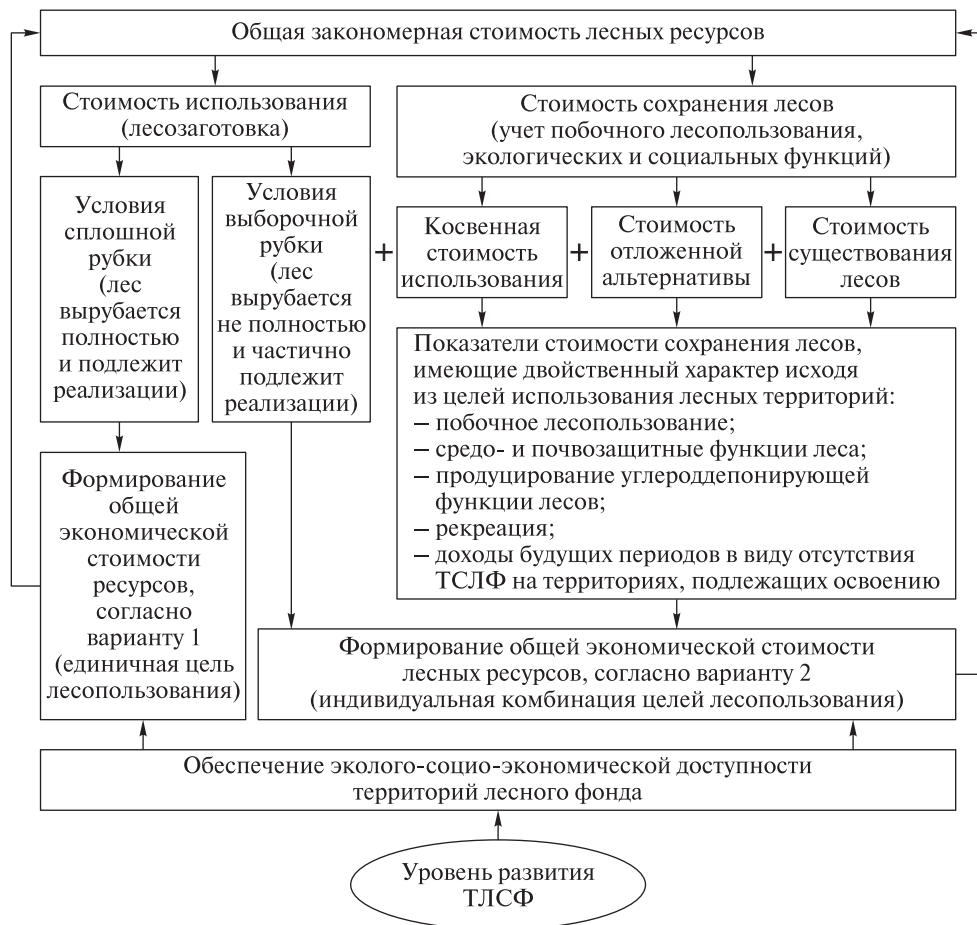


Рис. 3. Схема интегрального подхода к оценке лесного ресурсного потенциала с учетом уровня развития транспортной сети

Fig. 3. Scheme of the integral approach to determining the value of forest resource potential, taking into account the level of the transport network development

человека, наполненным голосами птиц, чистотой лесных ручьев, родников, рек и озер, воспетым во многих выдающихся произведениях искусства. В российской науке наиболее близким аналогом зарубежного показателя «индекса счастья» является «индекс социального благополучия», который может быть принят в данном случае [24].

Кроме того, в этом направлении актуально проведение дополнительных исследований, о чем заявлено в работе [4]. О.А. Пахомова и О.А. Дубровина в этой статье приводят обоснование необходимости развития социального потенциала территории, который, по их мнению, способен ускорить осуществление перехода к сбалансированному инновационному развитию региона.

Экономическую продуктивность достаточно объективно можно оценивать по показателю истинных сбережений, который апробирован на практике во многих странах с развитой рыночной экономикой [25].

В предлагаемой методологии еще один очень важный момент в оценке лесного ресурсного потенциала территории заключается в том, что его

величина во многом зависит от уровня развития транспортной сети, без учета которой реализовать все поставленные задачи невозможно [26–33]. На рис. 3 приведена схема формирования показателей лесного ресурсного потенциала с учетом уровня развития транспортной сети (ТЛСФ — транспортная сеть лесного фонда) [32–34]. Алгоритм оценки продуктивности территории по схеме (см. рис. 2) позволит определить главные тенденции ее развития на перспективу [18].

В плане решения задачи определения теоретического и практического инструментариев для реализации модели интеграции лесного ресурсного потенциала в сбалансированное развитие регионов важно отметить, что современный этап развития мировой экономики, как известно, характеризуется становлением и развитием 4-го промышленного уклада, основанного на глобальных цифровых изменениях и «умных» (SMART) технологиях.

SMART-технологии — это собирательное название для современных высоких технологий, в основе функционирования которых лежат

технологии «Интернета вещей», искусственного интеллекта, анализа больших данных (Big Data), облачных вычислений, киберфизических систем, отличительными характеристиками которых является высокая степень самоорганизации, самообучения, большое количество обратных связей. Технологические тенденции киберфизических систем, в свою очередь, связаны со следующими направлениями: большие данные; облачные и граничные вычисления; виртуальная и дополненная реальность; цифровые двойники; «Интернет вещей»; кибербезопасность и др. [35, 36]. Очевидно, что все это непосредственно влияет на развитие науки и практики и требует совершенно новых подходов к планированию больших систем, коей является система управления региона, и методов практической реализации результатов исследований.

**Определение задач и теоретического инструментария для реализации модели интеграции лесного ресурсного потенциала.** Для реализации предлагаемого эколого-социо-экономического проекта предстоит решить следующий комплекс задач:

– разработать методики эколого-социо-экономического анализа хозяйственного функционирования региона и оценки его лесного ресурсного потенциала;

– разработать имитационную модель хозяйственного функционирования региона в ее визуально-блочной концепции и современной программной среде;

– реализовать на базе интеллектуальных систем процедуру принятия управленческих решений по интеграции лесного ресурсного потенциала в сбалансированное развитие региона в условиях неопределенностей, в частности, интеллектуальных экспертных систем на нечеткой логике или искусственных нейронных сетей;

– отработать модели интеграции лесного ресурсного потенциала и отраслей региона в плане его стратегического развития и отладить прикладное программное обеспечение на наборах тестовых примеров и оценить их адекватность;

– запустить проект на конкретных регионах и решить для них конечную задачу определения объемов и структуры бюджетного финансирования;

– выполнить верификацию модели интеграции лесного ресурсного потенциала и отраслей экономики региона в плане его стратегического развития;

– выполнить апробацию проекта на базе конкретного региона.

В целом выполнение всего перечисленного комплекса задач позволит решить проблему интеграции лесного ресурсного потенциала в сба-

лансированное развитие многолесных регионов на современном уровне развития науки и техники.

**Оценка эффекта, применимости и масштабов внедрения результатов исследований.** Планируемые результаты имеют следующую практическую и научную значимость.

*Практическая значимость.*

1. Направленность предлагаемой концептуальной методологии интеграции лесного ресурсного потенциала в сбалансированное развитие многолесных районов на основе интегрального подхода на реализацию стратегических целей их инновационного развития.

2. Возможность использования органами власти при разработке планов и нормативов различных уровней сбалансированного развития территорий.

3. Выполнение процедуры принятия управленческих решений по интеграции лесного ресурсного потенциала в сбалансированное развитие региона в условиях неопределенностей по программам на базе интеллектуальных экспертных систем на нечеткой логике или искусственных нейронных сетей.

*Научная значимость.*

Модели оптимального взаимодействия лесного ресурсного потенциала и отраслей региона в плане его стратегического развития, позволяющие реализовать синергетический эффект взаимодействия в сложной системе. Предложенный концептуальный подход позволяет рассмотреть проблему системно, во взаимосвязи всех отраслей региона, с учетом включения ресурсного потенциала лесного фонда и всех затрат на освоение лесосырьевой базы. Решить проблему достаточно полно без разработки соответствующей методологии, использования нового математического аппарата, привлечения современных информационных технологий, в частности, Big Data, искусственного интеллекта, нейронных сетей, имитационного моделирования невозможно.

## Выводы

1. Рассмотрена актуальная проблема сбалансированного устойчивого развития регионов, располагающих большими лесными ресурсами. На основе сравнительного анализа эффективности использования российских и зарубежных лесных ресурсов показаны значительная недооценка продуктивности лесных земель на территории тех иных регионов РФ и эффективности использования их ресурсного потенциала по всему спектру его полезностей, следовательно, его вклада в ВВП страны. Основной недостаток существующих подходов к исследованию проблемы эффективности стратегического развития регионов заключается во фрагментарности решения проблемы,

но, между тем, рассматриваемые объекты представляют собой сложные большие системы и требуют междисциплинарного подхода при ее решении и более широкого охвата при исследованиях.

2. Разработаны концептуальные основы методологии интеграции лесного ресурсного потенциала в сбалансированное социо-эколого-экономическое развитие региона. Идея методологии основана на системном анализе взаимовлияния отдельных элементов региональных социально-экономических систем.

3. Предложены структурные модели оптимального взаимодействия лесного ресурсного потенциала и отраслей региона в плане его стратегического развития, позволяющие реализовать синергетический эффект взаимодействия в сложной системе на основе методов исследования больших систем и современных информационных технологий.

4. Практическая реализация предложенной методологии в виде прикладного программного обеспечения позволит использовать ее на всех уровнях государственного стратегического планирования развития территорий, располагающих большими лесными ресурсами.

## Список литературы


- [1] Стратегии развития лесного комплекса РФ до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.02. 2021 г. № 312-р. URL: <http://static.government.ru/media/files/...pdf> (дата обращения 06.12.2023).
- [2] Ускова Т.В. Управление устойчивым развитием региона. Вологда: Изд-во ИСЭРТ РАН, 2009. 355 с.
- [3] Мехренцев А.В., Бондаренко С.А., Атепалихина Е.А., Долженко Л.М., Прядилина Н.К., Стариков Е.Н., Шпак Н.А. Стратегическое управление социально-экономическим развитием территорий: методологические основы и прикладной инструментарий / под ред. А.В. Мехренцева. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2015. 253 с.
- [4] Пахомова О.А., Дубровина О.А. Социальный потенциал региона как фактор развития территории // Социально-экономическое развитие России: материалы Всерос. науч. конф., г. Чебоксары, 14 мая 2019 г. Чебоксары: Среда, 2019. С. 25–30.
- [5] Мирошников С.Н. Государственное управление социально-экономическим развитием субъектов Российской Федерации на основе системы стратегического планирования: автореф. дис. ... д-ра экон. наук. 08.00.05. М., 2020. 45 с.
- [6] Николаева Е.Е., Бабаев Б.Д. Хозяйственный механизм региональной социально-экономической системы: теоретический аспект // Теоретическая экономика, 2020. № 11. С. 11–22.
- [7] Токарева П.В., Доменко Ю.Ю. Стратегическое планирование социально-экономического развития региона: проблемы и перспективы развития // Московский экономический журнал, 2020. № 12. С. 129–138.
- [8] Кислая Т.Н. Теоретико-методологические подходы к управлению экономической безопасностью региона. Чебоксары: Среда, 2021. 152 с.
- [9] Федеральный закон от 28.06.2014 № 172-ФЗ (последняя редакция) «О стратегическом планировании в Российской Федерации». URL: <http://duma.gov.ru> (дата обращения 06.12.2023).
- [10] Семячков А.И., Логинов В.Г., Игнатъева М.Н., Душин А.В., Полянская И.Г. Институциональные аспекты сбалансированного природопользования / под ред. А.И. Семячкова. Екатеринбург: Изд-во Института экономики УрО РАН, 2017. 134 с.
- [11] Моисеев Н.А. Организация устойчивого пользования и управления лесами в рыночных условиях: первоочередные проблемы экономики лесного хозяйства // Лесное хозяйство, 2002. № 4. С. 2–4.
- [12] Бобылев С.Н. Вишнякова В.С., Комарова И.И., Шевчук А.В. «Зеленая» экономика. Новая парадигма развития страны / под ред. А.В. Шевчука. М.: Совет по изучению производительных сил, 2014. 248 с.
- [13] Прешкин Г.А. Нормативы оценки лесных благ. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2011. 319 с.
- [14] Лебедев Ю.В. Оценка лесных экосистем в экономике природопользования. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2011. 583 с.
- [15] Лебедев Ю.В. Теоретические основы экологического устойчивого развития территорий. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2015. 189 с.
- [16] Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации. Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 01.12. 2016 г. № 642. URL: <http://government.ru> (дата обращения 06.12.2023).
- [17] Реймерс Н.Ф. Природопользование: Словарь-справочник. М.: Мысль, 1990. 637 с.
- [18] Ковалев Р.Н., Побединский В.В., Кручинин И.Н. Междисциплинарный подход к вопросу о «живой» экономике и устойчивом развитии // Фундаментальные исследования, 2020. № 3. С. 136–141.
- [19] Постановление Правительства РФ от 8 апреля 2000 г. № 316 «Об утверждении Правил проведения государственной кадастровой оценки земель» (ред. 30.06.2010г.). URL: <http://pravo.gov.ru> (дата обращения 06.12.2023).
- [20] Критерии и индикаторы устойчивого управления лесами Российской Федерации. Утверждены приказом Федеральной службы лесного хозяйства России от 05.02.1996 г. № 21.
- [21] Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies. Third Edition // Economic & Social Affairs. New York: United Nations, 2007, 93 p.
- [22] Жарников В.Б., Гагарин А.И., Лебедева Т.А. О приоритете индикаторов устойчивого развития территорий // Вестник СГГА, 2014. Вып. 4 (28). С. 57–65.
- [23] Di Tella R., MacCulloch R.J., Oswald A.J. The Macroeconomics of Happiness // The Review of Economics and Statistics, 2003, v. 85, no. 4, pp. 809–827.
- [24] Кислицына О.А. Национальный индекс качества жизни (благополучия) как инструмент мониторинга эффективности социально-экономической политики в России // Журнал исследований социальной политики, 2017. Т. 15. № 4 С. 547–556.
- [25] Медведева О.Е. Оценка земли и природная рента // Имущественные отношения в Российской Федерации. М.: Изд-во Международной академии оценки и консалтинга, 2004. № 5 (32). С. 67–77.
- [26] Ковалев Р.Н., Еналеева-Бандура И.М. Метод эффективного планирования суммарных затрат на создание и развитие лесотранспортных систем с учетом принципов устойчивого развития территорий // Хвойные бореальной зоны, 2019. Т. XXXVII. № 6. С. 455–459.



- [27] Шувалова В.А., Бровкин С.А., Еналеева-Бандура И.М. Анализ методов повышения эффективности использования подвижного состава на вывозке древесного сырья // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы XIX Междунар. науч.-техн. конф. / под ред. С.М. Хамитовой. Вологда: Изд-во Вологодского государственного университета, 2021. С. 371–374.
- [28] Ковалев Р.Н., Еналеева-Бандура И.М., Баранов А.Н. Математическая модель оценки эффективности лесопользования с учетом уровня развития транспортной сети на основе комплексного подхода // Системы. Методы. Технологии, 2020. № 4(48). С. 151–155.
- [29] Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Samtsov V.V., Nikitin V.V., Denisenko V.V., Boltnev D.E. Theoretical background of road landscape zoning // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Engineering Studies and Cooperation in Global Agricultural Production, 2021, t. 659, p. 012011.
- [30] Ковалев Р.Н., Еналеева-Бандура И.М., Баранов А.Н., Григорьева О.И., Григорьев И.В. Математическая модель определения оптимального месторасположения лесных пожарно-химических станций с учетом уровня развития транспортных сетей на территории лесного фонда // Resources and Technology, 2021. Т. 18. № 4. С. 77–92.
- [31] Лыщик П.А., Бавбель Е.И., Науменко А.И. Основные принципы развития сети лесных автомобильных дорог // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов, 2020. № 1 (228). С. 125–130.
- [32] Васильева Е.Ф., Токмашев А.А., Давыдова А.Л. Интегральный подход к определению показателя общей экономической стоимости лесных ресурсов с учетом уровня развития транспортной сети // Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса: материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 2–4 февраля 2021 г. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2021. С. 598–599.
- [33] Никитин В.В., Скрыпников А.В., Денисенко В.В., Володина Ю.Ю., Бойков П.А., Картавец О.Л. Математическая модель сети лесовозных автомобильных дорог на основе оптимальных параметров // Теория и практика инновационных технологий в АПК: материалы национальной науч.-практ. конф., Воронеж, 19–21 апреля 2022 года. Воронеж: Изд-во Воронежского государственного аграрного университета имени Императора Петра I, 2022. С. 120–134.
- [34] Safonova Yu.A., Skrypnikov A.V., Kovaleva E.N., Lemeshkin A.V., Machtakov S.G. Evaluation of the effect of fermentation conditions on the functional and technological characteristics of the semifinished meat product // Int. conf. on production and processing of agricultural raw materials (P2ARM 2021), Voronezh, 21–24 September, 2021. IOP Publishing Ltd, 2022, t. 1052, p. 012049.
- [35] Цифровое производство. Методы, экосистемы, технологии. URL: [http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/11\\_november/17/tsifrovoe\\_proizvodstvo\\_112017.pdf](http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/11_november/17/tsifrovoe_proizvodstvo_112017.pdf) (дата обращения 06.12.2023).
- [36] Цифровое производство. Методы, экосистемы, технологии. Гл. 2. Новая парадигма цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения (дополненная версия). URL: <http://fea.ru/news/6721> (дата обращения 06.12.2023).

## Сведения об авторах

**Ковалев Рудольф Николаевич** — д-р техн. наук, профессор кафедры интеллектуальных систем, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», [kovalevrn@m.usfeu.ru](mailto:kovalevrn@m.usfeu.ru)

**Побединский Владимир Викторович**  — д-р техн. наук, профессор кафедры технологии и оборудования лесопромышленных производств, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», [pobedinskyvv@mail.ru](mailto:pobedinskyvv@mail.ru)

**Иовлев Григорий Александрович** — канд. эконом. наук, доцент, заведующий кафедрой сервиса транспортных и технологических машин и оборудования АПК, ФГБОУ ВО «Уральский государственный аграрный университет», [gri-iovlev@yandex.ru](mailto:gri-iovlev@yandex.ru)

Поступила в редакцию 19.05.2023.

Одобрено после рецензирования 19.02.2024.

Принята к публикации 05.04.2024.

## BALANCED DEVELOPMENT OF REGION AND FOREST RESOURCE POTENTIAL

R.N. Kovalev<sup>1,2</sup>, V.V. Pobedinsky<sup>1,2</sup>✉, G.A. Iovlev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ural State Forestry University, 37, Siberian tract, 620100, Yekaterinburg, Sverdlovsk reg., Russia

<sup>2</sup>Ural State Agrarian University, 42, Karl Liebknecht st., 620075, Yekaterinburg, Sverdlovsk reg., Russia

pobedinskyvv@mail.ru

The topical issue of balanced sustainable development of regions, primarily those with large forest resources, is considered. Based on the comparative analysis of the efficiency of Russian and foreign forest resources use, the significant underestimation of forest land productivity on the territory of a particular region of the Russian Federation and the efficiency of their resource potential use across the entire spectrum of its utility, hence, its contribution to the country's GDP is shown. As one of the main reasons for this situation is identified as methodological, so the article outlines the conceptual framework for the integration of forest resource potential in the balanced socio-ecological-economic development of the region. In scientific terms, based on generalizations of previous research results and the latest scientific achievements, a new methodology based on modern approaches to large systems research and information technology is outlined. Presentation of the results of practical implementation of the proposed methodology in the form of application software is recommended to be used at all required levels of state strategic planning.

**Keywords:** balanced development, forest regions, forest lands, forest resource potential, integration, Territory productivity index

**Suggested citation:** Kovalev R.N., Pobedinsky V.V., Iovlev G.A. *Sbalansirovannoe razvitie regiona i lesnoy resursnyy potentsial* [Balanced development of region and forest resource potential]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 3, pp. 26–36. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-26-36

### References

- [1] *Strategii razvitiya lesnogo kompleksa RF do 2030 goda. Utverzhdena rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 11.02. 2021 g. № 312-r* [Strategies for the development of the forestry complex of the Russian Federation until 2030. Approved by order of the Government of the Russian Federation dated 11.02.2021, no. 312-r]. Available at: <http://static.government.ru/media/files/...pdf> (accessed 06.12.2023).
- [2] Uskova T.V. *Upravlenie ustoychivym razvitiem regiona* [Management of sustainable development of the region]. Vologda: ISEDT RAS, 2009, 355 p.
- [3] Mekhrentsev A.V., Bondarenko S.A., Atepalikhina E.A., Dolzhenko L.M., Pryadilina N.K., Starikov E.N., Shpak N.A. *Strategicheskoe upravlenie sotsial'no-ekonomicheskim razvitiem territoriy: metodologicheskie osnovy i prikladnoy instrumentariy* [Strategic management of socio-economic development of territories: methodological foundations and applied tools]. Ed. A.V. Mehrentsev. Ekaterinburg: UGFLTU, 2015, 253 p.
- [4] Pakhomova O.A., Dubrovina O.A. *Sotsial'nyy potentsial regiona kak faktor razvitiya territorii* [Social potential of the region as a factor in the development of the territory]. *Sotsial'no-ekonomicheskoe razvitie Rossii: materialy Vseros. nauch. konf. [Socio-economic development of Russia: materials of the All-Russian Federation. scientific Conf.]*, Cheboksary, May 14, 2019. Cheboksary: Sreda Publishing House, 2019, pp. 25-30.
- [5] Miroshnikov S.N. *Gosudarstvennoe upravlenie sotsial'no-ekonomicheskim razvitiem sub'ektov Rossiyskoy Federatsii na osnove sistemy strategicheskogo planirovaniya* [State management of socio-economic development of the constituent entities of the Russian Federation based on the strategic planning system: abstract of thesis]. Dis. Dr. Sci. (Economics), 08.00.05. Moscow, 2020, 45 p.
- [6] Nikolaeva E.E., Babaev B.D. *Khozyaystvennyy mekhanizm regional'noy sotsial'no-ekonomicheskoy sistemy: teoreticheskiy aspekt* [Economic mechanism of the regional socio-economic system: theoretical aspect]. *Teoreticheskaya ekonomika [Theoretical Economics]*, 2020, no. 11, pp. 11-22.
- [7] Tokareva P.V., Domenko Yu.Yu. *Strategicheskoe planirovanie sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya regiona: problemy i perspektivy razvitiya* [Strategic planning of the socio-economic development of the region: problems and development prospects]. *Moskovskiy ekonomicheskiy zhurnal [Moscow Economic Journal]*, 2020, no. 12, pp. 129-138.
- [8] Kislaya T.N. *Teoretiko-metodologicheskie podkhody k upravleniyu ekonomicheskoy bezopasnost'yu regiona* [Theoretical and methodological approaches to managing the economic security of the region]. Cheboksary: Publishing House «Sreda», 2021, 152 p.
- [9] *Federal'nyy zakon ot 28.06.2014 N 172-FZ (poslednyaya redaktsiya) «O strategicheskoy planirovaniy v Rossiyskoy Federatsii»* [Federal Law of June 28, 2014 N 172-FZ (latest edition) «On strategic planning in the Russian Federation»]. Available at: <http://duma.gov.ru> (accessed 06.12.2023).
- [10] Semyachkov A.I., Loginov V.G., Ignat'eva M.N., Dushin A.V., Polyanskaya I.G. *Institutsional'nye aspekty sbalansirovannogo prirodopol'zovaniya* [Institutional aspects of balanced environmental management]. Ed. A.I. Semyachkova. Ekaterinburg: Institut ekonomiki UrO RAN [Institute of Economics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences], 2017, 134 p.
- [11] Moiseev N.A. *Organizatsiya ustoychivogo pol'zovaniya i upravleniya lesami v rynochnyykh usloviyakh: pervoocherednyye problemy ekonomiki lesnogo khozyaystva* [Organization of sustainable use and management of forests in market conditions: priority problems of forestry economics]. *Lesnoe khozyaystvo [Forestry]*, 2002, no. 4, pp. 2-4.
- [12] Bobylev S.N., Vishnyakova V.S., Komarova I.I., Shevchuk A.V. *«Zelenaya» ekonomika. Novaya paradigma razvitiya strany* [«Green» economy. New paradigm for the country's development]. Ed. A.V. Shevchuk. Moscow: Sovet po izucheniyy proizvoditel'nykh sil (SOPS) [Council for the Study of Productive Forces (SOPS)], 2014, 248 p.

- [13] Preshkin G.A. *Normativy otsenki lesnykh blag* [Standards for assessing forest benefits]. Ekaterinburg: UGFLTU, 2011, 319 p.
- [14] Lebedev Yu.V. *Otsenka lesnykh ekosistem v ekonomike prirodnopol'zovaniya* [Assessment of forest ecosystems in environmental economics]. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2011, 583 p.
- [15] Lebedev Yu.V. *Teoreticheskie osnovy ekologicheskogo ustoychivogo razvitiya territoriy* [Theoretical foundations of environmental sustainable development of territories]. Ekaterinburg: USGU, 2015, 189 p.
- [16] *Strategiya nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii. Utverzhdena Ukazom Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 01.12. 2016 g. № 642* [Strategy for scientific and technological development of the Russian Federation. Approved by Decree of the President of the Russian Federation dated 01.12. 2016 no. 642]. Available at: <http://government.ru> (accessed 06.12.2023).
- [17] Reymers N.F. *Prirodnopol'zovanie: Slovar'-spravochnik* [Nature management: Dictionary-reference book]. Moscow: Mysl', 1990, 637 p.
- [18] Kovalev R.N., Pobedinskiy V.V., Kruchinin I.N. *Mezhdistiplinarnyy podkhod k voprosu o «zhivoy» ekonomike i ustoychivom razvitiy* [Interdisciplinary approach to the issue of «living» economy and sustainable development]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research], 2020, no. 3, pp. 136-141.
- [19] *Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 8 aprelya 2000 g. № 316 «Ob utverzhdenii Pravil provedeniya gosudarstvennoy kadastrvoy otsenki zemel'» (red. 30.06.2010g.)* [Decree of the Government of the Russian Federation of April 8, 2000 no. 316 «On approval of the Rules for the state cadastral valuation of land» (as amended on June 30, 2010)]. Available at: <http://pravo.gov.ru> (accessed 06.12.2023).
- [20] *Kriterii i indikatory ustoychivogo upravleniya lesami Rossiyskoy Federatsii. Utverzhdeny prikazom Federal'noy sluzhby lesnogo khozyaystva Rossii ot 05.02. 1996 g. № 21* [Criteria and indicators for sustainable forest management in the Russian Federation. Approved by order of the Federal Forestry Service of Russia dated 05.02. 1996 no. 21].
- [21] *Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies. Third Edition. Economic & Social Affairs. New York: United Nations, 2007, 93 p.*
- [22] Zharnikov V.B., Gagarin A.I., Lebedeva T.A. *O prioritete indikatorov ustoychivogo razvitiya territoriy* [On the priority of indicators for sustainable development of territories]. *Vestnik SSGA* [Bulletin of the SSGA], 2014, v. 4 (28), pp. 57-65.
- [23] Di Tella R., MacCulloch R.J., Oswald A.J. *The Macroeconomics of Happiness. The Review of Economics and Statistics, 2003, v. 85, no. 4, pp. 809-827.*
- [24] Kislitsyna O.A. *Natsional'nyy indeks kachestva zhizni (blagopoluchiya) kak instrument monitoringa effektivnosti sotsial'no-ekonomicheskoy politiki v Rossii* [National index of quality of life (well-being) as a tool for monitoring the effectiveness of socio-economic policy in Russia]. *Zhurnal issledovaniy sotsial'noy politiki* [J. of Social Policy Research], 2017, v. 15, no. 4, pp. 547-556.
- [25] Medvedeva O.E. *Otsenka zemli i prirodnyaya renta* [Land valuation and natural rent]. *Imushchestvennye otnosheniya v Rossiyskoy Federatsii* [Property relations in the Russian Federation]. Moscow: International Academy of Assessment and Consulting, 2004, no. 5 (32), pp. 67-77.
- [26] Kovalev R.N., Enaleeva-Bandura I.M. *Metod effektivnogo planirovaniya summarnykh zatrat na sozhdanie i razvitie lesotransportnykh sistem s uchetom printsipov ustoychivogo razvitiya territoriy* [Method for effective planning of total costs for the creation and development of forest transport systems, taking into account the principles of sustainable development of territories]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the boreal zone], 2019, t. XXXVII, no. 6, pp. 455-459.
- [27] Shuvalova V.A., Brovkin S.A., Enaleeva-Bandura I.M. *Analiz metodov povysheniya effektivnosti ispol'zovaniya podvizhnogo sostava na vyvozke drevsnogo syr'ya* [Analysis of methods for increasing the efficiency of using rolling stock for the removal of wood raw materials]. *Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa: mater. XIX Mezhdunar. nauch.-tekhn. konferentsii* [Actual problems of development of the forestry complex: material. XIX International scientific-technical conference]. Ed. S.M. Khamitova. Vologda: Vologda State University, 2021, pp. 371-374.
- [28] Kovalev R.N., Enaleeva-Bandura I.M., Baranov A.N. *Matematicheskaya model' otsenki effektivnosti lesopol'zovaniya s uchetom urovnya razvitiya transportnoy seti na osnove kompleksnogo podkhoda* [Mathematical model for assessing the efficiency of forest management taking into account the level of development of the transport network based on an integrated approach]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2020, no. 4(48), pp. 151-155.
- [29] Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Samtsov V.V., Nikitin V.V., Denisenko V.V., Boltnev D.E. *Theoretical background of road landscape zoning. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Engineering Studies and Cooperation in Global Agricultural Production, 2021, t. 659, p. 012011.*
- [30] Kovalev R.N., Enaleeva-Bandura I.M., Baranov A.N., Grigor'eva O.I., Grigor'ev I.V. *Matematicheskaya model' opredeleniya optimal'nogo mestoraspolzheniya lesnykh pozharo-khimicheskikh stantsiy s uchetom urovnya razvitiya transportnykh setey na territorii lesnogo fonda* [Mathematical model for determining the optimal location of forest fire-chemical stations taking into account the level of development of transport networks in the forest fund]. *Resources and Technology* [Resources and Technology], 2021, v. 18, no. 4, pp. 77-92.
- [31] Lyshchik P.A., Bavel' E.I., Naumenko A.I. *Osnovnye printsipy razvitiya seti lesnykh avtomobil'nykh dorog* [Basic principles for the development of a network of forest roads]. *Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe khozyaystvo, prirodnopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyaemykh resursov* [Proceedings of BSTU, Series 1: Forestry, environmental management and processing of renewable resources], 2020, no. 1 (228), pp. 125-130.
- [32] Vasil'eva E.F., Tokmashev A.A., Davydova A.L. *Integral'nyy podkhod k opredeleniyu pokazatelya obshchey ekonomicheskoy stoimosti lesnykh resursov s uchetom urovnya razvitiya transportnoy seti* [An integrated approach to determining the indicator of the total economic value of forest resources, taking into account the level of development of the transport network]. *Effektivnyy otvet na sovremennyye vyzovy s uchetom vzaimodeystviya cheloveka i prirody, cheloveka i tekhnologii: sotsial'no-ekonomicheskie i ekologicheskie problemy lesnogo kompleksa: mater. XIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Effective response to modern challenges, taking into account the interaction of man and nature, man and technology: socio-economic and environmental problems of the forestry complex: material. XIII International Scientific and Technical Conference], Ekaterinburg, February 2-4, 2021. Ekaterinburg: UGFLTU, 2021, pp. 598-599.

- [33] Nikitin V.V., Skrypnikov A.V., Denisenko V.V., Volodina Yu.Yu., Boykov P.A., Kartavtsev O.L. *Matematicheskaya model' seti lesovoznykh avtomobil'nykh dorog na osnove optimal'nykh parametrov* [Mathematical model of a network of logging roads based on optimal parameters]. *Teoriya i praktika innovatsionnykh tekhnologiy v APK: mater. natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Theory and practice of innovative technologies in the agro-industrial complex: material. national scientific and practical conference], Voronezh, April 19–21, 2022. Voronezh: Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I, 2022, pp. 120-134.
- [34] Safonova Yu.A., Skrypnikov A.V., Kovaleva E.N., Lemeshkin A.V., Machtakov S.G. Evaluation of the effect of fermentation conditions on the functional and technological characteristics of the semifinished meat product. International conference on production and processing of agricultural raw materials (P2ARM 2021), Voronezh, 21-24 September 2021. IOP Publishing Ltd, 2022, t. 1052, p. 012049.
- [35] *Tsifrovoe proizvodstvo. Metody, ekosistemy, tekhnologii* [Digital production. Methods, ecosystems, technologies]. Available at: [http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/11\\_november/17/tsifrovoe\\_proizvodstvo\\_112017.pdf](http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/11_november/17/tsifrovoe_proizvodstvo_112017.pdf) (accessed 06.12.2023).
- [36] *Tsifrovoe proizvodstvo. Metody, ekosistemy, tekhnologii. Gl. 2. Novaya paradigma tsifrovogo proektirovaniya i modelirovaniya global'no konkurentosposobnoy produktsii novogo pokoleniya (dopolnennaya versiya)* [Digital production. Methods, ecosystems, technologies. Ch. 2. A new paradigm for digital design and modeling of globally competitive products of a new generation (added version)]. Available at: <http://fea.ru/news/6721> (accessed 06.12.2023).

## Authors' information

**Kovalev Rudolf Nikolaevich** — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Department of Intelligent systems, Ural State Forest Engineering University, [kovalevrn@m.usfeu.ru](mailto:kovalevrn@m.usfeu.ru)

**Pobedinskiy Vladimir Viktorovich** — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Department of Technology and Equipment for Timber Industry, Ural State Forest Engineering University, [pobedinskyvv@mail.ru](mailto:pobedinskyvv@mail.ru)

**Iovlev Grigory Aleksandrovich** — Cand. Sci. (Economics), Associate Professor, Head of the Department of Service of transport and technological machines and equipment of the Agro-industrial complex, Ural State Agrarian University, [gri-iovlev@yandex.ru](mailto:gri-iovlev@yandex.ru)

Received 19.05.2023.

Approved after review 19.02.2024.

Accepted for publication 05.04.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article  
The authors declare that there is no conflict of interest

## СОПРЯЖЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПРИЗНАКОВ ЖЕНСКОЙ ГЕНЕРАТИВНОЙ СИСТЕМЫ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (*PINUS SYLVESTRIS* L.) В УСЛОВИЯХ МАГНЕЗИТОВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

П.Е. Мохначев✉, С.Г. Махнева, С.Л. Менщиков, Н.А. Поспелова

ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук», Россия, 620144, г. Екатеринбург,  
ул. 8 Марта, д. 202а

mohnachev74@mail.ru

Проведено исследование сопряженной изменчивости признаков женской генеративной системы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях аэротехногенного загрязнения. Выявлены признаки с устойчивой связью и изменяющихся под воздействием аэротехногенного загрязнения. Установлено что, взаимосвязь признаков, характеризующих размеры и массу шишек, жестко генетически детерминирована и не нарушается в условиях сильного уровня загрязнения. Семенная продуктивность древостоев сосны вне зависимости от условий произрастания более тесно связана с показателями выживаемости семян в гаметофитный период, чем в период эмбрионального развития. Показано, что в условиях сильного загрязнения связь выживаемости семян в 1-й вегетационный и эмбриональный периоды отрицательная, что может свидетельствовать об эффективной элиминации аномальных гаметофитов и освобождение древостоя от них в условиях загрязнения. Кроме того, условия сильного загрязнения «способствовали» выработки стратегии деревьев по формированию мелких семян с высокими посевными показателями и качества, развиваемых из них проростков — только в данных условиях произрастания при снижении массы семян достоверно увеличиваются показатели энергии прорастания и всхожести и морфометрические показатели проростков.

**Ключевые слова:** сопряженная изменчивость, генеративная система, качество семян, сосна обыкновенная, аэротехногенное загрязнение

**Ссылка для цитирования:** Мохначев П.Е., Махнева С.Г., Менщиков С.Л., Поспелова Н.А. Сопряженная изменчивость признаков женской генеративной системы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях магнетитового загрязнения // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 3. С. 37–47.

DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-37-47

Изучение изменчивости количественных и функциональных признаков в природных популяциях — одно из основных направлений популяционно-биологических исследований. Фундаментальную основу адаптации животных и растений составляют исходная гетерогенность и функциональная разнокачественность особей в популяции [1–3]. У живых организмов уровень изменчивости количественных и функциональных признаков тесно связан с условиями обитания [2, 4] и поэтому он может быть использован для оценки этих условий. Структура взаимосвязей многих количественных признаков отражает внутренние механизмы организма, которые лежат в основе его устойчивого развития [5–8]. Внешние факторы, в том числе аэротехногенное загрязнение, обуславливают изменение сложившихся взаимосвязей. Воздействие аэрополлютантов на репродуктивную систему живых организмов может привести к изменению структуры взаимосвязей всего комплекса количественных и функциональных признаков [4, 9–17].

### Цель работы

Цель работы — раскрыть структуру связей репродуктивных признаков сосновых насаждений в зависимости от загрязнения выбросами магнетитового производства.

### Материалы и методы

Женскую генеративную систему сосны обыкновенной исследовали на опытных участках (ОУ), расположенных в зоне сильного магнетитового загрязнения (ОУ-2) и в фоновых (контрольных) условиях (ОУ-К). Опытные участки представлены лесными культурами сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), лиственницы Сукачева (*Larix Sukaczewii* Dyl.) и березы повислой (*Betula pendula* Roth), созданными в 1980–1983 гг. рядовой посадкой в области загрязнения окружающей среды аэропромвыбросами с комбината «Магнетит» (рис. 1) и в фоновых условиях. Лесные культуры закладывались двухлетними отборными саженцами, выращенными в лесном питомнике на базе Саткинского лесхоза из семян местного происхождения [18, 19]. Культуры закладывали научные сотрудники Уральской лесной опытной станции Всесоюзного научно-исследовательского



Рис. 1. Комбинат «Мagneзит»  
Fig. 1. «Magnezit» integrated plant



Рис. 2. Культуры сосны обыкновенной в фоновых условиях  
Fig. 2. Scots pine in background conditions

института лесного хозяйства и механизации (в настоящее время — отдел Лесоведения Ботанического сада УрО РАН) С.Л. Меншиков и Т.Б. Сродных под руководством Н.А. Луганского и Г.Г. Терехова для изучения пригодности почв и возможности лесовосстановления в градиенте магнетитового загрязнения. На данных опытных участках на протяжении уже более 40 лет проводятся комплексные исследования влияния

магнетитового загрязнения на компоненты лесных насаждений [20–24].

**Характеристика опытных участков.** Опытный участок в фоновых условиях ОУ-К расположен с заветренной стороны в юго-западном направлении в 25 км от источника выбросов вне зоны загрязнения на средней части склона западной экспозиции при крутизне склона 3°: тип почвы — горная серая лесная среднеоподзоленная



Рис. 3. Культуры сосны обыкновенной в зоне сильного загрязнения  
Fig. 3. Scots pine in the zone of heavy pollution

среднесуглинистая; тип леса — сосняк ягодниковый [18, 19]. На момент исследования культуры сосны обыкновенной представляли собой сомкнутый древостой (рис. 2), возрастом 35 лет.

Опытный участок ОУ-2 характеризуется высокой степенью загрязнения, расположен на расстоянии 1 км в северо-восточном направлении от источника поллютантов на склоне южной экспозиции в его средней части при крутизне склона 8...10°: тип почвы ОУ-2 — горная серая лесная сильнооподзоленная, легкосуглинистая, каменистая; тип леса — сосняк ягодниковый. На момент исследования сосна обыкновенная произрастала небольшими куртинами (рис. 3). Возраст деревьев 35 лет.

Современный уровень загрязнения ОУ-2 обусловлен высокими значениями рН, повышенным содержанием взвешенных веществ, некоторых макроэлементов и тяжелых металлов, в частности, в снеговой воде и почве, по сравнению с ОУ-К [25–28] (табл. 1).

На опытных участках была изучена относительная численность семеносящих деревьев, подсчитано количество шишек на них, отобрано и промаркировано 25 семеносящих деревьев, со средней и верхней частей их крон собрано по 50...100 шишек, на некоторых деревьях все имеющиеся шишки, но не менее 20 шт. Отобранные шишки (индивидуально для каждого дерева) тщательно перемешивали и по принципу случайной выборки отбирали по 20...40 шт. для анализа. В каждой шишке исследовали 35 количественных и функциональных признаков (табл. 2).

Т а б л и ц а 1

**Характеристика загрязнения снеговой воды на опытных участках**  
**Characteristics of snow melt pollution in the trial plots**

Показатель	ОУ-2	ОУ-К
рН	10,3 ± 0,02	7,4 ± 0,09
Масса взвешенного вещества, г/м <sup>2</sup>	29,51 ± 1,15	0,96 ± 0,15
Элементный состав, мг/м <sup>2</sup>		
Ca <sup>2+</sup>	576,55 ± 62,4	162,29 ± 17,1
Mg <sup>2+</sup>	7202,99 ± 1179,3	208,15 ± 24,5
K <sup>+</sup>	57,01 ± 14,4	4,79 ± 1,4
Na <sup>+</sup>	233,01 ± 37,0	91,74 ± 14,8
Fe	2,41 ± 0,56	2,27 ± 0,72
Mn	0,21 ± 0,07	0,90 ± 0,17
Zn	0,34 ± 0,08	0,80 ± 0,21
Cu	0,27 ± 0,07	0,20 ± 0,05
Ni	0,12 ± 0,02	0,04 ± 0,015

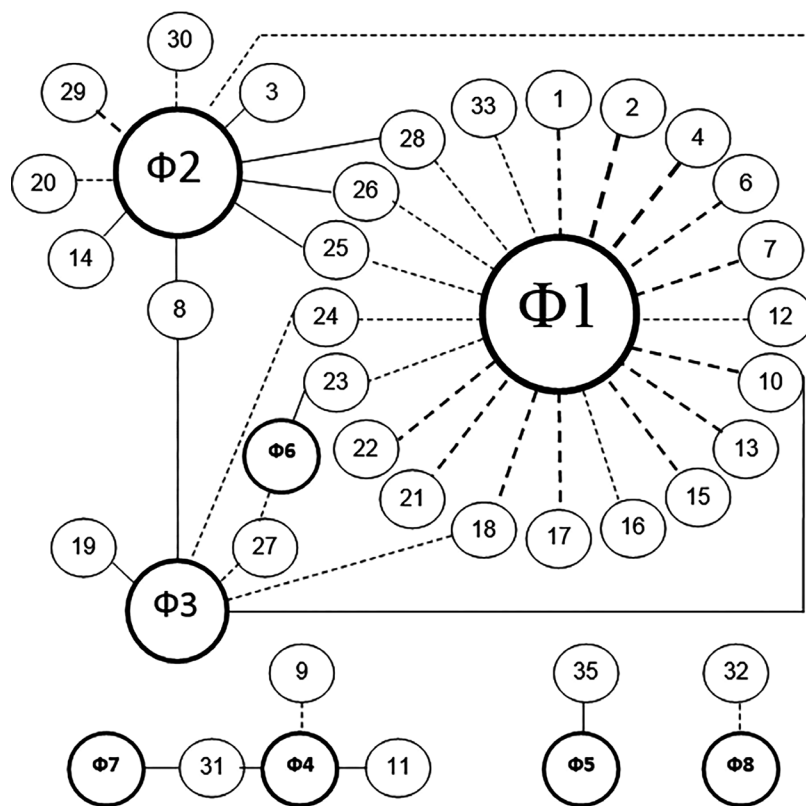
Все линейные признаки элементов шишек измеряли с помощью лабораторного штангенциркуля с точностью до 0,01 см. Индекс формы шишек, семенных чешуй, щитков и крылаток рассчитывали как отношение ширины к длине. Строение поверхности семенной чешуи, или форму апофиза, оценивали по шкале, предложенной С.А. Мамаевым [4].

Для подсчета семян, фертильных и стерильных семенных чешуй каждую шишку разрушали механическим путем. Для этого у шишки высверливали ось и разбирали на чешуи, начиная с базальных.

**Изученные количественные и функциональные признаки  
женской генеративной системы сосны обыкновенной**  
Studied quantitative and functional traits of the Scots pine tree female generative system

Номер признака	Наименование признака	ОУ-2	ОУ-К
1	Длина шишки, мм	3,57 ± 0,12	3,82 ± 0,10
2	Ширина шишки, мм	1,78 ± 0,05	1,90 ± 0,05
3	Форма шишки (2-й / 1-й признаки)	0,51 ± 0,01	0,50 ± 0,01
4	Масса шишки, грамм	4,90 ± 0,31	5,65 ± 0,42
5	Форма апофиза семенных чешуй [4]	3,09 ± 0,19	2,60 ± 0,23
6	Длина семенной чешуи в средней части шишки, мм	1,89 ± 0,05	2,00 ± 0,04
7	Ширина семенной чешуи в средней части шишки, мм	0,80 ± 0,02	0,86 ± 0,03
8	Форма семенной чешуи (7-й / 6-й признак)	0,43 ± 0,01	0,43 ± 0,01
9	Высота щитка в средней части шишки, мм	0,83 ± 0,02	0,85 ± 0,01
10	Ширина щитка в средней части шишки, мм	0,70 ± 0,01	0,69 ± 0,02
11	Форма щитка (10-й / 9-й признаки)	0,85 ± 0,02	0,82 ± 0,02
12	Длина крылатки в средней части шишки, мм	1,20 ± 0,04	1,23 ± 0,04
13	Ширина крылатки в средней части шишки, мм	0,37 ± 0,01	0,40 ± 0,02
14	Форма крылатки (13-й / 12-й признаки)	0,31 ± 0,01	0,33 ± 0,01
15	Число семенных чешуй, шт.	65,35 ± 1,74	64,51 ± 1,95
16	Число стерильных семенных чешуй, шт.	48,64 ± 1,37	46,89 ± 1,38
17	Число семяпочек потенциально фертильных, шт.	33,43 ± 1,09	35,25 ± 1,40
18	Число семяпочек, доживших до начала 2-й вегетации (число опыленных семяпочек) (20-й + 21-й признак), шт.	22,16 ± 1,06	25,37 ± 1,69
19	Число семяпочек, погибших в 1-й вегетационный период (число неопыленных семяпочек) (17-й – 18-й признаки), шт.	11,27 ± 0,45	9,88 ± 0,82
20	Число семяпочек, погибших во 2-й вегетационный период (число неоплодотворенных семяпочек), шт.	4,52 ± 0,87	5,24 ± 0,97
21	Общее число семян (22-й + 23-й признак) (число оплодотворенных семяпочек), шт.	17,64 ± 1,29	20,13 ± 1,67
22	Число полнозернистых семян, шт.	15,14 ± 1,1	16,58 ± 1,46
23	Число пустых семян, шт.	2,49 ± 0,42	3,55 ± 0,45
24	Выживаемость семяпочек в 1-й вегетационный период (18-й / 17-й признаки), %	64,61 ± 1,82	70,69 ± 2,94
25	Выживаемость семяпочек во 2-й вегетационный период (21-й / 18-й признаки), %	78,69 ± 3,8	78,14 ± 3,96
26	Выживаемость семяпочек за весь гаметофитный период (21-й / 17-й признаки), %	51,09 ± 2,96	55,86 ± 3,56
27	Выживаемость семяпочек в эмбриональный период (22-й / 21-й признак) (доля выполненных семян), %	86,56 ± 1,63	81,93 ± 2,07
28	Общая выживаемость семяпочек за гаметофитный и эмбриональный периоды (22-й / 17-й признаки), %	44,58	46,06
29	Масса 1000 шт. семян, г	5,41 ± 0,23	6,31 ± 0,20
30	Энергия прорастания семян, %	87,29 ± 2,48	85,50 ± 2,68
31	Абсолютная всхожесть семян, %	91,74 ± 1,91	90,67 ± 1,67
32	Доля проростков, имеющих семядоли на момент определения всхожести, %	75,84 ± 3,73	64,37 ± 6,35
33	Длина корешка проростков с семядолями, мм	14,44 ± 0,78	15,60 ± 1,08
34	Длина гипокотеля проростков с семядолями, мм	28,49 ± 0,56	31,39 ± 0,79
35	Число семядолей, шт.	5,58 ± 0,07	5,80 ± 0,07





**Рис. 4.** Факторная структура признаков женской генеративной системы сосны обыкновенной в фоновых условиях (здесь и далее, номер признаков см. табл. 2): — положительная связь; ---- отрицательная связь; ----  $0,7 > r > 0,5$ ; ----  $0,9 > r > 0,7$ ; -----  $r > 0,9$

**Fig. 4.** Factor structure of Scots pine female generative system traits under background conditions (hereinafter, trait number see Table 2): — positive relationship; ---- negative relationship; ----  $0,7 > r > 0,5$ ; ----  $0,9 > r > 0,7$ ; -----  $r > 0,9$

Начало фертильного яруса фиксировали по появлению семенных чешуй с признаками развития семяпочек на первом и втором году: пустые и полные семена, недоразвитые семена (отделяющиеся или неотделяющиеся от семенной чешуи) размером более 1 мм. Удвоенное число фертильных семенных чешуй соответствовало исходному числу потенциально фертильных семяпочек [29–31]. По сумме пустых и полных семян определяли число оплодотворенных семяпочек. Число пустых семян соответствовало числу семяпочек, погибших в эмбриональный период развития. Число мелких недоразвитых семян свидетельствовало о количестве семяпочек, погибших на протяжении второго года развития [29, 31].

Абсолютную всхожесть и энергию прорастания семян определяли в трехкратной повторности согласно ГОСТ 13056.6–97 [32].

Корреляционные матрицы изученных признаков женской генеративной системы сосны, произрастающей в условиях разного уровня магнезитового загрязнения и фоновых условий, были обработаны методом факторного анализа с ис-

пользованием пакета программ Statistica 6.0 [33]. При проведении анализа во внимание принимали факторы с собственными значениями больше 1,0. При изучении состава факторов (далее Ф с порядковым номером фактора в зависимости от величины вклада в изменчивость признаков) обсуждали признаки, корреляции которых с соответствующим фактором по модулю превышали 0,5.

## Результаты и обсуждение

В условиях фона 1-й фактор (Ф1) вносит существенно больший вклад в изменчивость признаков (34,89 %) (рис. 4). В его составе положительно сопряжены между собой и отрицательно с фактором такие признаки, как размеры и масса шишек (признаки 1, 2 и 4), размеры семенных чешуй и крылаток (признаки 6, 7 и 12, 13), число стерильных и общее число семенных чешуй (признаки 15, 16), число фертильных и опыленных семяпочек (признаки 17, 18), общее число семян (признак 21), число выполненных и пустых семян (признаки 22, 23), выживаемость семяпочек в 1-й, 2-й и весь гаметофитный период (признаки 24–26),

итоговая выживаемость семян (признак 28), длина корешка проростка (признак 33). Таким образом, в данных условиях произрастания размеры и масса шишек (признаки 1, 2 и 4) взаимосвязаны с размерами семенных чешуй (признаки 6, 7) и их количеством (признаки 15, 16).

Размеры крылаток (признаки 12, 13) связаны с размерами семенных чешуй (признаки 6, 7). Достоверная корреляция между потенциально фертильными (признак 17), опыленными (признак 18) и оплодотворенными (признак 21) семяпочками, числом выполненных семян (признаки 22) позволяет заключить, что потенциальные возможности шишек к формированию семян в фоновых условиях (ОУ-К) реализуются в полной мере. Выход семян (признаки 21, 22) прямо пропорционально связан с размерами шишек. Однако масса семян (признак 29) и показатели качества семян (ПКС) (признаки 30, 31) не зависят от количества семян в шишках (признаки 21, 22) и размеров шишек (признаки 1, 2 и 4). Общая выживаемость семяпочек (признак 28) и выход семян (признаки 21, 22) определяются в большей степени выживаемостью семяпочек на стадии гамет (признаки 24–26), чем на стадии эмбрионов (признак 27). Аналогичная система связей частично продублирована в Ф2 и дополнена признаками, характеризующими массу семян (признак 29) и их энергию прорастания (признак 30): чем интенсивнее отбор на стадии гамет, тем крупнее семена и выше энергия прорастания. Выживаемость семяпочек в эмбриональный период развития (признак 27) имеет малое количество связей с остальными признаками женской генеративной системы, может зависеть от выживаемости семяпочек в 1-й вегетационный период (Ф3) и определять длину гипокотыля проростка (Ф6). Всхожесть семян (признак 31) также достаточно обособлена от других признаков и взаимосвязана с энергией прорастания (Ф4) или варьирует независимо (Ф7). Признак, характеризующий число семядолей (признак 35), достоверно не связан ни с одним из изученных признаков (Ф5). В целом высокодостоверные связи между показателями, характеризующими развитие проростков и массу семян и их ПКС, не выявлены, поскольку данные признаки с высокими значениями факторных нагрузок (ФН) входят в состав разных факторов, что позволяет предположить несбалансированность постэмбрионального периода развития семени.

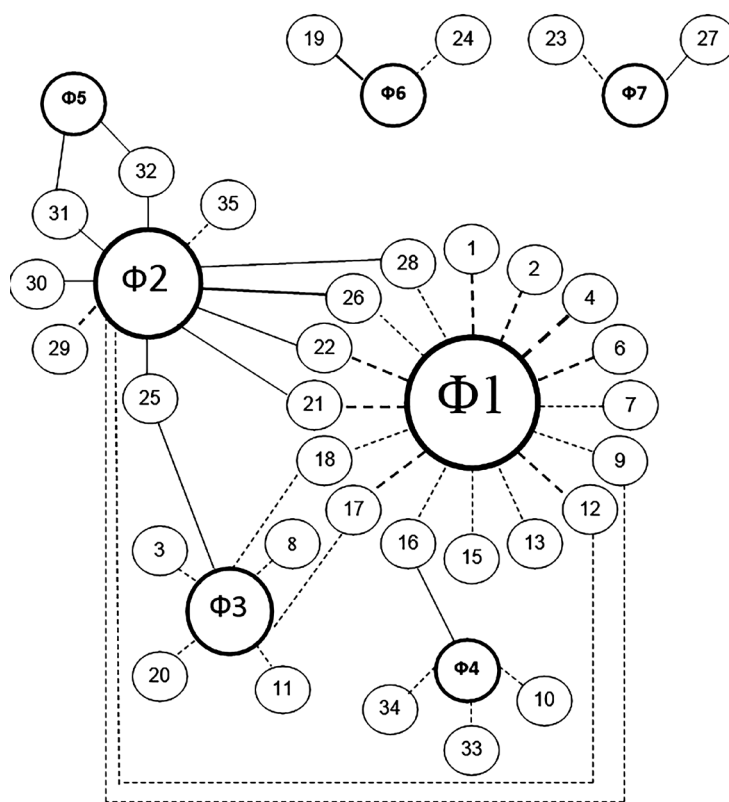
В условиях сильного загрязнения (ОУ-2) в составе Ф1 (28,99 % общей дисперсии) положительно сопряжены между собой и отрицательно с Ф1 такие признаки, как размеры и масса шишек (признаки 1, 2 и 4), размеры семенных чешуй, щитков и крылаток (признаки 6, 7, 9, 10, 12, 13), число стерильных и общее число семенных

чешуй (признаки 15, 16), а также число фертильных и опыленных семяпочек (признаки 17, 18), общее число семян (признак 21), число выполненных семян (признак 22), выживаемость семяпочек за весь гаметофитный период (признак 26), итоговая выживаемость семяпочек (признак 28) (рис. 5).

В условиях сильного загрязнения (ОУ-2), так же, как и в фоновых условиях (ОУ-К), размеры шишек и их масса (признаки 1, 2 и 4) взаимосвязаны и с размерами семенных чешуй (признаки 6, 7), и с их количеством (признаки 15, 16).

Размеры крылаток (признаки 12, 13) связаны с размерами семенных чешуй (признаки 6, 7). Число опыленных, оплодотворенных (общее число семян), а также число выполненных семян связано с числом фертильных семяпочек, т. е. потенциальные возможности деревьев по формированию семян в данных условиях реализуются в полной мере.

Показатель, характеризующий число фертильных семяпочек, входит в состав двух факторов (Ф1 и Ф3) и в обоих с числом опыленных семяпочек коррелирует прямопропорционально, т. е. все деревья ОУ имеют однонаправленную связь данных показателей. Однако при увеличении числа опыленных семяпочек может увеличиваться как число оплодотворенных (выживаемость во 2-й вегетационный период увеличивается) (Ф1), так и неоплодотворенных семяпочек (выживаемость во 2-й вегетационный период уменьшается) (Ф3). Связь опыленных и оплодотворенных семяпочек более прочная (Ф1), вероятно, у большинства деревьев семяпочки, успешно прошедшие процесс опыления, в большинстве своем будут оплодотворены. Однако в обоих случаях результат отбора неопределенный — нет связи с качеством семян. Для части показателей, характеризующих число семян и выживаемость семяпочек состав Ф1 и Ф2 дублируется. Система связей не противоречит указанной выше, однако набор показателей дополняется показателями, характеризующими массу семян и их качество. Таким образом, в зоне сильного загрязнения отрицательная связь между семенной продуктивностью (числом полнозернистых семян и общим числом семян) и массой семян выходит на достоверно значимый уровень (Ф2). Это можно объяснить недостатком питательных веществ для деревьев, поскольку в данных условиях произрастания они сильно ослаблены, крона имеет высокую степень дефолиации, срок жизни хвои сокращен [34, 35]. Семена малой массы (она может составлять 2,38 г/1000 шт., что в 2,65 раза меньше чем средняя на участке ОУ-К) имеют высокие ПКС и формируют в лабораторных условиях к 15-му дню развитые проростки с высокой долей «семядольных» растений и малым числом семядолей. Связь показателей массы семян с числом семян и ПКС не повторяется в составе других факторов, что позволяет предположить



**Рис. 5.** Факторная структура признаков женской генеративной системы сосны обыкновенной в условиях сильного загрязнения: — положительная связь; --- отрицательная связь; ----  $0,7 > r > 0,5$ ; - - - -  $0,9 > r > 0,7$ ; - - - -  $r > 0,9$

**Fig. 5.** Factor structure of Scots pine female generative system traits in conditions of heavy pollution: — positive relationship; --- negative relationship; ----  $0,7 > r > 0,5$ ; - - - -  $0,9 > r > 0,7$ ; - - - -  $r > 0,9$

однаправленную реакцию деревьев по данным показателям на условия произрастания. Длина сформированных проростков варьирует, однако соотношение длины корешка и гипокотиля прогнозируемо: чем больше длина корешка, тем больше длина гипокотиля, что следует из положительной корреляции этих показателей в составе Ф4. Вне зависимости от массы семени, имеющие высокие ПКС, формируют проростки большей длины, чем семена с малыми значениями ПКС (Ф5).

В данных условиях произрастания выживаемость семяпочек в 1-й вегетационный период не связана с какими-либо параметрами женской генеративной системы и находится в составе Ф6, с которым связана отрицательно. Выживаемость семяпочек в эмбриональный период также обособлена от других признаков и находится в составе Ф7.

### Выводы

1. Взаимосвязь признаков, характеризующих размеры и массу шишек сосны, жестко генетически детерминирована, так как не нарушается в условиях высокого уровня загрязнения.

2. Семенная продуктивность древостоев сосны находится в более тесной взаимосвязи с показателями выживаемости семяпочек в гаметофитный период, чем в период эмбрионального развития. В фоновых условиях выживаемость семяпочек в 1-й вегетационный и эмбриональный периоды сопряжены положительно, а в условиях загрязнения связь данных признаков отрицательная, что позволяет предположить существование эффективной элиминации аномальных гаметофитов и освобождение древостоя от них в условиях загрязнения.

3. Взаимосвязь между семенной продуктивностью и массой семян сосны отрицательная в условиях высокого загрязнения вследствие сильного ослабления деревьев и малой доступности элементов питания при высоком значении рН почвы, вызванном загрязнением магнетитовой пылью.

4. Структура связи показателей массы семян и их посевных качеств изменяется. Связь массы семян с энергией прорастания и всхожестью в фоновых условиях положительная, а в условиях сильного загрязнения — достоверно значимая отрицательная связь.

5. Структура связей между морфометрическими показателями и показателями массы и качества семян у проростков семян, сформированных в условиях загрязнения, изменяется. Длина корешка и гипокотила проростков семян, сформированных в фоновых условиях, не связано с их энергией прорастания, всхожестью и массой, а в условиях высокого загрязнения положительно связана с основными показателями качества и отрицательно — с их массой.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Ботанического сада Уральского отделения Российской академии наук.*

## Список литературы

- [1] Четвериков С.С. О некоторых моментах эволюционного процесса с точки зрения современной генетики // Журнал экспериментальной биологии, 1926. Сер. А. Т. 2. № 4. С. 3–54.
- [2] Безель В.С., Позолотина В.Н., Бельский Е.А., Жуйкова Т.В. Изменчивость популяционных параметров: адаптация к токсическим факторам среды // Экология, 2001. № 6. С. 447–453.
- [3] Жуйкова Т.В., Безель В.С. Адаптация растительных систем к химическому стрессу: популяционный аспект // Вестник Удмуртского университета, 2009. Вып. 1. С. 31–41.
- [4] Мамаев С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений. М.: Наука, 1973. 284 с.
- [5] Берг Р.Л. Экологическая интерпретация корреляционных плеяд // Вестник Ленинградского ун-та. Сер. Биология, 1959. Вып. 2. № 9. С. 142–152.
- [6] Яблоков А.В. Популяционная биология. М.: Высшая школа, 1978. 303 с.
- [7] Животовский Л.А. Интеграция полигенных систем в популяциях. Проблемы анализа комплекса признаков. М.: Наука, 1984. 183 с.
- [8] Батыгин Н.Ф. Онтогенез высших растений. М.: Агропромиздат, 1986. 100 с.
- [9] Анিকেев Д.Р. Сопряженная изменчивость и наследуемость признаков женской генеративной сферы сосны обыкновенной в условиях промышленного загрязнения // Лесоведение, 2000. № 4. С. 56–62.
- [10] Анিকেев Д.Р., Бабушкина Л.Г., Зуева Г.В. Состояние репродуктивной системы сосны обыкновенной при аэротехногенном загрязнении. Екатеринбург: Изд-во УГЛТА, 2000. 81 с.
- [11] Махнева С.Г., Бабушкина Л.Г., Зуева Г.В. Состояние мужской генеративной сферы сосны обыкновенной при техногенном загрязнении среды. Екатеринбург: Изд-во УГЛТА, 2003. 154 с.
- [12] Тихонова И.В. Морфологические признаки пыльцы в связи с состоянием деревьев сосны в сухой степи // Лесоведение, 2005. № 1. С. 63–69.
- [13] Тихонова И.В. Сопряженная изменчивость признаков генеративных органов сосны двух островных боров на юге средней Сибири // Хвойные бореальной зоны, 2007. № 4–5. С. 414–418.
- [14] Кузнецова Н.Ф., Машкина О.С. Реакция на стресс и ее последствие у сосны обыкновенной в онтогенезе и при смене поколений // Хвойные бореальной зоны, 2011. Т. 28. № 1–2. С. 83–90.
- [15] Ибрагимова Э.Э. Практические и методические подходы к использованию высших растений для оценки состояния окружающей среды // Человек — Природа — Общество: Теория и практика безопасности жизнедеятельности, экологии и валеологии, 2017. № 3 (10). С. 44–52.
- [16] Романова Л.И. Влияние техногенного загрязнения г. Красноярска на вегетативные органы естественных древостоев сосны обыкновенной // Хвойные бореальной зоны, 2018. Т. 36. № 5. С. 417–421.
- [17] Солдатова В.Ю., Самсонова А.П. Влияние урбосреды на изменчивость пыльцевых зерен березы повислой (*Betula pendula* Roth) (на примере г. Якутска) // Самарский научный вестник, 2019. Т. 8. № 3 (28). С. 80–84.
- [18] Менщиков С.Л. Исследование экологических особенностей роста и обоснование агротехники создания культур хвойных пород в условиях магnezитовых запылений: дис. канд. с.-х. наук: 06.03.01. Свердловск, 1985. 210 с.
- [19] Сродных Т.Б. Обоснование агротехники создания культур березы бородавчатой в условиях магnezитовых запылений на Южном Урале: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 06.03.02. Свердловск, 1986. 20 с.
- [20] Мохначев П.Е., Махнева С.Г., Потапенко А.М., Бартыш А.А., Клеткин А.А. Основные показатели качества семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), сформированных в условиях аэропромвыбросов разного химического состава // Леса России и хозяйство в них, 2023. № 3 (86). С. 65–73.
- [21] Завьялов К.Е., Менщиков С.Л., Мохначев П.Е., Кузьмина Н.А. Влияние аэротехногенных выбросов магnezитового производства на надземную фитомассу *Betula pendula* Roth в зависимости от плодородия почвы // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 2. С. 104–111. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-2-104-111
- [22] Makhniova S., Mokhnachev P.E., Ayan S. Seed germination and seedling growth of scots pine in technogenically polluted soils as container media // Environmental Monitoring and Assessment, 2019, t. 191, no. 2, p. 113.
- [23] Mohnachev P.E., Makhniova S.G., Menshchikov S.L., Zavyalov K.E. Quality of scots pine seeds formed under the conditions of aerotechnogenic emissions of large industrial centers of the Urals // AIP Conference Proceedings. 4th International Conference on Modern Synthetic Methodologies for Creating Drugs and Functional Materials, MOSM 2020. American Institute of Physics Inc., 2021, p. 030026.
- [24] Zavyalov K.E., Menshchikov S.L., Mokhnachev P.E. Application of ameliorants for reclamation of technogenic-disturbed lands by aerotechnogenic emissions of magnesite production // AIP Conference Proceedings. 4th International Conference on Modern Synthetic Methodologies for Creating Drugs and Functional Materials, MOSM 2020. American Institute of Physics Inc., 2021, p. 040024.
- [25] Менщиков С.Л., Кузьмина Н.А., Мохначев П.Е. Воздействие атмосферных выбросов магnezитового производства на почвы и снеговой покров // Известия Оренбургского государственного аграрного университета, 2012. № 5(37). С. 221–223.
- [26] Кузьмина Н.А., Менщиков С.Л. Влияние аэротехногенных выбросов магnezитового производства на химический состав снеговой воды и почвы в динамике // Известия Оренбургского государственного аграрного университета, 2015. № 6 (56). С. 192–196.
- [27] Кузьмина Н.А., Менщиков С.Л., Махнева С.Г., Завьялов К.Е., Мохначев П.Е. Уровень загрязнения снега и почвы в зонах поражения лесной растительности под воздействием выбросов магnezитового производства // Леса России и хозяйство в них, 2016. № 4(59). С. 49–55.
- [28] Kuzmina N., Menshchikov S.L., Mohnachev P., Zavyalov K.E., Petrova I.V., Ozel H.B., Aricak B. Change of aluminum concentrations in specific plants by species, organ, washing, and traffic density // BioResources, 2023, t. 18, no. 1, pp. 803–792.

- [29] Романовский М.Г., Хромова Л.В. Образование семян при самоопылении сосны обыкновенной // Лесоведение, 1992. № 5. С. 3–9.
- [30] Абатурова М.П., Духарев В.А., Рябконов С.М. Значение состояния семяпочки для опыления сосны обыкновенной // Лесоведение, 1997. № 1. С. 64–69.
- [31] Романовский М.Г. Формирование урожая семян сосны в норме и при мутагенном загрязнении. М.: Наука, 1997. 112 с.
- [32] ГОСТ-13056.6–97. Семена деревьев и кустарников. Методы определения всхожести. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1998. 27 с.
- [33] Халафян А.А. Statistica 6. Статистический анализ данных. М.: Бином-Пресс, 2007. 512 с.
- [34] Завьялов К.Е., Менщиков С.Л., Мохначев П.Е., Кузьмина Н.А. Оценка повреждения опытных культур (*Pinus sylvestris* L., *Betula pendula* Roth, *Larix Sukaczewii* D.) в условиях загрязнения комбинатом «Магnezит» на Южном Урале // Леса России и хозяйство в них, 2016. № 4 (59). С. 35–41.
- [35] Zavyalov K., Menshikov S., Mohnachev P., Kuzmina N., Potapenko A., Ayan S. Response of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), Sukachyov's larch (*Larix Sukaczewii* Dylis), and silver birch (*Betula pendula* Roth.) to magnesite dust in Satkinsky industrial hub // Forestry Ideas, 2018, t. 24, no. 1, p. 23–36.

## Сведения об авторах

**Мохначев Павел Евгеньевич** — канд. биол. наук, ст. науч. сотр., заведующий лабораторией экологии техногенных растительных сообществ, ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук», mohnachev74@mail.ru

**Махнева Светлана Георгиевна** — канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаборатории экологии техногенных растительных сообществ, ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук», makhniovasg@mail.ru

**Менщиков Сергей Леонидович** — д-р с.-х. наук, вед. науч. сотр. лаборатории экологии техногенных растительных сообществ, ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук», m.sergei1951@yandex.ru

**Поспелова Надежда Александровна** — науч. сотр. лаборатории экологии техногенных растительных сообществ, ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения РАН», yarkaya05@mail.ru

Поступила в редакцию 07.11.2022.

Одобрено после рецензирования 08.02.2023.

Принята к публикации 15.04.2024.

## COVARIATION OF SCOTS PINE (*PINUS SYLVESTRIS* L.) FEMALE GENERATIVE SYSTEM SIGNS UNDER MAGNESITE POLLUTION

**P.E. Mokhnachev<sup>✉</sup>, S.G. Makhneva, S.L. Menshchikov, N.A. Pospelova**

Botanical Garden of the Ural Branch of the RAS, 202a, 8 Marta st., 620144, Yekaterinburg, Russia

mohnachev74@mail.ru

The study of the covariation of the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) female generative system signs in conditions of aerotechnogenic pollution was carried out. Traits with a stable relationship and changing under the influence of aerotechnogenic pollution have been identified. It was found that the relationship of traits characterizing the size and cones weight is strictly genetically determined and is not violated under conditions of high pollution level. Seed productivity of pine stands, regardless of growing conditions, is more closely related to seedpod survival rates in the gametophytic period than in the period of embryonic development. It has been shown that in conditions of severe pollution, the association of ovule survival in the 1st vegetative and embryonic periods is negative, which may indicate the effective elimination of abnormal gametophytes and the liberation of the stand from them in conditions of pollution. In addition, conditions of heavy pollution «contributed» the development of tree strategy for the formation of small seeds with high sowing rates and the quality of seedlings developed from them — only in these growing conditions, with a decrease in seed weight, germination energy and germination and morphometric parameters of seedlings are significantly increased.

**Keywords:** conjugate variability, generative system, seed quality, Scots pine, aerotechnogenic pollution

**Suggested citation:** Mokhnachev P.E., Makhneva S.G., Menshchikov S.L., Pospelova N.A. *Sopryazhennaya izmenchivost' priznakov zhenskoy generativnoy sistemy sosny obyknovennoy (Pinus sylvestris L.) v usloviyakh magnezitovogo zagryazneniya* [Covariation of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) female generative system signs under magnesite pollution]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 3, pp. 37–47.  
DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-37-47

## References

- [1] Chetverikov S.S. *O nekotorykh momentakh evolyutsionnogo protsessa s tochki zreniya sovremennoy genetiki* [On some aspects of the evolutionary process from the point of view of modern genetics]. Zhurnal eksperimental'noy biologii [Journal of Experimental Biology], 1926, ser. A., v. 2, no. 4, pp. 3–54.
- [2] Bezel' V.S., Pozolotina V.N., Bel'skiy E.A., Zhuykova T.V. *Izmenchivost' populyatsionnykh parametrov: adaptatsiya k toksicheskim faktoram sredy* [Variation in Population Parameters: Adaptation to Toxic Environmental Factors]. Ekologiya [Russian Journal of Ecology], 2001, v. 32, no. 6, pp. 413–419.
- [3] Zhuykova T.V., Bezel' V.S. *Adaptatsiya rastitel'nykh sistem k khimicheskomu stressu: populyatsionnyy aspekt* [Adaptation of plant systems to chemical stress: population aspect]. Vestnik Udmurtskogo universiteta [Bulletin of the Udmurt University], 2009, v. 1, pp. 31–41.
- [4] Mamaev S.A. *Formy vnutrividovoy izmenchivosti drevesnykh rasteniy* [Forms of intraspecific variability of woody plants]. Moscow: Nauka, 1973, 284 p.
- [5] Berg R.L. *Ekologicheskaya interpretatsiya korrelyatsionnykh pleyad* [Ecological interpretation of correlation pleiades]. Vestnik Leningradskogo Universiteta. Ser. Biologiya [Bulletin of Leningrad University. Ser. Biology], 1959, v. 2, no. 9, pp. 142–152.
- [6] Yablokov A.V. *Populyatsionnaya biologiya* [Population biology]. Moscow: Higher School [Graduate School], 1978, 303 p.
- [7] Zhivotovskiy L.A. *Integratsiya poligennykh sistem v populyatsiyakh. Problemy analiza kompleksa priznakov* [Integration of polygenic systems in populations]. Problemy analiza kompleksa priznakov [Problems of the analysis of a complex of signs]. Moscow: Nauka, 1984, 183 p.
- [8] Batygin N.F. *Ontogenez vysshikh rasteniy* [Ontogeny of higher plants]. Moscow: Agropromizdat, 1986, 100 p.
- [9] Anikeev D.R. *Sopryazhennaya izmenchivost' i nasleduemost' priznakov zhenskoj generativnoy sfery sosny obyknovennoy v usloviyakh promyshlennogo zagryazneniya* [Conjugate variability and heritability of signs of the female generative sphere of Scots pine in conditions of industrial pollution]. Lesovedenie [Forestry], 2000, no. 4, pp. 56–62.
- [10] Anikeev D.R., Babushkina L.G., Zueva G.V. *Sostoyanie reproduktivnoy sistemy sosny obyknovennoy pri aerotekhnogenom zagryaznenii* [The state of the reproductive system of Scotch pine under aerotechnogenic pollution]. Ekaterinburg: Ural Stat Forest Engineering University, 2000, 81 p.
- [11] Makhneva S.G., Babushkina L.G., Zueva G.V. *Sostoyanie muzhskoy generativnoy sfery sosny obyknovennoy pri tekhnogenom zagryaznenii sredy* [The state of the male generative sphere of Scotch pine under technogenic pollution of the environment]. Ekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2003, 154 p.
- [12] Tikhonova I.V. *Morfologicheskie priznaki pyl'tsy v svyazi s sostoyaniem derev'ev sosny v sukhoy stepi* [Morphological features of pollen in connection with the state of pine trees in the dry steppe]. Lesovedenie [Forestry], 2005, no. 1, pp. 63–69.
- [13] Tikhonova I.V. *Sopryazhennaya izmenchivost' priznakov generativnykh organov sosny dvukh ostrovnykh borov na yuge sredney Sibiri* [Conjugate variability of signs of generative organs of pine of two island forests in the south of Central Siberia]. Khvoynye boreal'noy zony [Coniferous boreal zones], 2007, no. 4–5, pp. 414–418.
- [14] Kuznetsova N.F., Mashkina O.S. *Reaktsiya na stress i ee posledeystvie u sosny obyknovennoy v ontogeneze i pri smene pokoleniy* [Stress response and its aftereffect in Scots pine in ontogenesis and during generational change]. Khvoynye boreal'noy zony [Coniferous boreal zones], 2011, v. 28, no. 1–2, pp. 83–90.
- [15] Ibragimova E.E. *Prakticheskie i metodicheskie podkhody k ispol'zovaniyu vysshikh rasteniy dlya otsenki sostoyaniya okruzhayushchey sredy* [Practical and methodological approaches to the use of higher plants to assess the state of the environment]. Chelovek — Priroda — Obshchestvo: Teoriya i praktika bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti, ekologii i valeologii [Man — Nature — Society: Theory and practice of life safety, ecology and valeology], 2017, no. 3 (10), pp. 44–52.
- [16] Romanova L.I. *Vliyaniye tekhnogenogo zagryazneniya g. Krasnoyarska na vegetativnyye organy estestvennykh drevostoev sosny obyknovennoy* [The influence of technogenic pollution of Krasnoyarsk on the vegetative organs of natural stands of Scots pine]. Khvoynye boreal'noy zony [Conifers of the boreal zone], 2018, t. 36, no. 5, pp. 417–421.
- [17] Soldatova V.Yu., Samsonova A.P. *Vliyaniye urbosredy na izmenchivost' pyl'tsevnykh zeren berezy povisloy (Betula pendula Roth) (na primere g. Yakutsk)* [The influence of the urban environment on the variability of pollen grains of the hanging birch (*Betula pendula* Roth) (on the example of Yakutsk)]. Samarskiy nauchnyy vestnik [Samara Scientific Bulletin], 2019, v. 8, no. 3 (28), pp. 80–84.
- [18] Menshchikov S.L. *Issledovanie ekologicheskikh osobennostey rosta i obosnovanie agrotekhniki sozdaniya kul'tur khvoynnykh porod v usloviyakh magnezitovykh zapyleniy* [Research of ecological features of growth and substantiation of agrotechnics of creation of cultures of coniferous breeds in the conditions of magnesite dusting]. Dis. Cand. Sci (Agric.), 06.03.01. Sverdlovsk, 1985, 210 p.
- [19] Srodnykh T.B. *Obosnovanie agrotekhniki sozdaniya kul'tur berezy borodavchatoy v usloviyakh magnezitovykh zapyleniy na Yuzhnom Urale* [Substantiation of agricultural technology for the creation of cultures of warty birch in conditions of magnesite dusting in the Southern Urals]. Dis. Cand. Sci. (Biol.), 06.03.02. Sverdlovsk, 1986, 20 p.
- [20] Mokhnachev P.E., Makhneva S.G., Potapenko A.M., Bartyshev A.A., Kletkin A.A. *Osnovnye pokazateli kachestva semyan sosny obyknovennoy (Pinus sylvestris L.), sformirovannykh v usloviyakh aeropromvybrosov raznogo khimicheskogo sostava* [The main quality indicators of Scots pine seeds (*Pinus sylvestris* L.) formed under conditions of aeroprom emissions of different chemical composition]. Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh [Forests of Russia and their economy], 2023, no. 3 (86), pp. 65–73.
- [21] Zav'yalov K.E., Menshchikov S.L., Mokhnachev P.E., Kuz'mina N.A. *Vliyaniye aerotekhnogennykh vybrosov magnezitovogo proizvodstva na nadzemnyuyu fitomassu Betula pendula Roth v zavisimosti ot plodorodiya pochvy* [Magnesite production aerotechnogenic emissions impact on the elevated phytomass *Betula pendula* Roth depending on soil fertility]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2023, vol. 27, no. 2, pp. 104–111. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-2-104-111
- [22] Makhneva S., Mokhnachev P.E., Ayan S. *Seed germination and growth of scots pine seedlings in technogenically polluted soils as container media. Environmental monitoring and assessment*, 2019, v. 191, no. 2, p. 113.
- [23] Mokhnachev P.E., Makhneva S.G., Menshchikov S.L., Zav'yalov K.E. *The quality of scots pine seeds formed under conditions of aerotechnogenic emissions from large industrial centers of the Urals // Materials of the AIP conference. The 4th International Conference on Modern Synthetic Methodologies for the Creation of Medicines and Functional Materials, MOSM 2020. American Institute of Physics, Inc., 2021, no. 030026.*

- [24] Zavyalov K.E., Menshchikov S.L., Mokhnachev P.E. The use of meliorants for the reclamation of technogenically disturbed lands by aerotechnogenic emissions of magnesite production. Proceedings of the AIP conference. The 4th International Conference on Modern Synthetic Methodologies for the creation of drugs and functional materials, MOSM 2020, American Institute of Physics, 2021, no. 040024.
- [25] Menshchikov S.L., Kuz'mina N.A., Mokhnachev P.E. *Vozdeystvie atmosferykh vybrosov magnezitovogo proizvodstva na pochvy i snegovoy pokrov* [Impact of atmospheric emissions from magnesite production on soils and snow cover]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [News of the Orenburg State Agrarian University], 2012, no. 5(37), pp. 221–223.
- [26] Kuz'mina N.A., Menshchikov S.L. *Vliyanie aerotekhnogenykh vybrosov magnezitovogo proizvodstva na khimicheskiy sostav snegovoy vody i pochvy v dinamike* [Influence of aerotechnogenic emissions of magnesite production on the chemical composition of snow water and soil in dynamics]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [News of the Orenburg State Agrarian University], 2015, no. 6 (56), pp. 192–196.
- [27] Kuz'mina N.A., Menshchikov S.L., Makhneva S.G., Zav'yalov K.E., Mokhnachev P.E. *Uroven' zagryazneniya snega i pochvy v zonakh porazheniya lesnoy rastitel'nosti pod vozdeystviem vybrosov magnezitovogo proizvodstva* [The level of pollution of snow and soil in the areas affected by forest vegetation under the influence of emissions from magnesite production]. *Les Rossii i khozyaystvo v nikh* [Forests of the Urals and agriculture in them], 2016, no. 4(59), pp. 49–55.
- [28] Kuzmina N., Menshchikov S.L., Mohnachev P., Zavyalov K.E., Petrova I.V., Ozel H.B., Aricak B. Change of aluminum concentrations in specific plants by species, organ, washing, and traffic density. *BioResources*, 2023, t. 18, no. 1, pp. 803–792.
- [29] Romanovskiy M.G., Khromova L.V. *Obrazovanie semyan pri samoopylenii sosny obyknovnoy* [Seed formation during self-pollination of Scotch pine]. *Lesovedenie*, 1992, no. 5, pp. 3–9.
- [30] Abaturova M.P., Dukharev V.A., Ryabokon' S.M. *Znachenie sostoyaniya semyapochki dlya opyleniya sosny obyknovnoy* [The value of the state of the ovule for pollination of Scotch pine]. *Lesovedenie*, 1997, no. 1, pp. 64–69.
- [31] Romanovskiy M.G. *Formirovanie urozhaya semyan sosny v norme i pri mutagenom zagryaznenii* [Formation of pine seed yield in normal conditions and with mutagenic contamination]. Moscow: Nauka, 1997, 112 p.
- [32] GOST-13056.6–97. *Semena derev'ev i kustarnikov. Metody opredeleniya vskhozhesti* [Seeds of trees and shrubs. Germination methods]. Minsk: Mezhgosudarstvennyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii, 1998, 27 p.
- [33] Khalafyan A.A. *Statistika 6. Statisticheskiy analiz dannykh* [Statistical data analysis]. Moscow, 2007, 512 p.
- [34] Zav'yalov K.E., Menshchikov S.L., Mokhnachev P.E., Kuz'mina N.A. *Otsenka povrezhdeniya opytnykh kul'tur (Pinus sylvestris L., Betula pendula Roth, Larix Sukaczewii D.) v usloviyakh zagryazneniya kombinatom «Magnezit» na Yuzhnom Urale* [Assessment of damage to experimental crops (*Pinus sylvestris* L., *Betula pendula* Roth, *Larix Sukaczewii* D.) under conditions of pollution by the Magnezit plant in the South Urals]. *Les Rossii i khozyaystvo v nikh* [Forests of the Urals and agriculture in them], 2016, no. 4 (59), pp. 35–41.
- [35] Zavyalov K., Menshchikov S., Mohnachev P., Kuzmina N., Potapenko A., Ayan S. Response of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), Sukachyov's larch (*Larix Sukaczewii* Dylis), and silver birch (*Betula pendula* Roth.) to magnesite dust in Satkinsky industrial hub. *Forestry Ideas*, 2018, t. 24, no. 1, p. 23–36.

*The work was carried out under the state assignment of the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.*

## Authors' information

**Mokhnachev Pavel Evgen'evich**✉ — Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Head of Laboratory Ecology Laboratory of technogenic plant communities, Russian Academy of Sciences, Ural Branch: Institute Botanic Garden, mohnachev74@mail.ru

**Makhneva Svetlana Georgievna** — Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Laboratory of Ecology technogenic plant communities, Russian Academy of Sciences, Ural Branch: Institute Botanic Garden, makhniovasg@mail.ru

**Menshchikov Sergey Leonidovich** — Dr. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Laboratory of Ecology technogenic plant communities, Russian Academy of Sciences, Ural Branch: Institute Botanic Garden, m.sergei1951@yandex.ru

**Pospelova Nadezhda Aleksandrovna** — Researcher, Laboratory of Ecology technogenic plant communities, Russian Academy of Sciences, Ural Branch: Institute Botanic Garden, yarkaya05@mail.ru

Received 07.11.2022.

Approved after review 08.02.2023.

Accepted for publication 15.04.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article  
The authors declare that there is no conflict of interest

## УСЛОВИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОСЛЕПОЖАРНОГО ЗЕЛЕНОМОШНОГО КЕДРОВНИКА НА СТАДИИ МОЛОДНЯКА

Н.В. Танцырев

ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук», Россия, 620144, г. Екатеринбург,  
ул. 8 Марта, д. 202а

89502076608@mail.ru

Приведен сравнительный количественный анализ естественного возобновления сосны (кедра) сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour.) и условий формирования кедровников на двух пробных площадях на горях в зеленомошном типе леса в северной предгорно-низкогорной части Среднего Урала. Установлено, что на обеих пробных площадях количество подроста кедра колеблется в пределах 0,3...2,9 тыс. экз./га и в отличие от анемохорных древесных растений не зависит от расстояния до 375 м от периферийного древостоя-обсеменителя (стены леса). При этом оно положительно коррелирует с изменением степени проективного покрытия мохового покрова и отрицательно — с проективным покрытием высокостебельной травянистой растительности и захлапленностью послепожарным древесным валежом. На пробной площади № 1 (ПП1) обильный подрост березы (12,2...17,5 тыс. экз./га) порослевого происхождения высотой 3 м относительно равномерно размещен по всей территории гари. Под его пологом на расстоянии до 200 м от стены леса количество подроста ели (4,2 тыс. экз./га) в 4 раза больше, чем кедра (1,0 тыс. экз./га). На расстоянии от 200 до 375 м от стены леса его количество (0,7 тыс. экз./га) в 1,5–2 раза меньше, чем кедра (1,2 тыс. экз./га). На пробной площади № 2 (ПП2) подрост березы (2,1 тыс. экз./га) семенного происхождения распространен не далее 100 м от стены леса. Здесь под ним количество подроста ели (1,5 тыс. экз./га) в 3 раза больше, чем кедра (0,5 тыс. экз./га). На расстоянии свыше 100 м от стены леса его количество (0,6 тыс. экз./га), наоборот, в 3 раза меньше, чем кедра (1,7 тыс. экз./га). Роль мелколиственного полога здесь выполняют кусты рябины и ивы козьей (1,8 тыс. экз./га) высотой 3–4 м. Тем самым, с увеличением расстояния от периферии к центральной части гари количественное соотношение подроста изменяется в пользу кедра. Предполагается развитие ельников с участием кедра под пологом формирующихся березняков на расстоянии до 200 м на ПП1 и до 100 м на ПП2 от периферийных древостоев-обсеменителей. На ПП1 развитие кедровника будет проходить классически под пологом березняка через длительно-производную мягколиственную формацию на расстоянии свыше 200 м от периферии. На ПП2 на расстоянии свыше 100 м от периферии кедровник формируется без участия мелколиственных уже на стадии молодняка через краткосрочную кустарниковую стадию.

**Ключевые слова:** *Pinus sibirica*, гарь, кедровник зеленомошник, восстановительная динамика, проективное покрытие

**Ссылка для цитирования:** Танцырев Н.В. Условия и перспективы формирования послепожарного зеленомошного кедровника на стадии молодняка // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 3. С. 48–56. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-48-56

В основе решения задач устойчивого воспроизводства лесов лежит комплексное исследование сложных закономерностей и структурно-функциональных связей ценопопуляций древесных растений на этапе их возобновления с внешними экологическими факторами и всеми компонентами лесных экосистем, которые определяют всю последующую структуру и динамику дендроценоза. В связи с этим проблема динамики растительных сообществ в настоящее время остается актуальной в сфере лесной экологии и лесоведения [1–5].

Согласно исследованиям, проведенным в зеленомошной группе типов леса Зауралья и Западной Сибири, восстановительно-возрастная динамика развития послепожарных кедровников — древостоев с преобладанием сосны (кедра) сибирской

(*Pinus sibirica* Du Tour.) протекает в несколько фаз и периодов через производную мягколиственную формацию [6–9]. Предполагается, что так сформировалось большинство обширных суходольных зеленомошных кедровников Западной Сибири и предгорно-низкогорного Зауралья [8, 10–12]. Формирование производных мягколиственных древостоев на месте гибели коренных темнохвойных лесов рассматривается как своего рода объективный распространенный механизм или этап их восстановления и сохранения, имеющий положительное значение с точки зрения улучшения лесорастительных условий [13].

Первая или начальная фаза формирования зеленомошных кедровников на горях характеризуется краткосрочным периодом возобновления кедра сибирского одновременно с другими лесобразующими видами, но при эдификаторной роли мягколиственных древесных растений [6–12, 14].



### Характеристика пробных площадей Characterisation of trial plots

Пробные площади		ПП1	ПП2	
Условия возобновления	Примыкающая стена леса	Состав древостоя	3К3Е2С2Б+Л	4Е3П2К1С1Б
		Возраст древостоя, лет	140	80
	Степень проективного покрытия напочвенного субстрата и растительных покровов, %	Моховой покров	58 ± 2,0	39 ± 3,6
		Высокостебельная травянистая растительность	45 ± 3,0	47 ± 2,6
		Верхний ярус мелколиственного древесного полога	54 ± 4,0	17 ± 3,4
		Неразложившийся древесный валеж	31 ± 3,0	16 ± 3,1
Видовой состав и численность подроста, тыс. экз./га	Кедр ( <i>Pinus sibirica</i> )	Количество «гнезд»	0,9	1,1
		Общее количество особей в «гнездах»	1,1	1,4
	Сосна ( <i>Pinus silvestris</i> )		1,5	единично
	Лиственница ( <i>Larix Sukaczewii</i> )		0,4	–
	Ель ( <i>Picea obovata</i> )		2,4	0,8
	Береза ( <i>Betula pendula</i> )		15,2	0,7
	Ива козья ( <i>Salix caprea</i> )		0,3	1,3
	Рябина ( <i>Sorbus sibirica</i> )		0,2	0,5

По мере развития мягколиственные древостои с подростом кедра рассматриваются как потенциальные кедровники [12, 15]. Неоднократно отмечалась крайне редкая встречаемость естественных зеленомошных молодняков с преобладанием в составе кедра как эдификатора. Тем не менее формирование послепожарных кедровников на стадии молодняка и их развитие без производной мягколиственной стадии протекает при определенных условиях в других типах леса Урала [14].

Общеизвестно, что возобновление кедра сибирского обусловлено тесной трофической связью с тонкоклювой кедровкой (*Nucifraga caryocatactes macrorhynchos* Vrehm С. L.). Создавая в почве запасы семян, птицы распространяют семена на значительные расстояния [12, 16–19] способствуя тем самым расселению кедра [8, 10–12, 20, 21]. Установлено, что запасы каждой кедровки строго индивидуальны. Находит она их благодаря феноменальной зрительной памяти и раскапывает только свои кладовки [16, 22, 23], используя их на пропитание и выкармливание птенцов в течение всего зимне-весеннего периода. Неиспользованные кладовки семян прорастают, образуя характерные плотные группы (так называемые «гнезда») всходов. По мере взросления в большинстве случаев в «гнезде» остается только одно дерево.

### Цель работы

Цель работы — сравнительная характеристика вариантов естественного лесовозобновления на двух пробных площадях, заложенных на горяях,

в однотипных лесорастительных условиях и рассмотрение возможности формирования послепожарных зеленомошных кедровников на стадии молодняков с доминированием в составе древостоев кедра сибирского.

### Материалы и методы

Работы выполнялись в подзоне средней тайги в предгорно-низкогорной (на высоте до 300 м н. у. м.) провинции Уральской горно-лесной области [24] в северной части восточного макросклона Среднего Урала (Свердловская область, Новолялинское лесничество). Постоянное изучение естественного возобновления кедра и формирования кедровников в разных экологических условиях проводится нами с 1997 г. В районе исследований кедр сибирский встречается как в виде куртин и отдельных деревьев, так и образует обширные лесные массивы, преобладая в составе древостоев. Подрост кедра в той или иной мере распространен повсеместно под пологом всех древостоев во всех типах леса. Крупные лесные пожары, в результате которых могут возникать обширные гари, повторяются здесь нерегулярно, без особой цикличности, в зависимости от погодных условий.

Для сравнения особенностей процесса лесовосстановления на горяях заложены две пробные площади (ПП) в однотипных лесорастительных условиях ягодниково-зеленомошного типа леса (таблица). Пробные площади несколько отличаются составом примыкающих к горяям древостоев (стен леса) — ближайших источников семян.

Исследуемые гари шириной около 1 км образовались в разные годы, в результате пожаров, произошедших в начале лета и вызвавших полную гибель древесной растительности.

Пробная площадь № 1 (ПП1) заложена на гари 13-летней давности и граничит с послепожарным 140-летним кедровником хвощево-долгомошно-сфагновым средней высотой 21 м (сумма площадей сечений 30,5 м<sup>2</sup>/га). Пробная площадь № 2 (ПП2) заложена на гари 14-летней давности и граничит с 80-летним ельником травяно-зеленомошным средней высотой 18 м (сумма площадей сечений 34,2 м<sup>2</sup>/га), сформировавшемся на вырубке.

Пробные площади и система учетных площадок закладывались по несколько адаптированной для кедра методике, ранее разработанной и предложенной С.Н. Санниковым [25] для сосны обыкновенной (*Pinus silvestris* L.). На сериях учетных площадок размером 5×5 м (по 70–80 площадок) проведен количественный учет подроста древесных растений, параметров другой растительности и почвенной среды по степени проективного покрытия их поверхности (в процентном отношении). Учетные площадки размещались через каждые 20 м несколькими параллельными рядами с расстоянием между ними 50 м поперек гарей в направлении от ближайшего примыкающего древостоя (стены леса) (см. таблицу) к их центральной части на расстояние до 375 м. Численность подроста кедра определялась по двум параметрам: по количеству характерных плотных групп («гнезд») подроста, проросших из не использованных кедровкой кладовок, и по количеству особей в них.

## Результаты и обсуждение

В предгорных и горных лесах Урала гари являются основным типом открытых естественных экотопов для естественного лесовозобновления. В первые годы после пожара поверхность гари представлена в основном мертвым обгоревшим субстратом. В течение длительного времени после пожара происходит постепенный вывал погибшего древостоя. Местами образуются завалы (захлапленность) из обгоревших древесных остатков и стволов (валежа). Основное количество подроста кедра на гарях в ягодниково-зеленомошном типе леса появляется на 3–5-й год после пожара на пирогенном моховом покрове, после чего следует резкий спад и приостановка возобновления к 10–12-му году, обусловленная разрастанием травянистой и мелколиственной древесной растительности [14, 26].

На ПП1, судя по упавшим и сухостойным стволам деревьев, в составе погибшего древостоя преобладала сосна (*Pinus silvestris* L.) в равной

степени с березой (*Betula pendula* Roth) и некоторым участием лиственницы (*Larix Sukaczewii* N. Dyl.) и ели (*Picea obovata* Ledeb.) и, возможно, с подростом ели под его пологом.

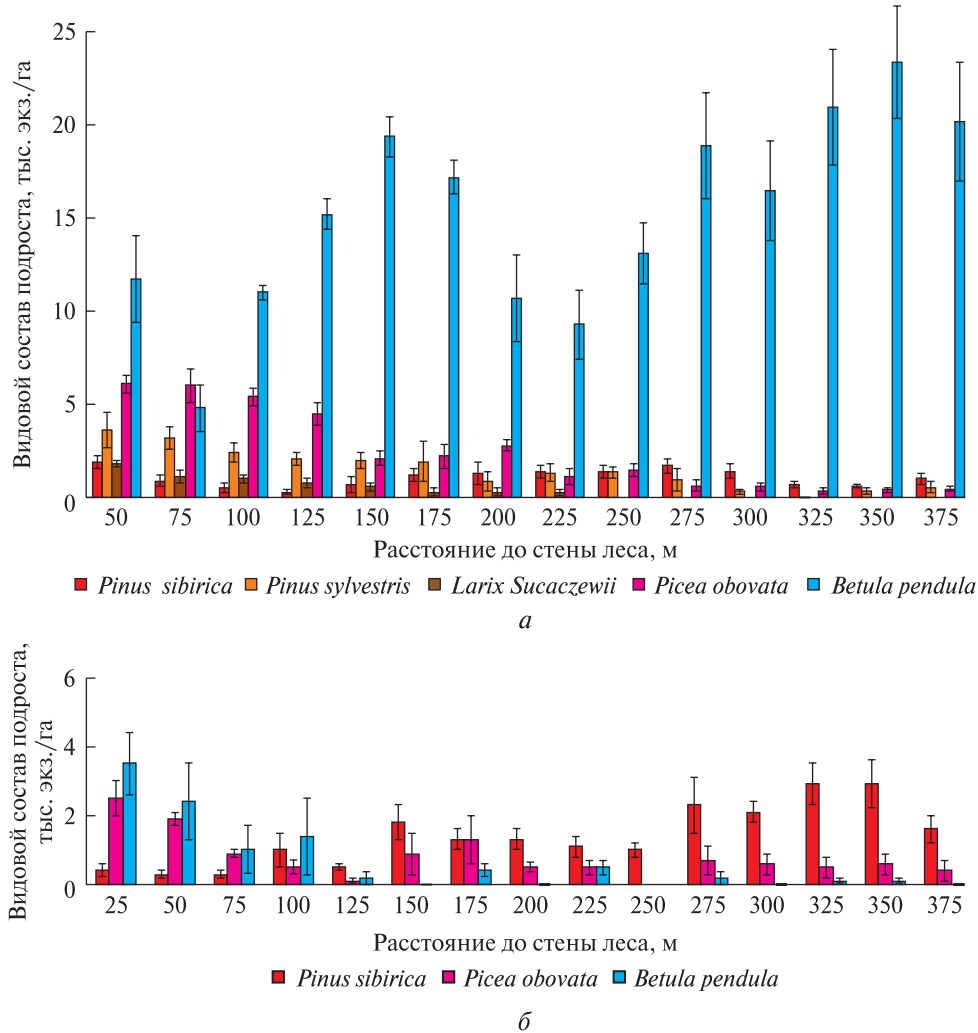
На ПП2 на расстоянии примерно до 200 м от примыкающего сохранившегося древостоя (стены леса) пожаром был уничтожен древостой примерно 3–4-го класса возраста, состоявший из ели, сосны и пихты (*Abies sibirica* Ledeb.) с некоторым участием кедра и березы. На расстоянии свыше 200 м от стены леса пожаром был охвачен темнохвойный молодняк 1–2-го класса возраста, сформировавшийся на вырубке, или так называемая рубка-гарь. Основное отличие вырубко-гарей от гарей заключается в значительно меньшем количестве несгоревших древесных остатков. Они представлены преимущественно полуразложившимися пнями и относительно небольшим количеством стволов, не вырубленных тонкомерных деревьев и оставленных внутрилесосечных обсеменителей.

На обеих пробных площадях (рис. 1), по мере увеличения расстояния от периферийного древостоя-обсеменителя, наблюдается ярко выраженное снижение количества подроста сосны, лиственницы, ели и березы (ПП2), характерное для анемохорных древесных видов [25, 27, 28]. На ПП1 (см. рис. 1, а) в отличие от ПП2 (см. рис. 1, б) в размещении подроста березы такая зависимость его численности от расстояния от стены леса к центральной части гари не выражена, вероятно, в связи с порослевым происхождением подроста. Наоборот, на расстоянии более 250 м от древостоя-обсеменителя количество ее подроста возрастает.

Также на обеих пробных площадях не наблюдается снижения количества подроста кедра с увеличением расстояния от источника семян до 375 м. Более того, его количество на ПП1 (см. рис. 1, а, рис. 2, а) на расстоянии 200...300 м от стены леса почти в 2 раза больше, чем на расстоянии 100...150 м от нее, а на ПП2 (см. рис. 1, б, см. рис. 2, б) на расстоянии 300...350 м от соответствующего древостоя-обсеменителя почти в 4 раза больше, чем на расстоянии до 100 м. Средняя численность его подроста по территориям гарей варьирует в пределах 0,3...2,9 тыс. экз./га в 0,3...2,1 тыс. «гнезд»/га.

Рассматривая характер размещения древесных растений по территории пробных площадей по совокупности их количественных характеристик, формирующиеся здесь дендроценозы территориально можно условно разделить как минимум на две части.

На ПП1 (см. рис. 1, а) формируется типичный послепожарный производный березняк средней высотой 3 м с темнохвойным ярусом высотой

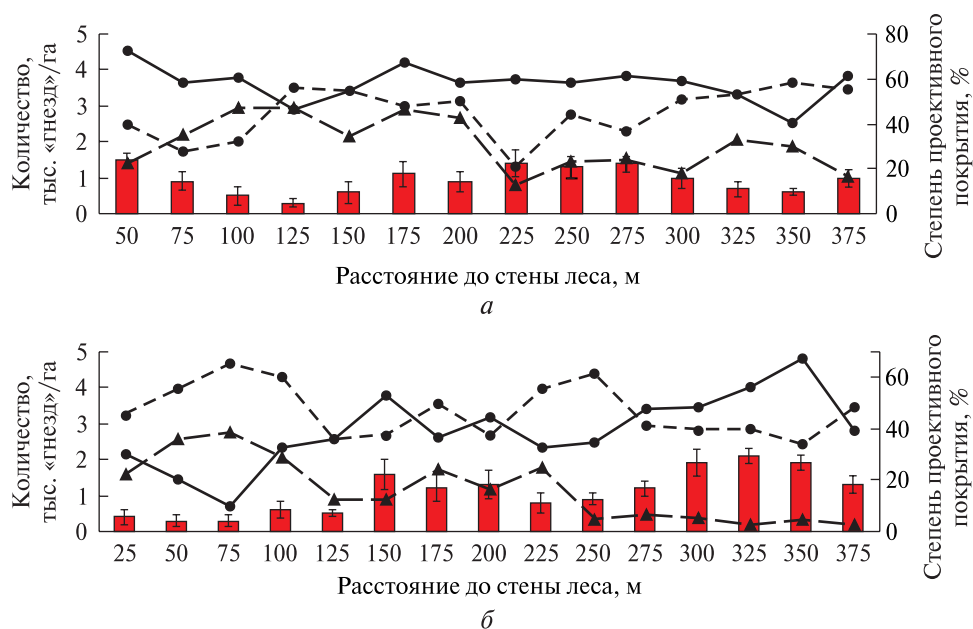


**Рис. 1.** Зависимость изменения видового состава и количества подроста (ВСП, тыс. экз./га) с ошибками средних величин ( $\pm m$ ) от расстояния от стены леса (источника семян), м по профилю площади гарей на пробной площади № 1 (а) и на пробной площади № 2 (б)

**Fig. 1.** Dependence of changes in species composition and number of undergrowth (VSP, thousand ind./ha) with errors of mean values ( $\pm m$ ) on the distance from the forest border (seed source), m along the profile of the area of burned forest areas in trial plot No. 1 (a) and in trial plot No. 2 (b)

около 1 м под его пологом. На расстоянии примерно до 200 м от стены леса при преобладании березы (12,2 тыс. экз./га) в составе древостоя наблюдается значительное участие сосны (2,3 тыс. экз./га) и лиственницы (0,8 тыс. экз./га) высотой 2 м. Под их пологом местами встречаются плотные куртины ели (4,2 тыс. экз./га) с участием кедра (1,0 тыс./га). Причем на расстоянии до 125 м от стены леса плотность подроста ели максимальна (5,5 тыс. экз./га). На расстоянии более 200 м от источника семян в составе верхнего яруса, по сравнению с абсолютным преобладанием березы (17,5 тыс. экз./га), количество сосны (0,7 тыс. экз./га) незначительно, а деревья лиственницы единичны. Во втором ярусе количество подроста ели (0,7 тыс. экз./га) в 1,5–2 раза меньше, чем кедра (1,2 тыс. экз./га), относительная средняя численность которого почти не изменяется.

На ПП2 (см. рис. 1, б) формирование относительно редкого древостоя березы (2,1 тыс. экз./га) происходит на расстоянии не далее 100 м от стены леса. Во втором ярусе, так же как и на ПП1, вблизи стены леса количество подроста ели (1,5 тыс. экз./га) в 3 раза больше, чем кедра (0,5 тыс. экз./га). На расстоянии далее 75...100 м от периферийного источника семян, наоборот, количество ели (0,6 тыс. экз./га) почти в 3 раза меньше, чем кедра (1,7 тыс. экз./га). Вместе с незначительным количеством березы (0,1 тыс. экз./га) роль мелколиственного полога здесь в какой-то мере выполняют кусты (1,8 тыс. экз./га) ивы козьей (*Salix caprea* L.) и рябины (*Sorbus sibirica* Hedl.) высотой 3–4 м, которые относительно равномерно размещены по всей территории гари (см. таблицу). Также встречаются единичные деревья сосны — не более 5...10 экз./га. На ПП1 количество кустов



**Рис. 2.** Зависимость размещения количества «гнезд» подроста *Pinus sibirica* (1), тыс. «гнезд»/га с ошибками средних величин ( $\pm m$ ) от степени проективного покрытия (%) мхов (2), высокостебельных трав (3) и древесного валежа (4) по профилю площади гарей на ПП1 (а) и на ПП2 (б)

**Fig. 2.** Dependence of the number of *Pinus sibirica* undergrowth «clumps» (1), thousand clumps/ha with errors of mean values ( $\pm m$ ) on the degree of projective cover (%) of mosses (2), high-stemmed grasses (3) and woody debris (4) on the profile of the burned forest area at TP1 (a) and TP2 (b)

ивы козьей и рябины в составе верхнего яруса в целом не превышает 0,5 тыс. экз./га.

Такая неоднородность возобновления древесных растений на гарях в одноклассных лесорастительных условиях могла быть обусловлена разной интенсивностью пожара [25, 29] в сочетании с другими экологическими факторами. При слабой интенсивности пожара значительное участие в составе погибшего древостоя березы могло привести к ее обильному порослевому возобновлению на гари [30], чем, вероятно, и вызвано такое ее размещение на ПП1. Также, возможно, на территории гари могли сохраняться ее единичные деревья-обсеменители. Местами, где встречаются довольно плотные куртины подроста ели и сосны, а количество березы меньше чем в 2–4 раза по сравнению с другими участками, интенсивность пожара была, возможно, более высокой. Напочвенный покров с лесной постилкой здесь мог выгореть до минерального горизонта. На ПП2 береза главным образом семенного происхождения. В составе погибшего древостоя ее деревьев могло не быть, или пожар высокой интенсивности мог вызвать полную гибель их корневых систем [25, 29, 30], что исключает порослевое возобновление. Значительно меньшее количество подроста ели, чем на ПП1, даже вблизи примыкающего древостоя, возможно, вызвано менее обильными урожаями семян близлежащих древостоев в первые послепожарные годы.

В отличие от семян анемохорных видов, случайно попадающих на пригодный для прорастания субстрат, кедровки целенаправленно создают запасы семян в конкретном типе напочвенного субстрата с определенными условиями окружающей микросреды [11, 12, 31]. Это является коренным экологическим отличием кедра сибирского и близкородственных видов пятихвойных сосен подсемейства *Cembrae* с бескрылыми семенами от других лесообразующих видов.

При сопряженном изучении плотности «гнезд» подроста кедра и условий среды (см. рис. 2) можно заключить, что варьирование их количества по профилю гарей не связано с расстоянием от источника семян, но отчетливо положительно коррелирует с изменением проективного покрытия мхов (*Polytrichum sp.*) и отрицательно с изменением проективного покрытия высокостебельных трав (*Chamaenerion angustifolium*, *Calamagrostis arundinaceae*) и степени захламленности послепожарным древесным валежом. На ПП2 захламленность территории гари послепожарным древесным валежом на расстоянии до 200 м от стены леса составляет  $24 \pm 3,0$  %, а вырубке-гари (далее 200 м) —  $4 \pm 0,6$  % (см. рис. 2, б). Вероятно, это привело к более обильному здесь возобновлению кедра.

Отчетливая положительная связь обилия подроста кедра со степенью проективного покрытия

мхов и отрицательная — с увеличением сомкнутости полога высокостебельной травянистой и мелколиственной древесной растительности и захламленности не разложившимся древесным валежом является общей для гарей и вырубок [26]. Густая травянистая и кустарниковая растительность и высокая степень захламленности древесными остатками служит механическим препятствием доступу птиц к поверхности почвы [32]. Кедровки избегают таких участков при создании запасов семян в доступном моховом покрове [31]. В связи с чем колебания средней численности «гнезд» подростка связаны со структурой условий напочвенного субстрата и фитоценоза — участков, более или менее предпочитаемых кедровкой. Моховой покров (39...58 %), к которому приурочен подрост кедр, представлен пирогенными политриховыми мхами (*Polytrichum commune*, *P. strictum*). Местами под сомкнутыми куртинами подростка и кустами ивы и рябины встречаются восстанавливающиеся коренные зеленые мхи (*Pleurozium Schreberi*) общим проективным покрытием 10...15 %, на которых подрост кедр не встречается.

В перспективе можно предположить, что по мере продвижения от периферийной к центральной части бывших гарей формирующиеся коренные темнохвойные древостои через длительно-производную мягколиственную стадию [8, 10, 12, 24] по количественному соотношению подростка будут изменяться от ельника с участием кедр до кедровника с участием ели. Тем самым развитие потенциального кедровника [12, 15] и формирование через мелколиственную формацию коренного кедровника в соответствии с концепцией восстановительно-возрастной динамики [6–8] на ПП1 можно прогнозировать на расстоянии свыше 200 м от периферии. На более близком расстоянии на ПП1 и на ПП2 на расстоянии до 100 м от ее границы через производную мягколиственную формацию сформируется ельник [13]. Для улучшения условий формирования кедровника на этой площади в дальнейшем необходимо неоднократное проведение интенсивных рубок ухода [33]. На большей части ПП2 (далее 100 м от периферии) коренной послепожарный кедровник формируется уже в стадии молодняка без участия мелколиственных через относительно краткосрочную кустарниковую стадию. По мере развития древостоя ива козья и рябина останутся в подлеске.

Снижение количества анемохорной ели в составе подростка вызвано значительной удаленностью от источников обсеменения. В то же время кедровка способна разносить семена кедр на расстояния более 10 км [14, 16, 17]. Таким образом, на обширных гарях с увеличением расстояния от периферии к их центральной части, с уменьшением

лесовозобновительной роли ветра происходит относительное увеличение такой роли кедровки. Наиболее ярко она проявляется в зоне горной тундры выше существующей границы леса, где наблюдается значительное накопление подростка кедр, а ель единична [20, 21]. Это явление можно рассматривать, как еще одно определенное коренное экологическое отличие возобновления кедр от анемохорных лесообразующих древесных видов. Теоретически сравнительное снижение количества деревьев ели и увеличение кедр в составе темнохвойных древостоев, сформировавшихся на месте гарей, должно наблюдаться по мере удаления от их периферии. В конечном итоге, гипотетически можно предположить, что относительно «чистые» послепожарные кедровники (при участии более 80 % в составе древостоев) Западной Сибири и равнинно-предгорного Зауралья формировались условно в «центральной» части обширных гарей вдали от периферийных обсеменителей, куда семена анемохорных древесных растений не долетали.

## Выводы

Процессы возобновления и формирования послепожарных коренных зеленомошных ельников и кедровников в однотипных лесорастительных условиях мало чем отличаются. Количественное соотношение подростка кедр сибирского и других древесных видов на гарях обусловлено прежде всего расположением источников семян и изменением расстояния от них и, в какой-то мере, их семенной продуктивностью в тот или иной год. С увеличением расстояния от источника семян к центральной части гари соотношение количества подростка изменяется в пользу кедр, тем самым сравнительная лесовозобновительная роль кедровки возрастает на фоне снижении этой роли ветра. При сочетании значительной удаленности источников семян древесных растений и отсутствия порослевого возобновления мягколиственных на гарях возможно формирование коренных послепожарных кедровников на стадии молодняка.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук».*

## Список литературы

- [1] Усольцев В.А. Биоразнообразие и биопродуктивность лесов в контексте климатогенной биогеографии // Эко-потенциал, 2019. № 1 (25). С. 48–115
- [2] Du E., Tang Y. Distinct climate effects on Dahurian larch growth at an Asian temperate-boreal forest ecotone and nearby boreal sites // Forests, 2022, v. 13, no. 1, p. 27. <https://doi.org/10.3390/f13010027>

- [3] Ivanova N., Fomin V., Kusbach A. Experience of Forest Ecological Classification in Assessment of Vegetation Dynamics // Sustainability, 2022, v. 14, no. 6, p. 3384. <https://doi.org/10.3390/su14063384>
- [4] Zuo Y., Li Y., He K., Wen Y. Temporal and spatial variation characteristics of vegetation coverage and quantitative analysis of its potential driving forces in the Qilian Mountains, China, 2000–2020 // Ecol. Indic., 2022, v. 143, p. 109429. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109429>
- [5] Yonghong S., Fandi L., Gaofeng Z., Zhang K., Qi Z. The biophysical climate mitigation potential of riparian forest ecosystems in arid Northwest China // Science of the Total Environment, 2023, no. 862. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160856>
- [6] Смолоногов Е.П., Кирсанов В.А., Трусов П.Ф. Особенности возрастной динамики темнохвойно-кедровых лесов Северного Урала // Использование и воспроизводство кедровых лесов. Новосибирск: Наука, 1971. С. 72–81.
- [7] Кирсанов В.А. Формирование и развитие кедровника зеленомошно-ягодникового на Северном Урале // Восстановительная и возрастная динамика лесов на Урале и в Зауралье. Труды института экологии растений и животных. Свердловск: Изд-во УНЦ АН СССР, 1976. Вып. 101. С. 104–112.
- [8] Смолоногов Е.П. Эколого-географическая дифференциация и динамика кедровых лесов Урала и Западно-Сибирской равнины (эколого-лесоводственные основы оптимизации хозяйства). Свердловск: РИСО УрО АН СССР, 1990. 288 с.
- [9] Николаева С.А., Бех И.А., Савчук Д.А. Оценка этапов восстановительно-возрастной динамики темнохвойно-кедровых лесов по дендрохронологическим данным (на примере Кеть-Чулымского Междуречья) // Вестник Томского государственного университета. Биология, 2008. № 3(4). С. 180–185.
- [10] Седых В.Н. Формирование кедровых лесов Приобья. Новосибирск: Наука, 1979. 108 с.
- [11] Крылов Г.В., Таланцев Н.К., Козакова Н.Ф. Кедр. М.: Лесная пром-сть, 1983. 216 с.
- [12] Бех И.А., Воробьев В.Н. Потенциальные кедровники. Проблемы кедра. Томск: Институт экологии природных комплексов — Филиал института леса им. В.Н. Сукачева, СО РАН. Вып. 6. 1998. 123 с.
- [13] Ковалев А.П., Шешуков М.А., Позднякова В.В. Метод восстановления кедровых лесов на Дальнем Востоке // ИзВУЗ Лесной журнал, 2018. № 3 (363). С. 77–83.
- [14] Танцырев Н.В. Начальная фаза формирования послепожарных горных кедровников на Северном Урале // Хвойные бореальной зоны, 2022. Т. XL. № 5. С. 395–403. DOI: 10.53374/1993-0135-2022-6-395-403
- [15] Колесников Б.П., Смолоногов Е.П. Некоторые закономерности возрастной и восстановительной динамики кедровых лесов Зауральского Приобья // Проблемы кедра. Труды по лесному хозяйству Сибири. Новосибирск: СО АН СССР, 1960. Вып. 6. С. 21–31.
- [16] Воробьев В.Н. Кедровка и ее взаимосвязи с кедром сибирским. (Опыт количественного анализа). Новосибирск: Наука, 1982. 113 с.
- [17] Lanner R.M. Made for each other. A symbiosis of birds and pines. New York, Oxford: Oxford University Press, 1996, 160 p.
- [18] McLane A.J., Semeniuk C., McDermid G.J., Tomback D.F., Lorenz T., Marceau D. Energetic behavioral-strategy prioritization of Clark's nutcrackers in whitebark pine communities: An agent-based modeling approach // Ecological Modeling, 2017, 354, pp. 123–139
- [19] Schaming T.D., Sutherland C.S. Landscape- and local-scale habitat influences on occurrence and detection probability of Clark's nutcrackers: Implications for conservation // PLoS ONE, 2020, v. 15(5), p. e0233726.
- [20] Санников С.Н., Танцырев Н.В., Петрова И.В. Инвазия популяций сосны сибирской в горную тундру Северного Урала // Сибирский экологический журнал, 2018. № 4. С. 449–461. <https://doi.org/10.15372/SEJ20180406>
- [21] Ivanova N., Tantsyrev N., Li G. Regeneration of *Pinus sibirica* Du Tour in the Mountain Tundra of the Northern Urals against the Background of Climate Warming // Atmosphere, 2022, v. 13, pp. 1196. <https://doi.org/10.3390/atmos13081196>
- [22] Bednekof P.A., Balda R.P. Clark's nutcracker spatial memory: The importance of large, structural cues. // Behavioural Processes, 2014, v. 102, pp. 12–17.
- [23] Омелько А.М., Омелько М.М. Особенности создания кедровой (*Nucifraga caryocatactes* L.) запасов кедровых орешков и питание ими в зимний период во вторичных широколиственных лесах с посадками сосны корейской (*Pinus koraiensis* Sieb. Et Zucc.) // Амурский зоологический журнал, 2017. Т. IX. № 2. С. 102–111.
- [24] Колесников Б.П., Зубарева Р.С., Смолоногов Е.П. Лесорастительные условия и типы лесов Свердловской области. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1973. 176 с.
- [25] Санников С.Н. Экология и география естественного возобновления сосны обыкновенной. М.: Наука, 1992. 257 с.
- [26] Танцырев Н.В. Лесоводственно-экологический анализ естественного возобновления кедрового на сплошных гарях и вырубках в горных лесах Северного Урала: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Екатеринбург, 2012. 23 с.
- [27] Шиманюк А.П. Естественное возобновление на концентрированных вырубках. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 355 с.
- [28] Декатов Н.Е. Мероприятия по возобновлению леса при механизированных лесозаготовках. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1961. 278 с.
- [29] Санников С.Н., Санникова Н.С., Петрова И.В. Очерки по теории лесной популяционной биологии. Екатеринбург: ИО Ботанический сад УрО РАН, 2012. 272 с.
- [30] Фурьев В.В., Киреев Д.М. Изучение послепожарной динамики лесов на ландшафтной основе. Новосибирск: Наука, 1979. 160 с.
- [31] Танцырев Н.В. Анализ размещения кедровой кладовки семян кедрового по следам их зимнего использования // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии имени В.Р. Филиппова, 2020. № 3(60). С. 117–125. DOI: 10.34655/bgsha.2020.60.3.018
- [32] Владышевский Д.В. Экология лесных птиц и зверей. (Кормодобывание и его биоценологическое значение). Новосибирск: Наука, 1980. 261 с.
- [33] Правила ухода за лесами. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 534 от 30.07.2020. URL: <https://base.garant.ru/75083479/> (дата обращения 12.04.2023).

## Сведения об авторе

**Танцырев Николай Владимирович** — канд. биол. ст. наук, науч. сотр. ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук», [89502076608@mail.ru](mailto:89502076608@mail.ru)

Поступила в редакцию 14.06.2023.

Одобрено после рецензирования 30.01.2024.

Принята к публикации 05.04.2024.

# CONDITIONS AND PROSPECTS FOR POST-FIRE GREEN-MOSS SIBERIAN STONE PINE FOREST FORMATION AT YOUNG STAGE

N.V. Tantsyrev

Botanical Garden of the Ural Branch of the RAS, 202a, 8 Marta st., 620144, Yekaterinburg, Russia

89502076608@mail.ru

A comparative quantitative analysis of the natural regeneration of Siberian stone pine (*Pinus sibirica* Du Tour.) and the conditions for the formation of forests with its predominance on two test plots in burned areas of the green-moss forest type in the northern foothill-low mountain part of the Middle Urals is presented. It was found that in both test plots the amount of Siberian stone pine undergrowth ranges from 0,3 to 2,9 thousand ind./ha and, unlike anemochorous woody plants, does not depend on the distance up to 375 m from the peripheral tree stand (forest wall). Moreover, it positively correlated with changes in moss cover and negatively correlated with tall herbaceous cover and post-fire woody debris. On the test plot No. 1 (TP1), the abundant birch undergrowth (12,2...17,5 thousand ind./ha) of vegetative origin, 3 m high, is relatively evenly distributed throughout the burned area. Under its canopy, at a distance of up to 200 m from the forest wall, the number of spruce undergrowth (4,2 thousand ind./ha) is 4 times higher than that of Siberian stone pine (1,0 thousand ind./ha). At a distance of 200 m to 375 m from the forest wall, its quantity (0,7 thousand ind./ha) is 1,5–2 times lower than that of Siberian stone pine (1,2 thousand ind./ha). In test plot No. 2 (TP2), birch undergrowth (2,1 thousand ind./ha) of seed origin is distributed not further than 100 m from the forest wall. In this area, the number of spruce undergrowth (1,5 thousand ind./ha) is 3 times higher than that of Siberian stone pine (0,5 thousand ind./ha). On the other hand, at a distance of more than 100 m from the forest wall, its number (0,6 thousand ind./ha) is 3 times less than that of Siberian stone pine (1,7 thousand ind./ha). Rowan and willow bushes (1,8 thousand ind./ha) with a height of 3–4 m play the role of small-leaved canopy. Thus, with increasing distance from the periphery to the central part of the burned area, the quantitative ratio of undergrowth changes in favor of Siberian stone pine. It is planned to develop spruce forests with Siberian stone pine under the canopy of emerging birch forests at a distance of up to 200 m in TP1 and up to 100 m in TP2 from the peripheral seeding stands. In TP1, the development of the Siberian stone pine forest will take place classically under the canopy of a birch forest through a long-derived soft-leaved formation at a distance of over 200 m from the periphery. In TP2, at a distance of more than 100 m from the periphery, the pine forest is formed by a short-term shrub stage without the participation of small-leaved trees already in the young growth stage.

**Keywords:** *Pinus sibirica*, burned forest areas, green moss Siberian stone pine forest, recovery dynamics, projective covering

**Suggested citation:** Tantsyrev N.V. *Usloviya i perspektivy formirovaniya poslepozharного zelenomoshnogo kedrovnika na stadii molodnyaka* [Conditions and prospects for post-fire green-moss Siberian stone pine forest formation at young stage]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 3, pp. 48–56. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-48-56

## References

- [1] Usoltsev V.A. *Bioraznoobrazie i bioproduktivnost' lesov v kontekste klimatogennoj biogeografii* [Biodiversity and forest bioproductivity in the context of climatogenic biogeography]. *Eko-potencial*, 2019, no. 1 (25), pp. 48–115.
- [2] Du E., Tang Y. Distinct climate effects on Dahurian larch growth at an Asian temperate-boreal forest ecotone and nearby boreal sites. *Forests*, 2022, v. 13, no. 1, p. 27. <https://doi.org/10.3390/f13010027>
- [3] Ivanova N., Fomin V., Kusbach A. Experience of Forest Ecological Classification in Assessment of Vegetation Dynamics. *Sustainability*, 2022, v. 14, no. 6, p. 3384. <https://doi.org/10.3390/su14063384>
- [4] Zuo Y., Li Y., He K., Wen Y. Temporal and spatial variation characteristics of vegetation coverage and quantitative analysis of its potential driving forces in the Qilian Mountains, China, 2000–2020. *Ecol. Indic.*, 2022, v. 143, p. 109429. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109429>
- [5] Yonghong S., Fandi L., Gaofeng Z., Zhang K., Qi Z. The biophysical climate mitigation potential of riparian forest ecosystems in arid Northwest China. *Science of the Total Environment*, 2023, no. 862. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160856>
- [6] Smolonogov E.P., Kirsanov V.A., Trusov P.F. *Osobennosti vozrastnoy dinamiki temnokhvoyno-kedrovnykh lesov Severnogo Urala* [Features of age dynamics of dark coniferous Siberian stone pine forests of the Northern Urals]. *Ispol'zovanie i vosproizvodstvo kedrovnykh lesov* [Use and reproduction of Siberian stone pine forests]. Novosibirsk, Nauka, 1971, pp. 72–81.
- [7] Kirsanov V.A. *Formirovanie i razvitie kedrovnika zelenomoshno-yagodnikovogo na Severnom Urale* [Formation and development of the green moss-berry Siberian stone pine forest in the Northern Urals]. *Vosstanovitel'naya i vozrastnaya dinamika lesov na Urale i v Zaural'e*. Trudy instituta ekologii rasteniy i zhivotnykh [Recovery and age dynamics of forests in the Urals and Trans-Urals. Proceedings of the Institute of Plant and Animal Ecology]. Sverdlovsk: UNTs AN SSSR, 1976, issue 101, pp. 104–112.
- [8] Smolonogov E.P. *Ekologo-geograficheskaya differentsiatsiya i dinamika kedrovnykh lesov Urala i Zapadno-Sibirskoy ravniny (ekologo-lesovodstvennye osnovy optimizatsii khozyaistva)* [Ecological and geographical differentiation and dynamics of Siberian stone pine forests of the Urals and West Siberian Plain (ecological and silvicultural bases of optimization of the economy)]. Sverdlovsk: RISO UrO AN SSSR, 1990, 288 p.
- [9] Nikolaeva S.A., Bekh I.A., Savchuk D.A. *Otsenka etapov vosstanovitel'no-vozrastnoy dinamiki temnokhvoyno-keedrovnykh lesov po dendrokronologicheskim dannym (na primere Ket'-Chulymskogo Mezhdurech'ya)* [Ontogeny of Siberian stone pine in the Ket-Chulym Divide]. *Tomsk State University Bulletin. Biology*, 2008, no. 3(4), pp. 180–185.

- [10] Sedykh V.N. *Formirovanie kedrovyykh lesov Priob'ya* [The formation of Siberian pine forests of Ob region]. Novosibirsk: Nauka, 1979, 110 p.
- [11] Krylov G.V., Talantsev N.K., Kozakova N.F. *Kedr* [Siberian stone pine]. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1983, 216 p.
- [12] Bekh I.A., Vorob'yev V.N. *Potentsial'nye kedrovniki. Problemy kedra* [Potential Siberian stone pine forests. Siberian stone pine problems]. Tomsk: SO RAN, Institut ekologii prirodnykh kompleksov — Filial instituta lesa im. V.N. Sukachyova [Institute of Ecology of Natural Complexes — Branch of the Institute of Forest named after V.N. Sukachev], 1998, rel. 6, 123 p.
- [13] Kovalev A.P., Sheshukov M.A., Pozdnyakova V.V. *Metod vosstanovleniya kedrovyykh lesov na Dal'nem Vostoke* [Method of restoration of cedar forests in the Far East]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2018, no. 3 (363), pp. 77–83.
- [14] Tantsyrev N.V. *Nachalnaya faza formirovaniya poslepozharnykh gornyykh kedrovnikov na Severnom Urale* [The initial phase of the formation of post-fire Siberian stone pine mountain forests in the Northern Urals]. *Khvoynye borealnoy zony* [Conifers of the boreal area], 2022, v. XL, no. 5, pp. 395–403.
- [15] Kolesnikov B.P., Smolonogov E.P. *Nekotorye zakonomernosti voznrastnoy i vosstanovitel'noy dinamiki kedrovyykh lesov Zaural'skogo Priob'ya*. [Some patterns of age and recovery dynamics of Siberian stone pine forests of the Trans-Ural Ob region]. *Problemy kedra. Trudy po lesnomy khozyaystvu Sibiri* [Siberian stone pine problems. Proceedings on forestry of Siberia]. Novosibirsk: SO AN SSSR, 1960, issue 6, pp. 21–31.
- [16] Vorob'ov V.N. *Kedrovka i eyo vzaimosvyazi s kedrom sibirskim. (Opyt kolichestvennogo analiza)* [Nutcracker and its relationship with Siberian stone pine (Experience in quantitative analysis)]. Novosibirsk: Nauka, 1982, 113 p.
- [17] Lanner R.M. *Made for each other. A symbiosis of birds and pines*. New York, Oxford: Oxford University Press, 1996, 160 p.
- [18] McLane A.J., Semeniuk C., McDermid G.J., Tomback D.F., Lorenz T., Marceau D. Energetic behavioral-strategy prioritization of Clark's nutcrackers in whitebark pine communities: An agent-based modeling approach. *Ecological Modeling*, 2017, 354, pp. 123–139
- [19] Schaming T.D., Sutherland C.S. Landscape- and local-scale habitat influences on occurrence and detection probability of Clark's nutcrackers: Implications for conservation. *PLoS ONE*, 2020, v. 15(5), p. e0233726.
- [20] Sannikov S.N., Tantsyrev N.V., Petrova I.V. *Invaziya populyatsiy sosny sibirskoy v gornuyu tundru Severnogo Urala* [Invasion of Siberian pine populations into the mountain tundra of the Northern Urals]. *Siberian Ecological J.*, 2018, no. 4, pp. 449–461. <https://doi.org/10.1134/S1995425518040078>
- [21] Ivanova N., Tantsyrev N., Li G. Regeneration of *Pinus sibirica* Du Tour in the Mountain Tundra of the Northern Urals against the Background of Climate Warming. *Atmosphere*, 2022, v. 13, pp. 1196. <https://doi.org/10.3390/atmos13081196>
- [22] Bednekof P.A., Balda R.P. Clark's nutcracker spatial memory: The importance of large, structural cues. *Behavioural Processes*, 2014, v. 102, pp. 12–17.
- [23] Omel'ko A.M., Omel'ko M.M. *Osobennosti sozdaniya kedrovkoy (Nucifraga caryocatactes L.) zapasov kedrovyykh oreshkov I pitanie imi v zimnij period vo vtorichnykh shirokolistvennykh lesakh s posadkami sosny koreyskoy (Pinus koraiensis Sieb. Et Zucc.)* [Creating caches of nuts by nutcracker (*Nucifraga caryocatactes* L.) and using them in winter time in secondary broadleaved forests with plantations of Korean pine (*Pinus koraiensis* Sieb. Et Zucc.)]. *Amurian Zoological J.*, 2017, no. 9(2), pp. 102–111.
- [24] Kolesnikov B.P., Zubareva R.S., Smolonogov E.P. *Lesorastitel'nyye usloviya i tipy lesov Sverdlovskoy oblasti* [Forest Site Conditions and Forest Types in Sverdlovsk Region]. Sverdlovsk: AN SSSR UNTs, 1973, 176 p.
- [25] Sannikov S.N. *Ekologiya i geografiya estestvennogo vozobnovleniya sosny obyknovnoy* [Ecology and geography of natural renewal of Scotch pine]. Moscow: Nauka, 1992, 257 p.
- [26] Tantsyrev N.V. *Lesovodstvenno-ekologicheskii analiz estestvennogo vozobnovleniya kedra sibirskogo na sploshnykh garyakh i vyrubkakh v gornyykh lesakh Severnogo Urala* [Forestry and ecological analysis of natural regeneration of Siberian stone pine on fire scars and clearings in mountain forests of the Northern Urals]. *Dis. Cand. Sci. (Biol.)*. Ekaterinburg, 2012, 215 p.
- [27] Shimanuk A.P. *Estestvennoe vozobnovlenie na kontsentrirovannykh vyrubkakh* [Natural regeneration in concentrated cutting areas]. Moscow: AN SSSR, 1955, 355 p.
- [28] Dekatov N.E. *Meropriyatiya po vozobnovleniyu lesa pri mkhanizirovannykh lesozagotovkakh* [Measures for reforestation during mechanized logging]. Moscow-Leningrad: Goslesbumizdat, 1961, 278 p.
- [29] Sannikov S.N., Sannikova N.S., Petrova I.V. *Ocherki po teorii lesnoy populyatsionnoy biologii* [Outlines of theory of forest populational biology] Ekaterinburg: Botanical Garden UrB RAS, 2012, 272 p.
- [30] Furyaev V.V., Kireev D.M. *Izucheniye poslepozharnoy dinamiki lesov na landshaftnoy osnove* [Study of post-fire dynamics of forests on a landscape basis]. Novosibirsk: Nauka, SO AN SSSR, 1979, 160 p.
- [31] Tantsyrev N.V. *Analiz razmeshcheniya kedrovkoy kladovok semyan kedra sibirskogo po sledam ikh zimnego ispol'zovaniya* [Analysis of placement of Siberian stone pine seeds storage by nutcracker in traces of their winter use]. *Vestnik Buryatskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii im. V.R. Filippova* [Vestnik of Buryat State Academy of Agriculture named after V. Philippov], 2020, no. 3(60), pp. 117–125. DOI: 10.34655/bgsha.2020.60.3.018
- [32] Vladyshevsky D.V. *Ekologiya lesnykh ptits i zverey. (Kormodobyvanie i ego biotsenoticheskoe znachenie)* [Ecology of forest animals and birds. (Forage extraction and its biogeocenotic significance)]. Novosibirsk: Nauka, 1980, 261 p.
- [33] *Pravila ukhoda za lesami* [Rules of forest care]. Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation № 534 or 30.07.2020. Effective from January 1, 2021. Available at: <https://base.garant.ru/75083479/> (accessed 12.04.2023).

*The work was carried out within the framework of the state assignment of the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.*

## Author's information

**Tantsyrev Nikolay Vladimirovich** — Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Institute Botanic Garden Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 89502076608@mail.ru

Received 14.06.2023.

Approved after review 30.01.2024.

Accepted for publication 05.04.2024.



## ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ЛЕСНЫХ КУЛЬТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

А.В. Кабонен<sup>1</sup>✉, А.В. Грязькин<sup>2</sup>, О.И. Гаврилова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», Россия, 185910, Республика Карелия, г. Петрозаводск, ул. Ленина, д. 33

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет», Россия, 1194018, г. Санкт-Петербург, пер. Институтский 5, корпус «У»

alexkabonen@mail.ru

Представлены данные о росте и развитии 23-летних лесных культур, созданных посевом и посадкой саженцев с закрытой корневой системой на территории Республики Карелия. Посредством фотограмметрической обработки данных с беспилотного летательного аппарата (DJI Mavic Mini 2) построен ортофотоплан лесных культур и определено количественное распределение древесных пород. Установлено, что на всех опытных участках сформировались молодняки с преобладанием сосны обыкновенной. Показано, что использование алгоритмов автоматизированного поиска деревьев по плотным облакам точек позволяет детектировать 91 % деревьев из общей массы облака точек и определять их высоты. Основные выявленные характеристики древостоев, определяемые с помощью БПЛА и наземным методом, различались в пределах точности измерений.

**Ключевые слова:** лесные культуры, рост и развитие, беспилотный летательный аппарат

**Ссылка для цитирования:** Кабонен А.В., Грязькин А.В., Гаврилова О.И. Оценка состояния лесных культур с использованием беспилотного летательного аппарата // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 3. С. 57–66. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-57-66

Опыт искусственного лесовосстановления в Республике Карелия насчитывает несколько десятков лет. Лесные культуры создавались посевом или посадкой на участках с обработкой и без обработки почвы [1]. Эффективность искусственного лесовосстановления хвойными породами проанализирована в работе [2]. Эффективность лесных культур, созданных сеянцами или саженцами, отражена в работе [3]. Биометрические характеристики лесных культур, созданных брикетированным посадочным материалом, имеют более высокие показатели, чем культуры, созданные открытой корневой системой или посевом [4].

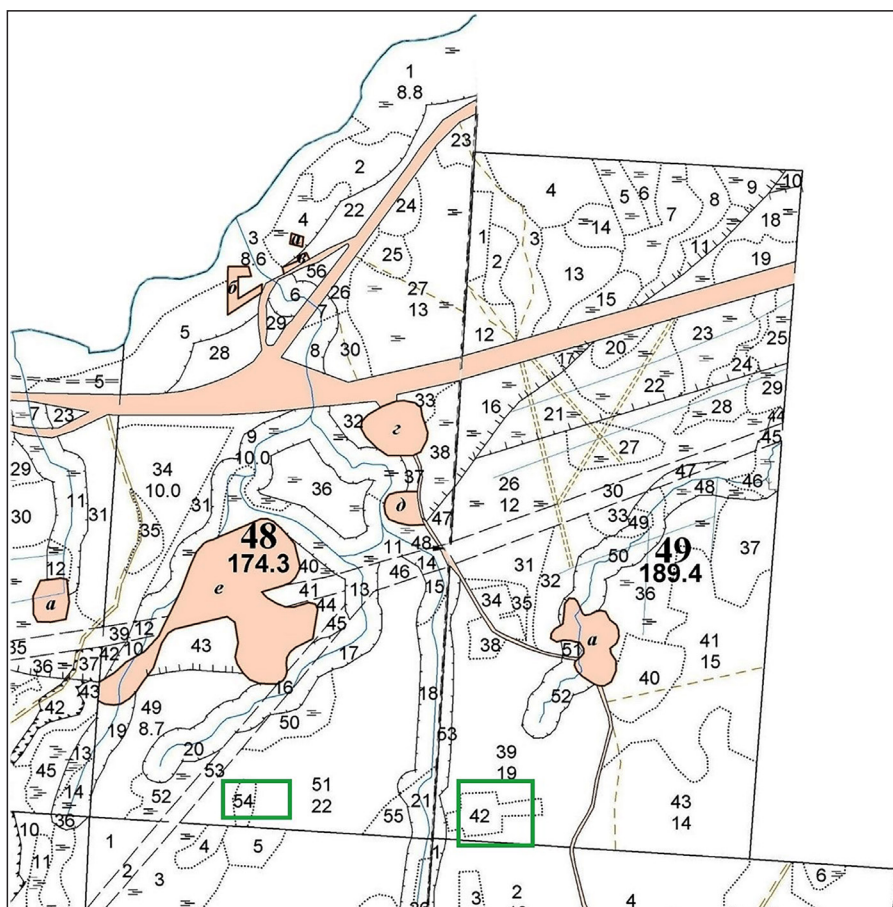
Классический метод оценки успешности лесовосстановления — натурное наземное обследование [5], однако часто не доступно вследствие большой удаленности объектов или плохо развитой инфраструктуры. Такие альтернативные способы, как дешифрирование космических снимков в настоящее время недостаточно проработаны в связи с низким пространственным разрешением и не дают возможности провести объективную оценку лесных культур. В то же время на основании проведенных исследований [6, 7] выявлена высокая точность (84 %) оценки успешности лесовосстановления, проведенной по многолетним рядам мультиспектральных изображений со спутника Landsat с помощью вегетационного индекса NDVI.

Новые открывающиеся возможности обработки данных, полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), а также использование опыта, полученного при применении материалов аэро- и космической фотосъемки, позволяют вывести на современный качественный уровень аналитическое, измерительное и автоматизированное дешифрирование. При определенных условиях съемки и с учетом последующей статистической обработки данных, полученных с помощью БПЛА, этот метод является весьма информативным для определения лесотаксационных характеристик, оценки состояния насаждений, мониторинга процессов лесовосстановления [8–11].

Применение БПЛА для оценки восстановления лесных площадей позволяет существенным образом снизить трудоемкость процессов перевода земель в покрытые лесом площади и получить важную информацию для объективного состояния лесовосстановления на исследуемых территориях [12–14].

В то же время применение БПЛА имеет свои недостатки по сравнению со спутниковыми данными: зависимость от погодных условий (невозможность их применения при сильном ветре, в дождливую погоду, низкой температуре воздуха) и малое покрытие территории съемки в связи с ограниченностью аккумуляторного ресурса (от нескольких минут до 3–4 ч) [15–17].

В работах [18–20] показано, что при исследовании лесовосстановления на удаленных территориях может быть эффективным сочетание



**Рис. 1.** Местоположение объекта исследования на схеме лесоустройства (зеленым контуром обозначены исследуемые участки)

**Fig. 1.** Location of the study plot on the forest inventory scheme (green outline indicates the study areas)

комбинированных методов исследований: применение БПЛА и натурное обследование местности. Сопоставление результатов, полученных из материалов детального обследования и фотоснимков высокого пространственного разрешения, позволяет максимально достоверно характеризовать процессы лесовосстановления на исследуемой территории.

### Цель работы

Цель работы — сравнительная оценка состояния экспериментальных лесных культур, созданных посевом и посадкой на участках с обработкой и без обработки почвы, посредством анализа и сопоставления данных, полученных с помощью БПЛА, с результатами натурного обследования.

### Материалы и методы

Объект исследования — участки лесных культур сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), созданные в кварталах № 48 и 49 Пряжинского центрального лесничества Республики Карелия (рис. 1), с географическими координатами 61°45'15.7"N 33°45'40.8"E. На участках лес-

ных культур распространены песчаные, слабо-подзолистые, грубогумусные на песках почвы бывшего сосняка брусничного, вырубленного в 1991 г. Площадь вырубki 50 га. Спустя 8 лет после вырубki (в 1999 г.) на площади около 6 га были проведены реконструкция молодняка путем удаления лиственных пород с оставлением сосны и обработка почвы покровосдирателем ПДН-1.

На следующий год после проведенных мероприятий (2000) были созданы лесные культуры заложением следующих четырех экспериментальных участков:

- 1) посевом площадками с обработкой почвы;
- 2) рядовой посадкой с обработкой почвы;
- 3) рядовой посадкой без обработки почвы;
- 4) посадкой биогруппами без обработки почвы.

Для лесных культур был выбран однолетний посадочный материал с закрытой корневой системой сосны обыкновенной из лесного питомника. При всех посадках использовалась посадочная труба для семян *Pottiputki*. Густота посадки сосны на 1 га рассчитана следующим образом:

1) посевом площадками с обработкой почвы — 3600 экз./га;

2) рядовой посадкой с обработкой почвы — 3600 экз./га;

3) рядовыми посадками без обработки почвы — 3600 экз./га;

4) посадкой биогруппами без обработки почвы — 2000 экз./га.

Общая площадь обследованных культур составила 2,3 га, из которых 0,8 га были созданы без обработки почвы, а 1,6 га — с обработкой почвы (табл. 1). В настоящий момент площадки заросли лиственными породами (преимущественно березой повислой и рябиной обыкновенной).

При выполнении работ по обследованию культур использовали комбинированный способ сбора материала: метод закладки пробных площадей [5, 21] и аэрофотосъемку с БПЛА с фотограмметрической обработкой данных [22].

Перечет деревьев в молодняках проводили по 2-сантиметровым ступеням толщины. Средний диаметр определяли как средневзвешенную величину. Средняя высота получена с кривой высот, построенной по результатам измерения высоты и диаметра девяти деревьев разного размера, отобранных из преобладающих ступеней толщины. Учет подроста, подлеска и живого напочвенного покрова (ЖНП) проводили на круговых учетных площадках по 10 м<sup>2</sup>. Для подроста и подлеска указывали численность, состав и структуру по высоте и категориям состояния. Для ЖНП фиксировали виды, величину встречаемости и проективное покрытие для каждого вида в составе травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов.

Для аэрофотосъемки использовали квадрокоптер DJI Mavic Mini 2 со следующими техническими характеристиками: стандартной RGB-камерой FC7303 (разрешение изображений 4000×3000 пк) и спутниковыми системами позиционирования GPS и ГЛОНАСС (точность позиционирования ±1,5 м).

Полет БПЛА проходил на высоте 80 м от уровня взлетной площадки по всему объекту съемки. Исходное разрешение 2,5...3 см на 1 пк в зависимости от локальных высот рельефа. Дрон управлялся пилотом вручную с помощью мобильного приложения DJI Fly без использования полетного задания. Полет проходил по параллельным линиям с перекрытием снимков не менее 70 %.

Полученные данные обрабатывали в программном обеспечении Agisoft Metashape Professional Version 1.5.4. Алгоритм обработки данных включал в себя реализацию предлагаемого в руководстве пользователя решения.

Подсчет количества деревьев и измерение высот отдельных деревьев по фотограмметрическим

Т а б л и ц а 1

### Характеристики объектов на момент их создания (1999 г.)

Characteristics of the objects at the time of their establishment (1999)

Номер опытного участка	Площадь, га	Способ создания культур	Схема посадки (посева)	Количество посадочных (посевных) мест, шт./га
1	0,5	Посев с обработкой почвы	Площадками 0,25 м <sup>2</sup> — 0,9×3 м	3600
2	0,9	Посадка с обработкой почвы	Рядами — 0,9×3 м	3600
3	0,5	Посадка без обработки почвы	То же	3600
4	0,3	То же	Биогруппами по 5 шт. 1,5×1,5 м	2000

облакам точек для каждого опытного участка выполняли с помощью среды статистического программирования R version 4.1.2 с использованием функций специализированного пакета lidR version 3.2.3.

Для верификации полученные результаты сравнивали с ручными точкованием по ортофотоплану местности. Для всех корректно детектированных деревьев сравнивали их высоту, полученную в результате автоматических вычислений, с высотой, измеренной при натурном обследовании.

Качество работы алгоритма было определено на основе общепринятых оценок [23–25]. Для этого вычисляли значения полноты обнаружения  $p$ , качества обнаружения  $r$  и средневзвешенной оценки качества  $F$  по формулам:

$$r = \frac{TP}{TP + FN}; \quad (1)$$

$$p = \frac{TP}{TP + FP}; \quad (2)$$

$$F = \frac{2rp}{r + p}, \quad (3)$$

где  $TP$  — число корректно детектированных алгоритмом деревьев;

$FP$  — число ложных срабатываний;

$FN$  — число пропущенных деревьев;

$p$  — полнота обнаружения;

$r$  — качество обнаружения;

$F$  — средневзвешенная оценка качества.

## Результаты и обсуждение

Натурные обследования показали, что через 23 года после создания лесных культур на всех опытных участках сформировались молодняки с преобладанием сосны обыкновенной (табл. 2). Установлено, что доля лесных культур на участках по запасу древесины составляет 38...44 % общего запаса, следовательно, на участках лесных культур преобладают древесные породы естественного происхождения.

На участке лесных культур, созданных посадочным материалом с закрытой корневой системой, отмечен следующий состав древостоя — 44Слк53Сев2Б2Олс+И и общий запас — 189 м<sup>3</sup>/га. Состав древостоя на участке с посевом сосны — 38Слк56Сев4Е2Б+Ос, общий запас — 128 м<sup>3</sup>/га. Результаты полевых обследований свидетельствуют о том, что запас лесных культур сосны, созданных из брикетированных семян, значительно выше по сравнению с культурами, созданными посевом, соответственно 83 и 48 м<sup>3</sup>/га.

Из табл. 2 следует, что создание лесных культур посадкой (опытные участки № 2–4) предпочтительнее посева (№ 1), так как по составу молодняков и запасу лесных культур показатели были более высокие. При этом отпад сосны на участке, созданном посевом, больше, чем на участках лесных культур, созданных посадкой.

На участках посадки лесных культур с обработкой почвы определена существенно большая численность культур сосны — до 50–60 ед. в составе, в то время как на участках без обработки почвы состав молодняка представлен культурами сосны в количестве не более 30...40 %. При этом посадка биогруппами показала минимальное количество

культур в составе. Следует отметить, что предварительное естественное возобновление, произошедшее на участках культур, не смогло бы обеспечить здесь преобладание хвойных пород, а рядовая посадка дает максимальный запас культур сосны (см. табл. 2).

Под пологом лесных культур на всех опытных участках появляется подрост лесообразующих пород общей численностью 620...790 шт./га (табл. 3). На участках без обработки почвы (№ 3, 4) преобладает ель, а на участках с обработкой почвы (№ 1, 2) — лиственные породы. Предположительно, это может быть связано с характеристиками почвенно-грунтовых условий.

Подлесок участвует в формировании лесных фитоценозов на всех участках. Общая численность подлеска составляет от 220 до 410 шт./га. В составе подлеска преобладает рябина (табл. 4).

Видовой состав живого напочвенного покрова на всех площадках представлен небольшим количеством видов (14 шт.), что, вероятно, связано со сравнительно небогатыми почвами. Мохово-лишайниковый ярус представлен зелеными мхами, кукушкиным льном и сфагнумами (табл. 5). В составе травяно-кустарничкового яруса на всех участках преобладает брусника. Мощность органических горизонтов суммарно составляет не более 3...5 см. Подстилка представлена слабо разложившимся опадом. Гумусовый горизонт на всех участках маломощный, частично смыт в нижележащий горизонт — охристый песок. 30–40-сантиметровый слой охристого песка сменяется песчаными отложениями светло-серого цвета. На участках с культурами без обработки почвы наблюдаются следы оглеения, здесь более мощный слой мертвого напочвенного покрова — до 5...8 см, однако гумусовый горизонт также не более 3...5 см.

Т а б л и ц а 2

**Характеристики молодняков на участках лесных культур по данным натурального обследования**  
**Characteristics of young trees in the forestry crop plots according to field survey data**

Характеристики	С обработкой почвы		Без обработки почвы	
	Посев	Посадка	Посадка рядовая	Посадка биогруппами
Средний диаметр ствола, см	8,90	12,9	9,2	8,8
Средняя высота, м	7,9	10,2	8,1	8,0
Состав по численности, %	61Слк9Сев 13Б16Е1О	51Слк17Сев 10Б6Е13Олс3Ив	41Слк12Сев 25Б16Е3Олс3Ив1Ос	31Слк14Сев 28Б13Е8Олс6Ив
Численность, экз./га	3902	2413	4322	5241
Состав по запасу, %	38Слк56Сев 4Е2Б+Ос	44Слк53Сев 2Б2Олс+И	42Слк23Сев 28Б6Олс1Ос+И	35Слк31Сев 28Б6Олс+И
Общий запас, м <sup>3</sup> /га	128	189	138	128
Запас лесных культур сосны, м <sup>3</sup> /га	48	83	76	45
Отпад лесных культур сосны, экз./га	488	448	320	380
Отпад лесных культур сосны, м <sup>3</sup> /га	3,1	3,0	1,9	2,6

Т а б л и ц а 3

**Характеристики подроста на участках по данным натуральных обследований****Characteristics of undergrowth on the plots according to field survey data**

Характеристики	С обработкой почвы		Без обработки почвы	
	Посев	Посадка	Посадка рядовая	Посадка биогруппами
Средняя высота, м	0,72	0,64	0,78	0,85
Состав по численности, %	65Б22Ос12Е	59Ос17Б13Е11Олс	56Е35Ос9Олс	41Е42Ос21Олс
Общая численность, экз./га	620	680	790	750

Т а б л и ц а 4

**Численность и состав подлеска на опытных участках по данным натуральных обследований****Numbers and composition of undergrowth in the trial plots based on field survey data**

Характеристики	С обработкой почвы		Без обработки почвы	
	Посев	Посадка	Посадка рядовая	Посадка биогруппами
Средняя высота, м	0,78	0,71	0,64	0,59
Состав по численности, %	82Ряб18Ива	80Р20Ива	71Р29Ива	75Р25Ива
Общая численность, экз./га	386	410	220	284

Т а б л и ц а 5

**Встречаемость и проективное покрытие живого напочвенного покрова****на опытных участках по данным натуральных обследований****Occurrence and projective cover of living ground cover on trial plots according to field survey data**

Характеристики	С обработкой почвы		Без обработки почвы	
	Посев	Посадка	Посадка рядовая	Посадка биогруппами
Количество видов в травостое, шт.	7	7	6	6
Количество видов в мохово-лишайниковом ярусе, шт.	5	5	9	8
Состав травостоя, %	78 — брусника, 17 — вереск, 3 — луговик, 2 — остальные виды	82 — брусника, 11 — вейник, 3 — вереск, 3 — луговик, 1 — остальные виды	67 — брусника, 12 — черника, 10 — луговик, 4 — вейник, 7 — остальные виды	58 — брусника, 20 — черника, 8 — луговик, 5 — вейник, 9 — остальные виды
Состав мхов, %	100 — зеленые мхи	100 — зеленые мхи	77 — зеленые мхи, 14 — кукушкин лен, 9 — сфанумы	74 — зеленые мхи, 17 — кукушкин лен, 10 — сфагнумы
Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса, %	83	89	91	93
Проективное покрытие мохово-лишайникового яруса, %	32	23	48	45

В результате проведения аэрофотосъемки было получено 651 изображение. Фотограмметрическая обработка позволила получить 336 тыс. связующих точек со средней невязкой (ошибкой репроецирования) 2,1 пк. При фотограмметрической обработке был получен ортофотоплан с пространственным разрешением 2 см/пк (рис. 2) и плотное облако точек в количестве 55 млн шт. со средней плотностью 3,6 тыс. шт./м<sup>2</sup>.

Для анализа распределения породного и количественного состава растительности по территории

выполнено маркирование деревьев на ортофотоплане по опытным участкам, в результате которого определено количественное распределение древесных пород в разном соотношении на всех опытных участках: от 60 (участки без обработки почвы) до 80 % (участки с обработкой почвы) — сосна, 10...22 % — береза. Эти данные согласуются с результатами натурального обследования.

Для анализа трехмерных облаков точек использовали точки, относящиеся только к отдельным опытным участкам (табл. 6).



Рис. 2. Ортофотоплан местности: 1–4 — участки лесных культур

Fig. 2. Image plan of the area: 1–4 — forest crop plots

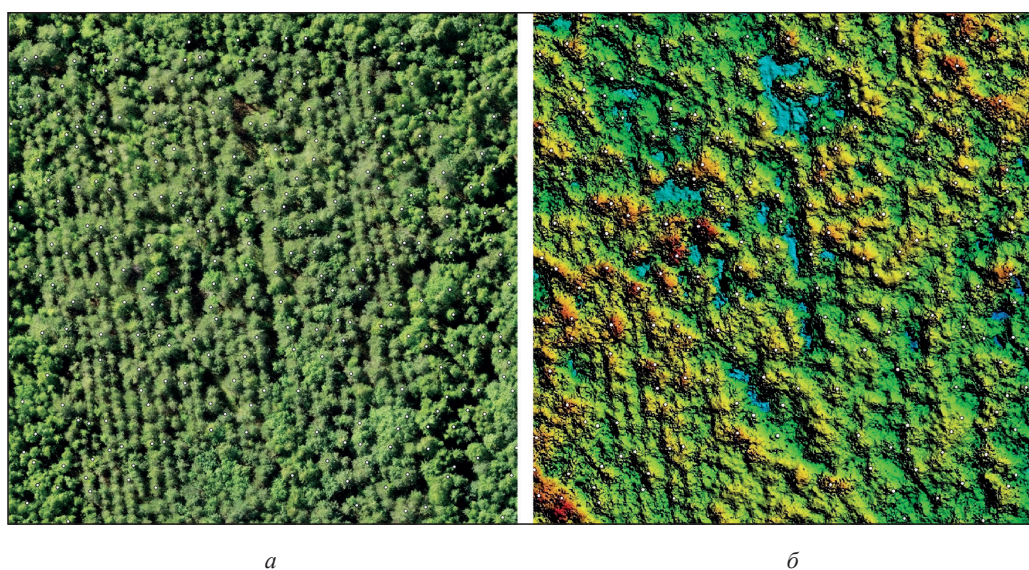


Рис. 3. Обнаруженные верхушки деревьев (отмечены точками) на фрагменте ортофотоплана местности (а) и карты высот (б)

Fig. 3. Detected tree tops (marked with dots) on the image map fragment (a) and height map (b)

В результате запуска алгоритма автоматического поиска деревьев по облакам точек с помощью пакета lidR удалось обнаружить (рис. 3) большую часть деревьев на всех участках и определить их высоты (см. табл. 6).

В результате ручного детектирования по ортофотоплану местности на участке № 1 учтено 250 деревьев, № 2 — 353 дерева, № 3 — 277 деревьев, на участке № 4 — 130 деревьев, а автоматическое детектирование выявило 215, 313, 240 и 118 деревьев соответственно, что в целом составляет около 91 % общего числа деревьев. При этом большинство деревьев (85 %), найденных алгоритмом, были определены корректно. Число

ложных срабатываний и число пропущенных деревьев показали достаточно низкие значения, а средневзвешенная оценка качества составила 0,89, что указывает на высокую эффективность поиска деревьев.

При сравнении высоты отдельных деревьев на фотограмметрических облаках точек с натурными измерениями достоверно удалось определить только высоту для основных лесообразующих пород (сосны, березы). Максимальная высота деревьев сосны обыкновенной не превышала 13 м, а средние значения варьировали от 10,5 до 12,5 м.

Определить высоту подростка для мелкой и средней групп (от 0,5 до 1,5 м) не представлялось

Т а б л и ц а 6

**Технические характеристики плотных облаков точек и результаты автоматического детектирования деревьев на участках № 1–4 (см. табл. 1)**

**Technical characteristics of dense point clouds and results of automatic tree detection in plots 1-4 (see Table 1)**

Параметр	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Число точек в плотном облаке, млн	3,3	5,4	2,8	2,2
Плотность облака точек, тыс. шт./м <sup>2</sup>	3,87	4,13	4,08	3,72
Число точек класса «земная поверхность», млн	0,4	0,7	0,3	0,2
Число точек класса «деревья», млн	2,9	4,7	2,3	1,9
Число найденных деревьев, шт.	215	313	240	118
Число деревьев на ортофотоплане, шт.	250	353	277	130
Средняя высота деревьев, м	10,1	12,6	11,3	10,9

возможным в связи со сложностью их идентифицирования и разделения трехмерных облаков точек, относящихся к разным классам («земная поверхность» и «низкая растительность»). Для решения этой проблемы, вероятно, можно использовать мультиспектральную съемку с ближним инфракрасным (NIR) и/или дальним инфракрасным (RedEdge) каналами спектра [6, 26].

В то же время результаты автоматического поиска отдельных деревьев (шт.) по трехмерным облакам точек показали, что выбранный алгоритм детектирования деревьев на практике дал хорошие результаты, что говорит о возможности его применения для подсчета и оценки высоты деревьев лесных культур. Эти результаты подтверждают уже опубликованные данные, полученные учеными на других объектах [27–30].

## Выводы

Проведенные исследования с помощью БПЛА и натурными обследованиями показали, что эти методы могут быть достаточно успешно использованы для оценки состояния лесных культур. При анализе ортофотоплана местности определяется количественное распределение древесных пород, при этом эти данные согласуются с результатами натурального обследования. По облакам точек возможно автоматизированное обнаружение большей части деревьев и определение их высот. Полученные результаты могут быть использованы для оценки состояния лесных культур на других объектах.

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

## Список литературы

- [1] Соколов А.И. Лесовосстановление на вырубках Северо-Запада России. Петрозаводск: Изд-во Карельского научного центра РАН, 2006. 215 с.
- [2] Соколов А.И. Повышение ресурсного потенциала таежных лесов лесокультурными методами. Петрозаводск: Изд-во Карельского научного центра РАН, 2016. 178 с.
- [3] Гаврилова О.И., Пак К.А., Морозова И.В., Юрьева А.Л. Формирование искусственных сосновых древостоев в условиях карельской таежной зоны // ИзВуз Лесной журнал, 2017. № 4. С. 23–33.
- [4] Морозова И.В., Гаврилова О.И. Закономерности роста лесных культур сосны на начальных стадиях роста (1–5 год) на вырубках южной Карелии // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия: Естественные и технические науки, 2011. № 2 (115). С. 75–78.
- [5] Фетисова А.А., Грязькин А.В., Ковалев Н.В., Гуталь М. Оценка естественного возобновления хвойных пород на сплошных вырубках в условиях Рощинского лесничества // ИзВуз Лесной журнал, 2013. № 6 (336). С. 9–18.
- [6] Белова Е.И., Ершов Д.В. Опыт оценки естественного лесовосстановления на сплошных вырубках по временным рядам Landsat // Лесоведение, 2015. № 5. С. 339–345.
- [7] Аковецкий В.Г., Афанасьев А.В. Методы и технологии интерпретации аэрокосмических мониторинговых наблюдений лесной растительности // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 2. С. 29–36.
- [8] Денисов С.А., Домрачев А.А., Елсуков А.С. Опыт применения квадрокоптера для мониторинга возобновления леса // Вестник ПГТУ. Серия Лес. Экология. Природопользование, 2016. № 4 (32). С. 34–46.
- [9] Вогель Д.К., Юферев В.Г. Оценка лесных насаждений Волго-Ахтубинской поймы на основе фотограмметрической обработки данных цифровой аэросъемки // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса, 2018. № 3 (51). С. 203–209.
- [10] Галецкая Г.А., Вьюнов М.В., Железова С.В., Завалишин С.И. Возможности обработки и анализа данных сверхлегкого БПЛА SenseFly eBee в лесном хозяйстве // Интерэкспо ГЕО-Сибирь, 2015. № 4. С. 11–18.
- [11] Низаметдинов Н.Ф., Моисеев П.А., Воробьев И.Б. Лазерное сканирование и аэрофотосъемка с БПЛА в исследовании структуры лесотундровых древостоев Хибин // ИзВуз Лесной журнал, 2021. № 4. С. 9–22. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-9-22.
- [12] Alonzo M., Andersen H.E., Morton D.C., Cook B.D. Quantifying Boreal Forest Structure and Composition Using UAV Structure from Motion // Forests, 2018, v. 9(3), art. 119. DOI: 10.3390/f9030119
- [13] Алексеев А.С., Данилов Ю.И., Никифоров А.А., Гузюк М.Е., Киреев Д.М. Опыт применения беспилотного летательного аппарата для инвентаризации и оценки опытных лесных культур Лисинской части учебно-опытного лесничества Ленинградской области // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства, 2020. № 2. С. 46–48.

- [14] Алешко Р.А., Алексеева А.А., Шошина К.В., Богданов А.П., Гурьев А.Т. Разработка методики актуализации информации о лесном участке с использованием снимков со спутников и малых БПЛА // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2017. Т. 14(5). С. 87–99.
- [15] Lisein J., Pierrot-Deseilligny M., Bonnet S., Lejeune P. A photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from small Unmanned Aerial System imagery // *Forests*, 2013, v. 4, pp. 922–944. DOI: 10.3390/f4040922
- [16] Jackson M., Portillo-Quintero C., Cox R., Ritchie G., Johnson M., Humagain K., Subedi M. Season, classifier, and spatial resolution impact honey mesquite and yellow bluestem detection using an Unmanned Aerial System // *Rangeland Ecology and Management*, 2020, v. 73(5), pp. 658–672. DOI: 10.1016/j.rama.2020.06.010
- [17] Nuijten R.J.G., Coops N.C., Goodbod T.R.H., Pelletier G. Examining the Multi-Seasonal Consistency of Individual Tree Segmentation on Deciduous Stands Using Digital Aerial Photogrammetry (DAP) and Unmanned Aerial Systems (UAS) // *Remote Sensing*, 2019, v. 11(7), art. 739. DOI: 10.3390/rs11070739
- [18] Watts A.C., Ambrosia V.G., Hinkley E.A. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: classification and considerations of use // *Remote Sensing*, 2012, v. 4, pp. 1671–1692. DOI: 10.3390/rs4061671
- [19] Zahawi R.A., Dandois J.P., Holl K.D., Nadwodny D., Reid J.L., Ellis E.C. Using lightweight unmanned aerial vehicles to monitor tropical forest recovery // *Biological Conservation*, 2015, v. 186, pp. 287–295.
- [20] Медведев А.А., Тельнова Н.О., Кудиков А.В. Картографирование процесса зарастания залежных земель по разновременным высокодетальным данным с космических и беспилотных летательных аппаратов // *Земля из космоса: наиболее эффективные решения*, 2019. № 10 (26). С. 50–55.
- [21] Беляева Н.В., Грязькин А.В., Калинин П.М. Точность учетных работ при оценке естественного лесовозобновления // *Вестник Саратовского госагроуниверситета имени Н.И. Вавилова*, 2012. № 8. С. 7–12.
- [22] Кабонен А.В., Иванова Н.В. Оценка биометрических характеристик деревьев по данным наземного LiDAR и разносезонной аэрофотосъемки в искусственных насаждениях // *Nature Conservation Research. Заповедная наука*, 2023. Т. 8(1). С. 64–83.
- [23] Goutte C., Gaussier E. A probabilistic interpretation of precision, recall and F-score, with implication for evaluation // *Proceedings of the European Conference on Information Retrieval*. Berlin. Heidelberg: Springer, 2005, pp. 345–359.
- [24] Sokolova M., Japkowicz N., Szpakowicz S. Beyond accuracy, F-score and ROC: A family of discriminant measures for performance evaluation // *Proceedings of the Australian Joint Conference on Artificial Intelligence*. Berlin. Heidelberg: Springer, 2008, pp. 1015–1021.
- [25] Li W., Guo Q., Jakubowski M.K., Kelly M. A new method for segmenting individual trees from the LiDAR point cloud // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2012, v. 78(1), pp. 75–84.
- [26] Safonova A., Hamad Y., Dmitriev E., Georgiev G., Trenkin V., Georgieva M., Dimitrov S., Iliev M. Individual tree crown delineation for the species classification and assessment of vital status of forest stands from UAV images // *Drones*, 2021, v. 5(3), art. 77.
- [27] Zhang J., Hud J., Liane J., Fan Z., Ouyang X., Ye W. Seeing the forest from drones: testing the potential of lightweight drones as a tool for long-term forest monitoring // *Biological Conservation*, 2016, v. 198, pp. 60–69.
- [28] Roussel J.R., Auty D., De Boissieu F., Meador A.S., JeanFrançois B. Airborne LiDAR data manipulation and visualization for forestry applications. package «lidR». Version 2.2.2. 2020. URL: <https://www.scinapse.io/papers/3122270431> (дата обращения 12.06.2023).
- [29] Picos J, Bastos G, Míguez D, Alonso L, Armosto J. Individual Tree Detection in a Eucalyptus Plantation Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-LiDAR // *Remote Sensing*, 2020, v. 12 (5). DOI: 10.3390/rs12050885.
- [30] Bennett G., Hardy A., Bunting P., Morgan P., Fricker A. A Transferable and Effective Method for Monitoring Continuous Cover Forestry at the Individual Tree Level Using UAVs // *Remote Sensing*, 2020, v. 12(13). DOI: 10.3390/rs12132115.
- [31] Zhou, J., Proisy, C.; Descombes, X.; Le Maire, G.; Nouvelon, Y.; Stape, J.-L.; Viennois, G.; Zerubia, J.; Coutron, P. Mapping local density of young Eucalyptus plantations by individual tree detection in high spatial resolution satellite images // *For. Ecol. Manag.*, 2013, v. 301, p. 129–141.
- [32] Mohan, M., Silva, A.C.; Klauberg, C.; Jat, P.; Catts, G., Cardil, A., Hudak, T.A.; Dia, M. Individual tree detection from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) derived Canopy Height Model in an open canopy mixed conifer forest // *Forests*, 2017, v. 8, p. 340.
- [33] Wallace, L., Lucieer, A.; Malenovský, Z., Turner, D.; Vopěnka, P. Assessment of Forest Structure Using Two UAV Techniques: A Comparison of Airborne Laser Scanning and Structure from Motion (SfM) Point Clouds // *Forests* 2016, v. 7, p. 62.
- [34] Cosenza, D.N., Soares, V.P., Leite, H.G., Gleriani, J.M. Airborne laser scanning applied to eucalyptus stand inventory at individual tree level // *Pesqui. Agropecu. Bras.*, 2018, v. 53, p. 1373–1382.
- [35] Shinzato, E.T., Shimabukuro, Y.E., Coops, N.C., Tompalski, P., Gasparoto, E.A. Integrating area-based and individual tree detection approaches for estimating tree volume in plantation inventory using aerial image and airborne laser scanning data // *iFor. Biogeosci. For.*, 2017, v. 10, p. 296–302.

## Сведения об авторах

**Кабонен Алексей Валерьевич** <sup>✉</sup> — директор Центра цифрового мониторинга северных и арктических экосистем, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», alexkabonen@mail.ru

**Грязькин Анатолий Васильевич** — д-р биол. наук, профессор кафедры лесоводства, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет»

**Гаврилова Ольга Ивановна** — д-р с.-х. наук, профессор кафедры технологии и организации лесного комплекса, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»

Поступила в редакцию 04.09.2023.

Одобрено после рецензирования 13.02.2024.

Принята к публикации 24.04.2024.



# FORESTRY CROPS ASSESSMENT BY USING UNMANNED AERIAL VEHICLE

A.V. Kabonen<sup>1</sup>✉, A.V. Gryazkin<sup>2</sup>, O.I. Gavrilova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Petrozavodsk State University, 33, Lenin av., 185640, Petrozavodsk, Karelia, Russia

<sup>2</sup>St. Petersburg State Forest Engineering University, 1194018, St. Petersburg, Russia

alexkabonen@mail.ru

Data on the growth and development of 23-year-old forest crops created by sowing and planting seedlings with a root-balled tree system on the territory of the Karelia Republic are presented. Using photogrammetric processing of data from an unmanned aerial vehicle (DJI Mavic Mini 2), an image plan of forestry crops was constructed and the quantitative distribution of tree species was determined. It was established that in all experimental areas, young stands with a predominance of Scots pine had been formed. It is shown that the use of algorithms for automated search for trees in dense point clouds makes it possible to detect 91 % of trees from the total mass of the point cloud and determine their height. The main identified characteristics of forest stands, determined using UAVs and the ground technique, differed within the limits of measurement accuracy.

**Keywords:** forestry crops, growth and development, unmanned aerial vehicle

**Suggested citation:** Kabonen A.V., Gryazkin A.V., Gavrilova O.I. *Otsenka sostoyaniya lesnykh kul'tur s ispol'zovaniem bespilotnogo letatel'nogo apparata* [Forestry crops assessment by using unmanned aerial vehicle]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 3, pp. 57–66. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-57-66

## References

- [1] Sokolov A.I. *Lesovosstanovlenie na vyrubkakh Severo-Zapada Rossii* [Reforestation in the clearings of the North-West of Russia]. Petrozavodsk: KarNTs RAN, 2006, 215 p.
- [2] Sokolov A.I. *Povyshenie resursnogo potentsiala taezhnykh lesov lesokul'turnymi metodami* [Increasing the resource potential of taiga forests by silvicultural methods]. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2016, 178 p.
- [3] Gavrilova O.I., Pak K.A., Morozova I.V., Yurieva A.L. *Formirovaniye iskusstvennykh sosnovykh drevostoev v usloviyakh karel'skoy taezhnoy zony* [Formation of artificial pine stands in the conditions of the Karelian taiga zone]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2017, no. 4, pp. 23–33.
- [4] Morozova I.V., Gavrilova O.I. *Zakonomernosti rosta lesnykh kul'tur sosny na nachal'nykh stadiyakh rosta (1–5 god) na vyrubkakh yuzhnoy Karelii* [Patterns of growth of pine forest plantations at the initial stages of growth (1–5 years) in the clearings of southern Karelia]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Series: Natural and technical sciences*, 2011, no. 2 (115), pp. 75–78.
- [5] Fetisova A.A., Gryaz'kin A.V., Kovalev N.V., Gutal' M. *Otsenka estestvennogo vozobnovleniya khvoynykh porod na sploshnykh vyrubkakh v usloviyakh Roshchinskogo lesnichestva* [Evaluation of natural regeneration of conifers in clear cuts in the conditions of Roshchinsky forestry]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2013, no. 6 (336), pp. 9–18.
- [6] Belova E.I., Ershov D.V. *Opyt otsenki estestvennogo lesovosstanovleniya na sploshnykh vyrubkakh po vremennym ryadam Landsat* [Experience in assessing natural reforestation in clear cuts according to Landsat time series]. *Lesovedenie*, 2015, no. 5, pp. 339–345.
- [7] Akovetsky V.G., Afanasyev A.V. *Metody i tekhnologii interpretatsii aerokosmicheskikh monitoringovykh nablyudenykh lesnoy rastitel'nosti* [Methods and technologies for forest vegetation aerospace monitoring interpretation]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 29–36. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-29-36
- [8] Denisov S.A., Domrachev A.A., Elsukov A.S. *Opyt primeneniya kvadroptera dlya monitoringa vozobnovleniya lesa* [Experience of using a quadcopter to monitor forest renewal]. *Vestnik PGTU. Ser. Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Vestnik of Perm State Technical University. Ser. Forest. Ecology. Nature Management], 2016, no. 4 (32), pp. 34–46
- [9] Vogel' D.K., Yuferev V.G. *Otsenka lesnykh nasazhdeniy Volgo-Akhtubinskoy pomyi na osnove fotogrammetricheskoy obrabotki dannykh tsifrovoy aeros'emki* [Evaluation of forest plantations of the Volga-Akhtuba floodplain based on photogrammetric processing of digital aerial survey data]. *Izvestiya Nizhnevolskogo agrarnogo univ. kompleksa* [News of the Nizhnevolsky Agrarian University Complex], 2018, no. 3 (51), pp. 203–209.
- [10] Galetskaya G.A., V'yunov M.V., Zhelezova S.V., Zavalishin S.I. *Vozmozhnosti obrabotki i analiza dannykh sverkhlegkogo BPLA SenseFly eBee v lesnom khozyaystve* [Possibilities of data processing and analysis of ultralight UAV SenseFly eBee in forestry]. *Interexpo Geo-Siberia*, 2015, no. 4, pp. 11–18.
- [11] Nizametdinov N.F., Moiseev P.A., Vorob'ev I.B. *Lazernoe skanirovaniye i aerofotos'emka s BPLA v issledovanii struktury lesotundrovnykh drevostoev Khibin* [Laser scanning and aerial photography from UAVs in the study of the structure of forest-tundra stands of the Khibiny]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2021, no. 4, pp. 9–22. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-9-22
- [12] Alonzo M., Andersen H.E., Morton D.C., Cook B.D. *Quantifying Boreal Forest Structure and Composition Using UAV Structure from Motion*. *Forests*, 2018, v. 9(3), art. 119. DOI: 10.3390/f9030119
- [13] Alekseev A.S., Danilov Yu.I., Nikiforov A.A., Guzyuk M.E., Kireev D.M. *Opyt primeneniya bespilotnogo letatel'nogo apparata dlya inventarizatsii i otsenki opytnykh lesnykh kul'tur Lisingoy chasti uchebno-opytного lesnichestva Leningradskoy oblasti* [Experience in using an unmanned aerial vehicle for inventory and assessment of experimental forest crops of the Lisingy part of the educational and experimental forestry of the Leningrad region]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva* [Proceedings of the St. Petersburg Scientific Research Institute of Forestry], 2020, no. 2, pp. 46–48.
- [14] Aleshko R.A., Alekseeva A.A., Shoshina K.V., Bogdanov A.P., Gur'ev A.T. *Razrabotka metodiki aktualizatsii informatsii o lesnom uchastke s ispol'zovaniem snimkov so sputnikov i malyykh BPLA* [Development of a methodology for updating information about a forest area using satellite images and small UAVs]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2017, t. 14(5), pp. 87–99.
- [15] Lisein J., Pierrot-Deseilligny M., Bonnet S., Lejeune P. *A photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from small Unmanned Aerial System imagery*. *Forests*, 2013, v. 4, pp. 922–944. DOI: 10.3390/f4040922

- [16] Jackson M., Portillo-Quintero C., Cox R., Ritchie G., Johnson M., Humagain K., Subedi M. Season, classifier, and spatial resolution impact honey mesquite and yellow bluestem detection using an Unmanned Aerial System. *Rangeland Ecology and Management*, 2020, v. 73(5), pp. 658–672. DOI: 10.1016/j.rama.2020.06.010
- [17] Nuijten R.J.G., Coops N.C., Goodbod T.R.H., Pelletier G. Examining the Multi-Seasonal Consistency of Individual Tree Segmentation on Deciduous Stands Using Digital Aerial Photogrammetry (DAP) and Unmanned Aerial Systems (UAS). *Remote Sensing*, 2019, v. 11(7), art. 739. DOI: 10.3390/rs11070739
- [18] Watts A.C., Ambrosia V.G., Hinkley E.A. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: classification and considerations of use. *Remote Sensing*, 2012, v. 4, pp. 1671–1692. DOI: 10.3390/rs4061671
- [19] Zahawi R.A., Dandois J.P., Holl K.D., Nadwodny D., Reid J.L., Ellis E.C. Using lightweight unmanned aerial vehicles to monitor tropical forest recovery. *Biological Conservation*, 2015, v. 186, pp. 287–295.
- [20] Medvedev A.A., Tel'nova N.O., Kudikov A.V. *Kartografirovaniye protsessa zarastaniya zaleznykh zemel' po raznovremennym vysokodetal'nym dannym s kosmicheskikh i bespilotnykh letatel'nykh apparatov* [Mapping the process of overgrowing of fallow lands using multi-time, highly detailed data from space and unmanned aerial vehicles]. *Zemlya iz kosmosa: naibolee effektivnye resheniya* [Earth from Space: the most effective solutions], 2019, no. 10 (26), pp. 50–55.
- [21] Belyaeva N.V., Gryaz'kin A.V., Kalinskiy P.M. *Tochnost' uchetykh rabot pri otsenke estestvennogo lesovozobnovleniya* [Accuracy of accounting work in assessing natural reforestation]. *Vestnik Saratovskogo gos. agr. un-ta im. N.I. Vavilova* [Bulletin of the Saratov State Agr. University named after N.I. Vavilova], 2012, no. 8, pp. 7–12.
- [22] Kabonen A.V., Ivanova N.V. *Otsenka biometricheskikh kharakteristik derev'ev po dannym nazemnogo LiDAR i raznosezonnay aerofotos'emki v iskusstvennykh nasazhdeniyakh* [Assessing the biometric characteristics of trees based on ground-based LiDAR data and multi-seasonal aerial photography in artificial plantings]. *Nature Conservation Research. Zapovednaya nauka* [Nature Conservation Research. Reserve Science], 2023, t. 8(1), pp. 64–83.
- [23] Goutte C., Gaussier E. A probabilistic interpretation of precision, recall and F-score, with implication for evaluation. *Proceedings of the European Conference on Information Retrieval*. Berlin. Heidelberg: Springer, 2005, pp. 345–359.
- [24] Sokolova M., Japkowicz N., Szpakowicz S. Beyond accuracy, F-score and ROC: A family of discriminant measures for performance evaluation. *Proceedings of the Australasian Joint Conference on Artificial Intelligence*. Berlin. Heidelberg: Springer2008, pp. 1015–1021.
- [25] Li W., Guo Q., Jakubowski M.K., Kelly M. A new method for segmenting individual trees from the LiDAR point cloud. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2012, v. 78(1), pp. 75–84.
- [26] Safonova A., Hamad Y., Dmitriev E., Georgiev G., Trenkin V., Georgieva M., Dimitrov S., Iliev M. Individual tree crown delineation for the species classification and assessment of vital status of forest stands from UAV images. *Drones*, 2021, v. 5(3), art. 77.
- [27] Zhang J., Hud J., Liane J., Fan Z., Ouyang X., Ye W. Seeing the forest from drones: testing the potential of lightweight drones as a tool for long-term forest monitoring. *Biological Conservation*, 2016, v. 198, pp. 60–69.
- [28] Roussel J.R., Auty D., De Boissieu F., Meador A.S., JeanFrançois B. Airborne LiDAR data manipulation and visualization for forestry applications. package «lidR». Version 2.2.2. 2020. Available at: <https://www.scinapse.io/papers/3122270431> (accessed 12.06.2023).
- [29] Picos J, Bastos G, Míguez D, Alonso L, Armesto J. Individual Tree Detection in a Eucalyptus Plantation Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-LiDAR. *Remote Sensing*, 2020, v. 12 (5). DOI: 10.3390/rs12050885
- [30] Bennett G., Hardy A., Bunting P., Morgan P., Fricker A. A Transferable and Effective Method for Monitoring Continuous Cover Forestry at the Individual Tree Level Using UAVs. *Remote Sensing*, 2020, v. 12(13), art. 2115. DOI: 10.3390/rs12132115
- [31] Zhou, J., Proisy, C.; Descombes, X.; Le Maire, G.; Nouvellon, Y.; Stape, J.-L.; Viennois, G.; Zerubia, J.; Couteron, P. Mapping local density of young Eucalyptus plantations by individual tree detection in high spatial resolution satellite images // *For. Ecol. Manag.* 2013, v. 301, p. 129–141.
- [32] Mohan, M., Silva, A.C.; Klauber, C.; Jat, P.; Catts, G., Cardil, A., Hudak, T.A.; Dia, M. Individual tree detection from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) derived Canopy Height Model in an open canopy mixed conifer forest // *Forests*, 2017, v. 8, p. 340.
- [33] Wallace, L., Lucieer, A.; Malenovsky, Z., Turner, D.; Vopěnka, P. Assessment of Forest Structure Using Two UAV Techniques: A Comparison of Airborne Laser Scanning and Structure from Motion (SfM) Point Clouds // *Forests* 2016, v. 7, p. 62.
- [34] Cosenza, D.N., Soares, V.P., Leite, H.G., Gleriani, J.M. Airborne laser scanning applied to eucalyptus stand inventory at individual tree level // *Pesqui. Agropecu. Bras*, 2018, v. 53, p. 1373–1382.
- [35] Shinzato, E.T., Shimabukuro, Y.E., Coops, N.C., Tompalski, P., Gasparoto, E.A. Integrating area-based and individual tree detection approaches for estimating tree volume in plantation inventory using aerial image and airborne laser scanning data // *iFor. Biogeosci. For.*, 2017, v. 10, p. 296–302.

*The work was carried out under the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 075-03-2023-128).*

## Authors' information

**Kabonen Aleksey Valer'evich**✉ — Director of the Center for Digital Monitoring of Northern and Arctic Ecosystems of Petrozavodsk State University, alexkabonen@mail.ru

**Gryaz'kin Anatoliy Vasil'evich** — Dr. Sci. (Biology), Professor of the Department of Forestry, St. Petersburg Forestry University

**Gavrilova Ol'ga Ivanovna** — Dr. Sci. (Agriculture), Professor of the Department of Technology and Organization of the Forestry Complex, Petrozavodsk State University

Received 04.09.2023.

Approved after review 13.02.2024.

Accepted for publication 24.04.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
 Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
 Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article  
 The authors declare that there is no conflict of interest

## СУБСТРАТЫ НА ОСНОВЕ ТОРФА И КОМПСТИРОВАННОГО АКТИВНОГО ИЛА АРХАНГЕЛЬСКОГО ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО КОМБИНАТА ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ ПОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА ХВОЙНЫХ ПОРОД

Е.Н. Наквасина<sup>✉</sup>, С.В. Коптев, М.В. Никитина

ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), 163002, Россия, г. Архангельск, ул. Набережная Северной Двины, д. 17

e.nakvasina@narfu.ru

Рассмотрены возможности использования компстированного отработанного активного ила для изготовления торфяного субстрата, предназначенного для использования при выращивании семян основных лесобразующих пород в тепличном комплексе. Охарактеризовано влияние отходов активного ила трехлетней выдержки (биогумус «Архангельский») на водно-физические свойства субстратов (плотность, истинную плотность, пористость, водопоглощение и полную влагоемкость), и их агрохимические показатели (содержание нитратного и аммиачного азота, фосфора и калия, зольность, реакция почвенного раствора), а также влияние разного количества добавленного компстированного активного ила (добавка ила от 10 до 70 % по объему) в верховой торф (степень разложения 15 %) на свойства указанных субстратов. Выявлено, что все свойства субстратов на основе торфа и компстированного активного ила по значимости подразделяются на группы по влагосодержанию, агрофизическим и агрохимическим показателям, из которых наиболее приоритетными можно считать водные свойства, определяющие периодичность полива. Установлено, что при увеличении доли ила в композиции торфяного субстрата закономерно повышаются плотность сложения и истинная плотность субстрата, содержание подвижного фосфора и зольность, но в то же время ил снижает пористость субстрата и водонакопление, уменьшает содержание нитратного азота. Определена наиболее оптимальная добавка к торфу — 20 % компстированных отходов активного ила — при условии дополнительного внесения удобрений и проведения токсикологических экспертиз.

**Ключевые слова:** субстраты, торф, активный ил, водно-физические свойства, агрохимические свойства, требования, семена

**Ссылка для цитирования:** Наквасина Е.Н., Коптев С.В., Никитина М.В. Субстраты на основе торфа и компстированного активного ила Архангельского целлюлозно-бумажного комбината для выращивания посадочного материала хвойных пород // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 3. С. 67–77.

DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-67-77

Стратегия [1] ставит развернутые задачи по лесовосстановлению, поскольку потребность в посадочном материале основных лесобразующих пород имеет тенденцию к возрастанию, особенно в отношении семян и саженцев с закрытой корневой системой. Учитывая перспективы, Архангельский целлюлозно-бумажный комбинат (АЦБК) и группа компаний «Титан» инициировали создание нового селекционного центра с тепличным комплексом в районе г. Новодвинск Архангельской области, рассмотрев возможность подготовки собственных субстратов для выращивания посадочного материала с использованием отработанного активного ила, ранее складированного, а в настоящее время подлежащего утилизации в качестве биотоплива. Такой подход считается перспективным [2, 3]. При правильном использовании указанные субстраты могут служить альтернативой обычным торфяным субстратам [2, 4] и позволят экономить

средства, заменяя коммерческие субстраты и применяя минеральные удобрения [3].

Согласно исследованиям, обезвоженный активный ил очистных сооружений может содержать тяжелые металлы, что ограничивает его использование в качестве мелиоранта или удобрения [5–7]. Тяжелые металлы (ТМ) являются непременной составляющей минеральных фаз илов: глинистых минералов, оксидов и гидроксидов железа и алюминия, карбонатов кальция и магния [8].

Отходы активного ила АЦБК относятся к веществам 5-го класса опасности вследствие наличия в них существенного количества тяжелых металлов, в частности: меди — 840 мг/кг, цинка — 530, железа — 4600, марганца — 1800, никеля — 42 мг/кг. Эти данные превышают нормативы содержания для осадков 1 группы (по меди) в 1,12 раза согласно ГОСТ Р 17.4.3.07–2001. Гельминты при этом не обнаружены.

Учитывая возможную токсичность отходов активного ила, для использования в сельском

и лесном хозяйстве их необходимо перерабатывать, подготавливая к технологическим процессам дальнейшего применения. К наиболее распространенным относятся следующие методы переработки [9–12]: биологические, химические, механические и термические. В некоторых случаях может быть применен комплекс методов.

Переработанный ил можно применять в сельском хозяйстве, смешивая его с почвой, торфом и др. [13]. Предприятие, которое ориентируется на использование отходов активного ила в качестве удобрений, должно ориентироваться на требования стандарта [14], в котором приведены общие требования к осадкам, применяемым в качестве органических или органоминеральных удобрений для рекультивации земель и при размещении на полигонах.

Рекомендации по использованию отходов ила с различных площадок в прошлом веке разрабатывались неоднократно, велись и научные исследования, чаще по осадкам городских сточных вод. Во всех случаях речь шла о повышении плодородия почв и компостировании, в некоторых случаях были подобраны ориентировочные дозы подобных отходов для применения в сельском хозяйстве на минеральных почвах [15, 16].

При использовании малообъемных технологий культивирования требования, предъявляемые к среде выращивания, отличаются значительно большей жесткостью, чем к открытому грунту, где есть возможности для роста корней в неограниченном объеме почвы [17]. Это связано с необходимостью развития корневых систем сеянцев в малом объеме грунта. Кроме того, следует учитывать весь комплекс агро- и физико-химических свойств, в частности наличие компонентов минерального питания (NPK и микроэлементы), влагоемкость и плотность субстрата, что обеспечит необходимый водно-воздушный режим и устойчивость комка, в том числе при посадке на лесокультурную площадь.

## Цель работы

Цель работы — изучение влияния компостируемых отходов активного ила АЦБК на комплекс водно-физических и агрохимических показателей субстратов на основе верхового торфа для отбора наиболее оптимального соотношения торф : ил при изготовлении субстратов для выращивания посадочного материала основных лесобразующих пород в теплице.

## Объекты и методы исследования

Для проведения эксперимента с композициями субстратов был использован верховой торф, заготовленный на чеках предприятия «Архангельская клюква», с глубины торфяной залежи 40...80 см,

со степенью разложения 15 %, что подтверждено проверкой по определению насыпной плотности, согласно работе [18]. В качестве биоактивного компонента использованы компостируемые отходы отработанного активного ила АЦБК в виде биогумуса «Архангельский» (далее — ил) трехлетней выдержки, подготовленного согласно утвержденному в 2014 г. регламенту, и предоставленного фермерским хозяйством «Биолаборатория».

Композиции субстратов из торфа и ила составляли в процентном объемном выражении (в расчете на 1 л субстрата), что считается общепринятым [19]. Дополнительные удобрения и наполнители не использовали. Испытывали комбинации субстратов с долей ила от 10 до 70 %, а также чистый торф и ил (100 %).

Для сравнения подобраны пять вариантов промышленных образцов различного производства из России и Финляндии, применяемых в лесных теплицах Устьянского, Шенкурского, Вельского лесничеств, производства предприятий ООО Pindstrup (два образца), ООО «Велторф» (два образца), «Kekkila». Все субстраты изготовлены на основе белого сфагнового торфа, имеющего сертифицированную степень разложения 15 %, что считается средним для подобных торфов [20]. Подобные субстраты, по мнению В.В. Носникова и др. [21], наиболее подходят для кассетного выращивания.

Для изучения свойств торфа и субстратов, как эталонных, используемых в теплицах Архангельской области, так и композиций на основе торфа и отходов активного ила, применяли основные методы и определяли показатели, характерные для оценки торфов и торфяных субстратов [18, 22]. Расчеты проводили по общепринятым в почвоведении методикам [23].

При этом определяли не только питательную составляющую субстратов (зольность, кислотность, содержание азота, фосфора и калия), но и водно-физические свойства, характеризующие смешение удобрений, равномерность полива, а также их влагонасыщение, уплотненность, воздухонасыщение и др., что позволяет дать оценку и по водно-воздушному режиму, и по режиму питания, и по возможности их регулирования [24].

Использовали размолотый на дробилке ТермМикс торф и сухой компостируемый ил, просеянные через сито 2 мм. При определении водно-физических показателей (2–7 повторностей каждого показателя) использовали торф/субстрат с частицами менее 2 мм; при проведении агрохимических анализов — фракцию менее 1 мм.

Из водно-физических свойств на базе лаборатории почвоведения САФУ определяли плотность сухого торфа/субстрата, плотность сухого веще-

Т а б л и ц а 1

## Сравнительная характеристика исходных компонентов и испытываемых субстратов

## Comparative characteristics of initial components and tested substrates

Субстрат	Плотность сложения, г/см <sup>3</sup>	Истинная плотность, г/см <sup>3</sup>	Влагоемкость, %			Пористость, %	Зольность, %	pH сол	Содержание, мг/100 г			
			2 ч	48 ч	Полная полевая				NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Исходные компоненты												
Торф	0,046 ± 0,003	0,768	1349,1	1795,0	1778,6	94,0	2,3 ± 0,1	3,2 ± 0,1	< 25	54,0 ± 10,0	24 ± 10	56 ± 10
Ил	0,381 ± 0,001	1,440	190,02	228,9	227,0	73,5	29,0 ± 0,5	6,4 ± 0,01	< 25	< 14	1161 ± 38	51 ± 9
Субстраты из смеси компонентов (n = 7; F <sub>теор</sub> = 5,99)												
10 % ила	0,076 ± 0,001	0,875	715,2	939,7	931,5	91,3	15,5 ± 0,4	5,4 ± 0,1	< 25	26,0 ± 5,0	564 ± 24	< 50
20 % ила	0,137 ± 0,003	0,938	627,8	721,5	714,5	85,4	20,3 ± 0,4	6,1 ± 0,1	< 25	19,0 ± 3,4	853 ± 36	< 50
30 % ила	0,188 ± 0,004	1,157	413,5	484,8	480,5	83,8	26,0 ± 0,5	6,2 ± 0,1	< 25	17,0 ± 3,0	950 ± 40	< 50
40 % ила	0,213 ± 0,002	1,245	351,9	389,2	386,4	81,5	28,5 ± 0,5	6,4 ± 0,1	< 25	14,7 ± 2,6	1050 ± 40	< 50
50 % ила	0,230 ± 0,006	1,371	348,0	374,8	372,0	83,2	29,3 ± 0,5	6,4 ± 0,1	< 25	15,5 ± 2,8	1090 ± 50	< 50
60 % ила	0,282 ± 0,003	1,487	311,0	326,1	323,1	81,0	30,6 ± 0,06	6,6 ± 0,1	< 25	< 14	1139 ± 38	< 50
70 % ила	0,297 ± 0,007	1,550	285,7	296,9	294,4	80,8	29,9 ± 0,05	6,6 ± 0,1	< 25	14,1 ± 2,5	1109 ± 37	< 50
F <sub>факт</sub>	23,93	23,09	31,21	22,60	22,56	21,84	5,17	17,69	–	23,97	23,24	–

Примечание. F<sub>факт</sub> — фактический показатель достоверности признака.

ства торфа/субстрата (истинную плотность), пористость, водопоглощение (на 2 ч и 48 ч) и полную влагоемкость общепринятыми методами [22, 23]. Для определения водных свойств использовали металлические цилиндры с сетчатым дном. Плотность сложения торфа/субстрата определяли насыпным методом с использованием металлического цилиндра известного объема. Истинную плотность определяли пикнометрически при соотношении субстрата и воды не более 5 г почвы на 100 см<sup>3</sup> воды.

Агрохимические анализы проводили в испытательной лаборатории ФГБУ САС «Архангельская», по стандартным методикам: зольность — по ГОСТ 11306–2013, п. 7; массовая доля нитратного азота (сухое вещество), % — по ГОСТ 27894.4–88, п. 3; массовая доля аммиачного азота (сухое вещество), % — по ГОСТ 27894.4–88, п. 3; обменная кислотность (ед. pH) — по ГОСТ 11623–89, п. 2; массовая доля калия в пересчете на оксид калия K<sub>2</sub>O (% на сухое вещество) — по ГОСТ 27894.4–88; массовая доля фосфора в пересчете на P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (% на сухое вещество) — по ГОСТ 27894.4–88. Процентное содержание азота, фосфора и калия пересчитали на содержание (в мг/100 г) торфа/субстрата.

Изменчивость изученных признаков/свойств субстратов составляет 3...29%. Близкие значения

средних и срединных переменных указывают на нормальность их распределения. Величина эксцесса для большинства признаков отрицательна, что свидетельствует о растянутости рядов распределения. Асимметрия положительна и находится в пределах 0,04...0,55.

Для выявления связей между факторами и показателями провели корреляционный, дисперсионный, кластерный и факторный анализы. Стратегия объединения объектов кластеризации реализована [24, 25] на основе евклидовых расстояний (по методу ближайшего соседа).

## Результаты и обсуждение

Проведена комплексная оценка композиций субстратов, торфа и ила (100%), а также производственных субстратов, как эталонов (табл. 1, 2).

Корреляционный анализ показал высокий достоверный уровень связей между всеми исследуемыми параметрами и долей ила в композиции субстратов (при  $p < 0,05$ ). Коэффициенты корреляции составили от 0,85 до 0,98 и подтвердили линейную разнонаправленную зависимость изменения показателя при добавлении ила в комбинации к верховому торфу. При увеличении доли ила в композиции субстрата закономерно повышаются плотность сложения и истинная плотность, содержание подвижного фосфора и зольность.

**Средние значения показателей для производственных субстратов,  
применяемых в лесных теплицах Архангельской области**

Average values of indicators for production substrates used  
in forest greenhouses in the Arkhangelsk region

Показатель	Плотность сложения, г/см <sup>3</sup>	Истинная плотность, г/см <sup>3</sup>	Влагоемкость, %			Пористость, %	Зольность, %	pH сол	Содержание, мг/100 г			
			2 ч	48 ч	Полная полевая				NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Среднее значение	0,142 ± 0,012	1,389 ± 0,043	479,3 ± 29,8	626,0 ± 49,7	602,00 ± 48,60	90,4 ± 1,2	5,1 ± 0,5	4,3 ± 0,2	47 ± 16	160 ± 20	260 ± 32	410 ± 34
Q	0,024	0,087	59,6	99,3	97,2	2,45	0,95	0,38	31	36	63	31
Лимиты ±2Q	0,094–0,222	1,215–1,563	360,1–598,4	427,3–824,7	407,6–796,4	85,5–95,3	3,2–7,0	3,5–5,0	0–109	88–232	124–386	384–472

*Примечание.* Q — стандартное отклонение в единицах измерения признака.

В то же время ил снижает пористость субстрата, «подсушивает» его, т. е. снижает водонакопление, и уменьшает содержание нитратного азота.

Влияние градиентного внесения ила в торф доказывается по всем изученным показателям ( $F_{\text{факт}} = 17...31$  при  $F_{\text{теор}} = 5, 99$ ), кроме зольности субстрата ( $F_{\text{факт}} = 5,17$ ). Зольность комбинированного субстрата из торфа и ила зависит от двух компонентов, которые значительно разнятся (2,3 и 29,0 % соответственно). В результате пока в субстрате по объему превалирует торф (10...40 % ила), наблюдается клинальное изменение зольности в сторону ее увеличения. При бóльших долях ила наблюдается стагнация и зольность субстрата достигает величины, соответствующей 100 % компостированному илу без добавок торфа. В то же время, согласно рекомендациям по требованиям к торфяным субстратам [26], его зольность не должна быть выше 10 %.

В данном случае зольность значимо связана с истинной плотностью субстрата (коэффициент корреляции 0,935), содержанием аммиачного азота (коэффициент корреляции –0,965) и содержанием подвижного фосфора (коэффициент корреляции 0,982). Несомненно, эти связи определяются зольностью и содержанием питательных элементов активного ила, в котором содержание фосфатов в 48 раз больше, чем в торфе.

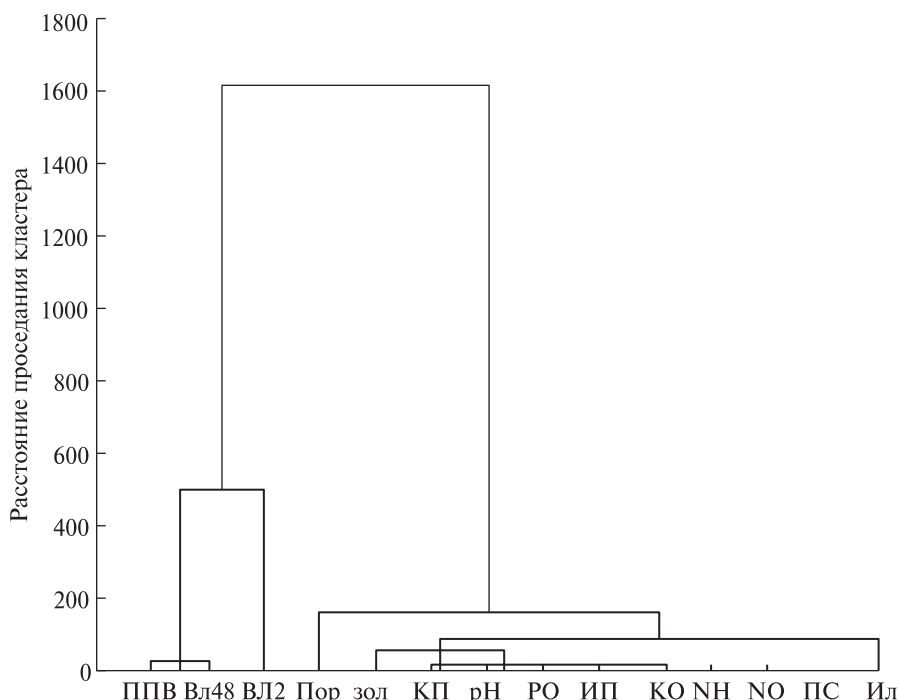
Факторный анализ показал наличие трех комплексных переменных — физических свойств, химических свойств и влагосодержания. Факторные нагрузки переменных физических и водных свойств изменяются в пределах 0,84...0,99, химических свойств — 0,06...0,50. Близкое распределение показателей видно и по кластеризации (рисунок), причем четко заметно выделение в отдельный кластер водосодержания в субстратах. На важность изучения способности субстратов сохранять влагу в кассетах указывали в работе [27], поскольку несоблюдение норм влагопоглощения

субстрата (менее 80 % массы воды в контейнере) может привести к необходимости регулировать поливы в тепличном комплексе.

Различия по свойствам исходных композиционных материалов значительны: они отличаются по физическим свойствам (насыпной плотности, истинной плотности) в 2 раза, по водным свойствам — в 6–8 раз, однако оба имеют высокую пористость: торф — 94, активный ил — 74 %. Это приводит к изменению физических свойств субстратов, формируемых из торфа и ила. Меньшие изменения происходят с пористостью, она стабилизируется при добавлении ила к торфу в количестве 30 %. В то же время добавление 10 % ила с низкой способностью к влагоудержанию отражается в снижении влагоемкости субстрата, и постепенно, по мере клинального увеличения доли ила, влагоемкость субстратов приближается к исходной влагоемкости ила. Переход свойств композиционного субстрата ближе к свойствам ила происходит при соотношении исходных компонентов 1:1. Это может быть опасно при использовании таких субстратов в теплицах, поскольку вызывает его быстрое пересыхание в кассетах.

Агрохимические показатели торфа, так же как и водно-физические, связаны со свойствами исходных компонентов. Исследования показали, что торф имеет очень низкую зольность (2,3 %), высокую кислотность (pH 3,2, что соответствует категории «сильнокислая»). Крайне низкое содержание аммиачного и нитратного азота (54 и менее 25 мг/100 г соответственно). Содержание фосфора для торфа [23] оценивается как высокое (56 мг/100 г), калия — как среднее (24 мг/100 г).

Компостированный активный ил имеет низкую обменную кислотность (pH 6,4 нейтральная). По сумме соединений азота (NH<sub>4</sub> + NO<sub>3</sub>) биогумус имеет низкое содержание — в 3 раза ниже, чем в торфе, т. е. не может служить поставщиком этого элемента в субстрат. Аналогично и с подвижными



Кластеризация показателей свойств субстратов по целевым группам: ППВ — полная полевая влагоемкость, %; Вл48 — максимальная влагоемкость (48 ч), %; Вл2 — влагоемкость через 2 ч, %; Пор — пористость, %; зол — зольность, %; КП — коэффициент пористости, %; рН — обменная кислотность, РО — содержание подвижного фосфора, мг/100 г; ИП — истинная плотность, г/см<sup>3</sup>; КО — содержание подвижного калия, мг/100 г; NH — содержание аммиачного азота, мг/100 г; NO — содержание нитратного азота, мг/100 г; ПС — плотность сложения, г/см<sup>3</sup>; Ил — доля добавки ила в торф, %

Indicators clustering of the substrates properties by target groups: ППВ — total field moisture capacity, %; Вл48 — maximum moisture capacity (48 hours), %; Вл2 — moisture capacity after 2 hours, %; Пор — porosity, %; зол — ash content, %; КП — porosity coefficient, %; рН — exchangeable acidity, РО — the content mobile phosphorus, mg/100 g; ИП — true density, g/cm<sup>3</sup>; КО — the content of mobile potassium, mg/100 g; NH — the content of ammonia, mg/100 g; NO — the content of nitrate ions, mg/100 g; ПС — the density of the substrate structure, g/cm<sup>3</sup>; Ил — the proportion of sludge addition to peat, %

формами калия, его содержание соответствует или несколько ниже, чем у торфа. В то же время в компостируемых отходах активного ила присутствует переизбыток подвижного фосфора, его содержание составляет 1160 мг/100 г. Внесение зафосфаченного активного ила в торф повышает его содержание в субстратах. Е.М. Романов [28] считает достаточным содержание фосфора для обеспечения роста сеянцев на дерново-подзолистой почве в количестве 10...15 мг/100 г почвы. В производственных торфяных субстратах оно не превышает 321 мг/100 г. Однако при приготовлении торфо-минерально-аммиачных удобрений (ТМАУ) допускались и более высокие дозы (более 2000 мг/100 г), хотя коэффициент использования фосфорных удобрений составляет только 2 %, калийных — 4, азотных — около 30 % [29]. При этом подчеркивалась необходимость соблюдения баланса между фосфором, калием и азотом.

Влияние компостируемых отходов активного ила начинается уже при добавлении 10 % к торфу — резко снижается обменная кислотность: рН возрастает от 3,2 до 5,4 (слабокислый), что считается вполне достаточным для выращивания сеянцев хвойных пород [30]. При добавлении 20 и 30 % биогумуса, величина рН достигает 6,1...6,4 (нейтральный), что близко к значению активного ила, тогда как, согласно работе [26], наиболее благоприятная кислотность субстрата при выращивании сеянцев ели составляет 4,0...5,0, сосны — 4,5...5,5, лиственницы — 5,5...6,0.

Различия по нитратному азоту (NO<sub>3</sub>) по результатам анализа не заметны — по всем комбинациям его содержание ниже порогового значения прибора. В то время как по аммиачному азоту (NH<sub>4</sub>) при внесении 10 % биогумуса содержание аммиачного азота резко снижается, а при внесении 20...40 % достигает соответствия со 100%-м компостируемым илом, что составляет при-

мерно 14 мг/100 г. Содержание нитратного азота в комбинационных субстратах соответствует современному и ранее применяемому промышленным субстратам [18] и может быть добавлено внесением удобрений.

Содержание аммиачного азота в комбинационных субстратах на порядок ниже, чем в производственных субстратах, что свидетельствует о необходимости его пополнения за счет внесения азотных удобрений в любых композициях. Увеличение в два раза доз внесения азотных удобрений в условиях тепличного хозяйства на северо-западе России [29] повышает качество получаемого посадочного материала.

Содержание подвижного калия практически не зависит от доли активного ила в композиционном субстрате на основе торфа, что связано с его примерно равным количеством в смешиваемых компонентах. Его содержание на порядок ниже, чем в производственных субстратах и может быть пополнено за счет использования минеральных удобрений для обеспечения соотношения питательных веществ в пропорции N : P : K.

Различия в содержании фосфора в торфе и активном иле резко изменяют его содержание в композиционных субстратах: при внесении в торф 10 % биогумуса содержание оксида фосфора ( $P_2O_5$ ) увеличивается в 20 раз. Стагнация содержания наблюдается с дозы биогумуса 40 %: его содержание достигает 1050 мг/100 г и далее варьирует незначительно при увеличении соотношения ила по сравнению с торфом.

Градиентная добавка компостированного активного ила к торфу меняет некоторые его свойства, что необходимо учитывать при подборе наиболее оптимального сочетания комбинированных субстратов, которые бы соответствовали свойствам используемых производственных субстратов и имеющимся нормативам и рекомендациям. Считается, что приоритетными в комплексе показателей, определяющих свойства субстратов для малообъемных контейнеров в теплицах защищенного грунта, должны быть водно-физические свойства [27, 31, 32], так как агрохимические свойства можно скорректировать внесением макро- и микроудобрений и различных стимулирующих рост семян добавок [28]. При подборе композиций немаловажно учитывать и биоэкологические свойства выращиваемых пород, а также возможность их адаптации при посадке в почвенные условия лесокультурной площади [33].

В России не установлены четкие требования по субстратам для теплиц лесного комплекса, ориентированных на выращивание основных лесобразующих пород, и прежде всего сосны и ели. Ранее нормативы [34] и оптимальные условия для

выращивания семян хвойных пород [18, 28] были установлены, однако изменились технологии выращивания, устройства теплиц, объемы кассет, методы и подходы к оценке субстратов. В настоящее время нормативы и требования к субстратам корректируются как в России, так и за рубежом для различных смесей субстратов и выращиваемых пород [2, 19, 30–32, 35, 36 и др.], однако исследователи нередко обращают внимание лишь на одну сторону качества субстратов — либо водно-физические свойства, либо агрохимические. Объединению данных мешают различные подходы и методы.

Наиболее подходящими для комплексной оценки субстратов являются разработанные в Республике Беларусь технические условия к торфо-перлитным субстратам [26], которые предназначены для выращивания семян основных лесобразующих пород (сосны, ели, лиственницы, дуба) в современных теплицах закрытого грунта, однако и они не дают придержек по физическим свойствам субстратов.

Мы провели комплексную оценку комбинационных субстратов на основе торфа и разных долей внесения по объему активного ила, исходя из имеющихся нормативных и оптимальных данных по свойствам субстратов на предпосевной стадии, ориентируясь на выращивание наиболее распространенных для лесного хозяйства Севера пород — сосны и ели. За эталоны сравнения приняты пять вариантов промышленных субстратов. Подбор композиционных субстратов проводили по доверительному интервалу  $\pm 2Q$  среднего значения признака эталонных субстратов (см. табл. 2) и с учетом имеющихся рекомендаций.

По комплексу показателей наиболее выгодной является композиция, которая наиболее подходит под требования субстратов — 20 % компостированных отходов активного ила. Такую же норму биологически активных веществ на основе отходов или сточных вод и торфа рекомендовали другие исследователи [37]. При использовании композиции 20 % компостированного активного ила не наблюдается изменение кислотно-основных свойств и буферности почвенного раствора, сохраняются запасы азота и калия, присущие торфу и активному илу, нет излишней зафосфаченности субстрата. Именно при этих композициях в необходимых пределах находятся пористость и плотность сложения субстрата.

Повышение доли ила до 30 % увеличивает подщелачивание, зафосфачивание и плотность сложения, заметно снижает скважность и влагоемкость субстрата. При этом у семян будет провоцироваться снижение необходимой грибной биоты для микоризообразования, что связано с усвоением питательных веществ, начиная со вто-



рого года жизни [38]. Повышение плотности субстрата будет не только снижать проникновение для сосущих корней сеянцев, но и увеличивать массу кассет, повышая энергетическую нагрузку в рабочем процессе. В опытах [37] более высокие дозы активного компонента в некоторых случаях снижали рост сеянцев или повышали риски, связанные с прорастанием семян.

Однако для обеспечения нормального роста сеянцев даже при добавлении в субстрат 20 % биогумуса на основе отходов активного ила, необходимо вносить минеральные удобрения — как макроудобрения, так и микроудобрения, прежде всего азотных, калийных удобрений и микроэлементов. Внесение известковых удобрений не требуется, отходы активного ила подщелачивают почву и уже при дозе 40 % кислотность заметно повышается выше требуемых для роста сосны и ели значений pH. При расчетах количества требующихся удобрений можно ориентироваться на рекомендации, разработанные для Устьянского лесопромышленного комплекса [30]. При использовании обезвоженных осадков в результате механической и биологической очистки сточных вод целлюлозно-бумажного производства и хозяйственно-бытовых сточных вод АЦБК экологотоксикологический контроль должен быть постоянным, так как даже при их переработке возможно выживание спорообразующих бактерий и сохранение патогенной микрофлоры [39, 40].

## Выводы

При выращивании сеянцев хвойных пород в тепличном комплексе возможно применение компостированного отработанного активного ила АЦБК, подготовленного согласно утвержденному регламенту и при соблюдении оптимальных доз его внесения, соблюдения нормативов эколого-токсикологических экспертиз. Добавление к верховому торфу компостированного ила в количестве 20 % по объему обеспечит вполне оптимальные условия водно-воздушного режима и агрофизических характеристик, требующихся для малообъемных технологий выращивания сеянцев. Однако, несмотря на органогенный характер вещества и большое содержание фосфатов, применение активного ила требует дополнительного внесения калийных и азотных удобрений для обеспечения соотношения баланса питательных веществ (N : P : K), и микроудобрений. Провокационной при применении компостированного активного ила в отношении выращивания сеянцев хвойных пород, и прежде всего сосны и ели, является щелочная среда реакции почвенного раствора.

В дальнейшем необходимо провести исследования по выращиванию сеянцев основных лесо-

образующих пород с использованием композиционных субстратов, изучить их водно-воздушные и агрофизические свойства в условиях традиционной поливной нормы, проследить устойчивость комка при посадке на лесокультурную площадь.

## Благодарности

*Авторы благодарят Е.М. Романова и студентов САФУ А.А. Горелову, Е.С. Мусееву, П.А. Саулину, А.А. Игамбердиеву за помощь в подготовке композиций субстратов; А.М. Антонова и Г.А. Иванова за предоставленный компостируемый ил.*


*Исследования проводились при финансировании НОЦ «Русская Арктика: современные материалы, методы, технологии», Подпроект 4 «Исследования и подбор оптимального состава субстрата (грунта) для выращивания саженцев (сеянцев) хвойных пород применительно к условиям лесовосстановления на лесосырьевой базе предприятий ООО ПКП «Титан» и АО «Архангельский ЦБК».*

## Список литературы

- [1] Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 20 сентября 2018 г. № 1989-п. URL: <https://cA4eYSe0MObgNpm5hSavTdlxID77KCTL.pdf> (government.ru) (дата обращения 20.09.2023).
- [2] Gabira M.M., Silva R.B.G., Bortolheiro F.P.A.P., Mateus C.M.D.A., Boas R.L.V., Rossi S., Girona M.M., Silva M.R. Composted sewage sludge as an alternative substrate for forest seedlings production // iForest — Biogeosciences and Forestry, 2021, v. 14, iss. 6, pp. 569–575. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifer3929-014>
- [3] Alonso J.M., Pereira R.N., Abel E.L.D. Sewage sludge as substrate in *Schinus terebinthifolia* raddi seedlings commercial production // Sci. Rep., 2022, v. 12, p. 17245. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21314-0>
- [4] Usman Kh., Marwat S., Ghulam S., Khan M.U., Khan N.; Khan M.A., Khalil S. Sewage Sludge: An Important Biological Resource for Sustainable Agriculture and Its Environmental Implications // American J. of Plant Sciences, 2012, v. 03(12), pp. 1708–1721. DOI:10.4236/ajps.2012.312209
- [5] Горелова О.М., Титова К.Ю. Исследования об утилизации активного ила // Ползуновский вестник, 2015. № 4. Т. 1. С. 114–118.
- [6] Панов В.П., Зыкова И.В. Утилизация избыточных активных илов // Экология и промышленность России, 2001. № 12. С. 29–30.
- [7] Панов В.П., Зыкова И.В. Извлечение тяжелых металлов из избыточного активного ила при аэрировании // Журнал прикладной химии, 2005. Вып. 4. С. 608–612.
- [8] Панов В.П., Лысенко И.В., Зыкова И.В. К распределению тяжелых металлов по составляющим активного ила при биологической очистке сточных вод // Проблемы экономики и прогрессивные технологии в текстильной, легкой и полиграфической отраслях промышленности: сборник науч. трудов Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна, 2004. № 6. С. 150–153.

- [9] Горелова О.М., Титова К.Ю. Исследования по утилизации избыточного активного ила // Ползуновский вестник, 2015. № 4. Т. 1. С. 114–118.
- [10] Ляшенко Э.С., Васильева Ж.В. Перспективные методы утилизации биомассы активного ила // Охрана окружающей среды и здоровья человека в Российской Федерации и странах Евросоюза: сборник материалов междунауч.-практ. конф., Мурманск, 31 октября 2014 г. Мурманск: Изд-во Мурманского государственного технического университета, 2014. С. 57–61.
- [11] Haile A., Gelebo G.G., Tesfaye T. Pulp and paper mill wastes: utilizations and prospects for high value-added biomaterials // *Bioresour. Bioprocess*, 2021, v. 8, p. 35. <https://doi.org/10.1186/s40643-021-00385-3>
- [12] Бондарчук Е.В., Толмачев А.Б., Шептунов А.В. Переработка осадков сточных вод в почвогрунт // Яковлевские чтения: сб. докладов XVI Междунар. науч.-техн. конф., посвященной памяти академика РАН С.В. Яковлева, Москва, 15 марта 2021 года. М.: Изд-во Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, 2021. С. 31–33.
- [13] Ручай Н.С., Маркевич Р.М. Экологическая биотехнология. Минск: Изд-во БГТУ, 2006. 312 с.
- [14] Национальный стандарт РФ «Технические принципы обработки осадков сточных вод. Общие требования». М.: Российский институт стандартизации, 2021. 30 с.
- [15] Куликова А.Х., Захаров Н.Г., Вандышев И.А., Шайкин С.В., Карпов А.В. Проблема утилизации осадков сточных вод (ОСВ) в качестве удобрения сельскохозяйственных культур // Вестник Ульяновской сельскохозяйственной академии, 2007. № 1. С. 8–18.
- [16] Чеботарев Н.Т., Найденов Н.Д., Юдин А.А. Агроэкологическая оценка применения осадков сточных вод в качестве удобрений сельскохозяйственных культур // Наука. Мысль, 2016. № 1–2. С. 33–42.
- [17] Робонен Е.В., Зайцева М.И., Чернобровкина Н.П., Чернышенко О.В., Васильев С.Б. Опыт разработки и использования контейнерных субстратов для лесных питомников. Альтернативы торфу // *Resources and Technology*, 2015. v. 12 (1). С. 47–76. DOI: 10.15393/j2.art.2015.3081
- [18] Оценка пригодности субстрата для выращивания посадочного материала с закрытыми корнями / Сост. Белостоцкий Н.Н., Бирцева А.А., Жигунов А.В. Ленинград: Изд-во ЛенНИИЛХ, 1984. 29 с.
- [19] Якушева Т.В., Савицкая Н.В., Выродова С.А. Современные подходы к выращиванию посадочного материала хвойных пород с экс // Актуальные вопросы таежного и притундрового лесоводства на Европейском Севере России. М.: Издательские Технологии, 2023. С. 413–418.
- [20] Крамаренко В.В. Влияние ботанического состава на физические свойства торфа // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки, 2009. Вып. 2. С. 272–280.
- [21] Носников В.В., Соколовский И.В., Домасевич А.А., Юренин А.В., Граник А.М., Селищева О.А., Романчук А.В. Использование метода кондуктометрии для оценки качества субстратов на основе верхового торфа // Труды БГТУ, 2018. Сер. 1. № 2. С. 91–97.
- [22] Мисников О.С., Пухова О.В., Черткова Е.Ю. Физико-химические основы торфяного производства. Тверь: Изд-во Тверского государственного технического университета, 2015. 168 с.
- [23] Наквасина Е.Н., Любова С.В. Почвоведение. Архангельск: Изд-во САФУ, 2016. 146 с.
- [24] Гитис Л.Х. Статистическая классификация и кластерный анализ. М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2003. 157 с.
- [25] Дубовская Л.И., Князев Г.Б. Компьютерная обработка данных методами многомерной прикладной статистики. Томск: ТМЛ-Пресс, 2011. 120 с.
- [26] Субстраты торфяно-перлитные: технические условия ТУ ВУ 100061961.002–2015. URL: <https://mlh.by/lio/2015-5/3.pdf> (дата обращения 12.01.2023).
- [27] Dumroese R.K., Pinto J., Heiskanen J., Tervahauta A., McBurney K., Page-Dumroese D., Englund K. Biochar Can Be a Suitable Replacement for Sphagnum Peat in Nursery Production of *Pinus ponderosa* Seedlings // *Forests*, 2018, v. 9, p. 232.
- [28] Романов Е.М. Выращивание сеянцев древесных растений: биоэкологические и агротехнические аспекты. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2000. 500 с.
- [29] Жигунов А.В. Теория и практика выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой для лесовосстановления: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук, 06.03.01, Москва, 1998. 40 с.
- [30] Жигунов А.В., Соколов А.И., Харитонов В.А. Выращивание посадочного материала с закрытой корневой системой в Устьянском комплексе. Петрозаводск: Изд-во Карельского научного центра РАН, 2016. 43 с.
- [31] Yeager T.H., Fare D.C., J. Lea-Cox J. Best management practices: Guide for producing container-grown plants // *Southern Nurserymen's Assoc.*, 2007, no. 3, pp. 200–203.
- [32] López-López N., Segarra G., Vergara Diaz O., López-Fabal A., Trillas M.I. Compost from forest cleaning green waste and *Trichoderma asperellum* strain T34 reduced incidence of *Fusarium circinatum* in *Pinus radiata* seedlings // *Biological Control*, 2015, v. 95. DOI 10.1016/j.biocontrol.2015.12.014
- [33] Abaurre G.W., Alonso J.M., Saggin Júnior O.J., de Faria S.M. Sewage Sludge Compared with Other Substrates in the Inoculation, Growth, and Tolerance to Water Stress of *Samanea saman* // *Water*, 2021, v. 13, p. 1306. <https://doi.org/10.3390/w13091306>
- [34] Справочник по лесным питомникам. М.: Лесная промышленность, 1983. 280 с.
- [35] Мухортов Д.И. Антропова А.В. Рост и развитие сеянцев сосны обыкновенной в контейнерах при использовании субстратов различной плотности сложения // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: междунар. сб. науч. статей / под ред. Э.А. Курбанова. Йошкар-Ола: Изд-во Поволжского технологического университета, 2019. С. 42–53.
- [36] Wall A., Heiskanen J. Effect of air-filled porosity and organic matter concentration of soil on growth of *Picea abies* seedlings after transplanting // *Scandinavian J. of Forest Research*, 2003, v. 18, iss. 4, pp. 344–350. DOI: 10.1080/02827580310001742
- [37] Тебенькова Д.Н., Лукина Н.В., Воробьев Р.А., Орлова М.А. Всхожесть семян и биометрические параметры сеянцев на субстратах из твердых отходов целлюлозно-бумажной промышленности // *Лесоведение*, 2014. № 6. С. 31–40.
- [38] Наквасина Е.Н. Ритмика роста сеянцев сосны и ели. Биоэкологическое обоснование агротехники выращивания. Архангельск: Изд-во САФУ, 2016. 158 с.
- [39] Исаева А.М. Обработка и утилизация осадков сточных вод. Пенза: Изд-во ПГУАС, 2013. 128 с.
- [40] Дьяков М.С., Вайсман Я.И., Глушанкова И.С. Экологически безопасный способ утилизации твердых отходов биохимических очистных сооружений с получением продуктов, обладающих товарными свойствами // *Экология и промышленность России*, 2013. № 11. С. 53–61.

## Сведения об авторах

**Наквасина Елена Николаевна**  — д-р с.-х. наук, профессор кафедры лесоводства и лесоустройства, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), [nakvasina@yandex.ru](mailto:nakvasina@yandex.ru)

**Коптев Сергей Викторович** — д-р с.-х. наук, доцент, зав. кафедрой лесоводства и лесоустройства, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), [s.koptev@narfu.ru](mailto:s.koptev@narfu.ru)

**Никитина Мария Викторовна** — канд. хим. наук, доцент кафедры теоретической и прикладной химии, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), [m.nikinina@narfu.ru](mailto:m.nikinina@narfu.ru)

Поступила в редакцию 14.16.2023.

Одобрено после рецензирования 23.01.2024.

Принята к публикации 22.03.2024.

# ARKHANGELSK PULP AND PAPER MILL' PEAT-BASED SUBSTRATES AND COMPOSTED ACTIVATED SLUDGE FOR GROWING CONIFEROUS PLANTING STOCK

**E.N. Nakvasina** , **S.V. Koptev**, **M.V. Nikitina**

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 163002, Arkhangelsk, Russia

[nakvasina@yandex.ru](mailto:nakvasina@yandex.ru)

The article discusses the possibilities of using composted activated sludge wasted by Archangelsk pulp mill in order to grow seedlings of the main forest-forming species in a greenhouse complex. The effect of 3 year-aged activated sludge (biohumus «Arkhangelsk») on water-physical properties (density, true density, porosity, water absorption and total moisture capacity), as well as agrochemical parameters (content of nitrate and ammonia nitrogen, phosphorus and potassium, ash content, reaction of soil solution) is shown. The effect on the substrate properties of added composted activated sludge (the addition of sludge from 10 to 70 % by volume) in bog peat (the decomposition degree of 15 %) has been established. It is shown that all the properties of peat-based substrates and composted sludge are divided into three groups according to their significance: moisture content, agrophysical and agrochemical, of which the most priority water properties can be considered, on which the frequency of irrigation depends. It was found that with an increase in the proportion of silt in the composition of the substrate, the addition density and the true density of the substrate, the content of labile phosphorus and ash content naturally increase, but at the same time, silt reduces the porosity of the substrate and water accumulation, reduces the content of nitrate-nitrogen. According to the set of indicators, in comparison with the previously established optimal indicators and standards for growing pine and spruce seedlings, as well as with reference industrial production substrates, the most optimal is the addition to peat of 20 % of the composted waste of activated sludge wasted by Archangelsk pulp mill, subject to additional fertilization and toxicological examinations.

**Keywords:** substrates, peat, activated sludge, water-physical properties, agrochemical properties, requirements, seedlings

**Suggested citation:** Nakvasina E.N., Koptev S.V., Nikitina M.V. *Substraty na osnove torfa i kompostirovannogo aktivnogo ila Arkhangel'skogo tsellyulozno-bumazhnogo kombinata dlya vyrashchivaniya posadochnogo materiala khvoynykh porod* [Arkhangelsk Pulp and Paper Mill' peat-based substrates and composted activated sludge for growing coniferous planting stock]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 3, pp. 67–77. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-67-77

## References

- [1] *Strategiya razvitiya lesnogo kompleksa Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda* [Strategy for the development of the forest complex of the Russian Federation until 2030]. Utverzhdena rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 20 sentyabrya 2018 g. № 1989-р. [Approved by the order of the Government of the Russian Federation of September 20, 2018, no. 1989-p.]. Available at: <https://cA4eYSe0MObgNpm5hSavTdIxID77KCTL.pdf> (government.ru) (accessed 20.09.2023).
- [2] Gabira M.M., Silva R.B.G., Bortolheiro F.P.A.P., Mateus C.M.D.A., Boas R.L.V., Rossi S., Girona M.M., Silva M.R. Composted sewage sludge as an alternative substrate for forest seedlings production. *iForest — Biogeosciences and Forestry*, 2021, v. 14, iss. 6, pp. 569–575. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifer3929-014>
- [3] Alonso J.M., Pereira R.N., Abel E.L.D. Sewage sludge as substrate in *Schinus terebinthifolia raddi* seedlings commercial production. *Sci. Rep.*, 2022, v. 12, p. 17245. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21314-0>
- [4] Usman Kh., Marwat S., Ghulam S., Khan M.U., Khan N.; Khan M.A., Khalil S. Sewage Sludge: An Important Biological Resource for Sustainable Agriculture and Its Environmental Implications. *American J. of Plant Sciences*, 2012, v. 03(12), pp. 1708–1721. DOI:10.4236/ajps.2012.312209

- [5] Gorelova O.M., Titova K.Yu. *Issledovaniya ob utilizatsii aktivnogo ila* [Research on the activated sludge utilization]. Polzunovskiy vestnik [Polzunov Bulletin], 2015, no. 4, v. 1, pp. 114–118.
- [6] Panov V.P., Zykova I.V. *Utilizatsiya izbytochnykh aktivnykh ilov* [Utilization of excess activated sludge]. Ekologiya i promyshlennost' Rossii [Ecology and Industry of Russia], 2001, no. 12, pp. 29–30.
- [7] Panov V.P., Zykova I.V. *Izvlechenie tyazhelykh metallov iz izbytochnogo aktivnogo ila pri aerirovani* [Extraction of heavy metals from excess activated sludge during aeration]. Zhurnal prikladnoy khimii [J. of Applied Chemistry], 2005, iss. 4, pp. 608–612.
- [8] Panov V.P., Lysenko I.V., Zykova I.V. *K raspredeleniyu tyazhelykh metallov po sostavlyayushchim aktivnogo ila pri biologicheskoy ochistke stochnykh vod* [On the distribution of heavy metals according to the components of activated sludge in biological wastewater treatment]. Problemy ekonomiki i progressivnye tekhnologii v tekstil'noy, legkoy i poligraficheskoy otraslyakh promyshlennosti: sbornik nauchnykh trudov SPGUTD [Problems of Economics and Progressive Technologies in the Textile, Light and Printing Industries: Collection of Scientific Works of SPGUTD], 2004, no. 6, pp. 150–153.
- [9] Gorelova O.M., Titova R.Yu. *Issledovaniya po utilizatsii izbytochnogo aktivnogo ila* [Research on the disposal of excess activated sludge]. Polzunovskiy Bulletin, 2015, no. 4, v. 1, pp. 114–118.
- [10] Lyashenko E.S., Vasil'eva Zh.V. *Perspektivnye metody utilizatsii biomassy aktivnogo ila* [Promising methods of utilization of activated sludge biomass]. Okhrana okruzhayushchey sredy i zdorov'ya cheloveka v Rossiyskoy Federatsii i stranakh Evrosoyuza: sbornik materialov mezhd. nauchno-praktich. konferentsii [Environmental protection and human health in the Russian Federation and the EU countries: A collection of materials of the international scientific and practical conference], Murmansk, October 31, 2014. Murmansk: Murmanskiy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet, 2014, pp. 57–61.
- [11] Haile A., Gelebo G.G., Tesfaye T. Pulp and paper mill wastes: utilizations and prospects for high value-added biomaterials. *Bioresour. Bioprocess*, 2021, v. 8, p. 35. <https://doi.org/10.1186/s40643-021-00385-3>
- [12] Bondarchuk E.V., Tolmachev A.B., Sheptunov A.V. *Pererabotka osadkov stochnykh vod v pochvogrunt* [Processing of sewage sludge into soil]. Yakovlevskie chteniya: sbornik dokladov XVI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy pamyati akademika RAN S.V. Yakovleva [Yakovlev Readings: collection of reports of the XVI International Scientific and Technical Conference dedicated to the memory of Academician of the Russian Academy of Sciences S.V. Yakovleva], Moscow, March 15, 2021. Moscow: National Research Moscow State University of Civil Engineering, 2021, pp. 31–33.
- [13] Ruchay N.S., Markevich R.M. *Ekologicheskaya biotekhnologiya* [Ecological biotechnology]. Minsk: BSTU, 2006, 312 p.
- [14] *Natsional'nyy standart RF «Tekhnicheskie printsipy obrabotki osadkov stochnykh vod. Obshchie trebovaniya»* [National standard of the Russian Federation «Technical principles for the treatment of sewage sludge. General requirements»] Moscow: Rossiyskiy institut standartizatsii [Russian Institute for Standardization], 2021, 30 p.
- [15] Kulikova A.Kh., Zakharov N.G., Vandyshev I.A., Shaykin S.V., Karpov A.V. *Problema utilizatsii osadkov stochnykh vod (OSV) v kachestve udobreniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur* [The problem of disposal of sewage sludge (SSW) as a fertilizer for agricultural crops]. Vestnik Ul'yanovskoy sel'skokhozyaystvennoy akademii [Bulletin of the Ulyanovsk Agricultural Academy], 2007, no. 1, pp. 8–18.
- [16] Chebotarev N.T., Naydenov N.D., Yudin A.A. *Agroekologicheskaya otsenka primeneniya osadkov stochnykh vod v kachestve udobreniy sel'skokhozyaystvennykh kul'tur* [Agroecological assessment of the use of sewage sludge as fertilizers for agricultural crops]. Nauka. Mysl' [Nauka. Thought], 2016, no. 1–2, pp. 33–42.
- [17] Robonen E.V., Zaytseva M.I., Chernobrovkina N.P., Chernyshenko O.V., Vasil'ev S.B. *Opyt razrabotki i ispol'zovaniya koteynernykh substratov dlya lesnykh pitomnikov. Al'ternativnyy torfu* [Experience in the development and use of container substrates for forest nurseries. Peat alternatives]. Resources and Technology, 2015, 12 (1), pp. 47–76. DOI: 10.15393/j2.art.2015.3081
- [18] *Otsenka prigodnosti substrata dlya vyrashchivaniya posadochnogo materiala s zakrytymi kornyami* [Assessment of the suitability of the substrate for growing planting material with closed roots: Guidelines]. Comp. Belostotsky N.N., Birtseva A.A., Zhigunov A.V. Leningrad: LenNIILKh, 1984, 29 p.
- [19] Yakusheva T.V., Savitskaya N.V., Vyrodova S.A. *Sovremennyye podkhody k vyrashchivaniyu posadochnogo materiala khvoynnykh porod s zks* [Modern approaches to the cultivation of planting material of coniferous trees with green plants]. Aktual'nye voprosy taezhnogo i pritundrovogo lesovodstva na Evropeyskom Severe Rossii [Current issues of taiga and tundra forestry in the European North of Russia]. Moscow: Publishing Technologies, 2023, pp. 413–418.
- [20] Kramarenko V.V. *Vliyaniye botanicheskogo sostava na fizicheskie svoystva torfa* [Influence of the botanical composition on the physical properties of peat]. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennyye nauki [Izvestiya of the Tula State University. Natural Sciences], 2009, iss. 2, pp. 272–280.
- [21] Nosnikov V.V., Sokolovskiy I.V., Domasevich A.A., Yurenaya A.V., Granik A.M., Selishcheva O.A., Romanchuk A.V. *Ispol'zovanie metoda konduktometrii dlya otsenki kachestva substratov na osnove verkhovogo torfa* [Using the conductometry method to assess the quality of substrates based on high-moor peat]. Trudy BGTU [Proceedings of BSTU], 2018, ser. 1, no. 2, pp. 91–97.
- [22] Misnikov O.S., Pukhova O.V., Chertkova E.Yu. *Fiziko-khimicheskie osnovy torfyanogo proizvodstva* [Physical and chemical bases of peat production]. Tver: Tver State Technical University, 2015, 168 p.
- [23] Nakvasina E.N., Lyubova S.V. *Pochvovedenie* [Soil science], Arkhangelsk: NArFU, 2016, 146 p.
- [24] Gitis L.Kh. *Statisticheskaya klassifikatsiya i klasternyy analiz* [Statistical classification and cluster analysis]. Moscow: Moscow State Mining University], 2003, 157 p.
- [25] Dubovskaya L.I., Knyazev G.B. *Komp'yuternaya obrabotka dannykh metodami mnogomernoy prikladnoy statistiki* [Computer data processing by methods of multivariate applied statistics]. Tomsk: TML-Press, 2011, 120 p.
- [26] *Substraty torfjano-perlitnye: tekhnicheskie usloviya TU BY 100061961.002–2015* [Substrates peat-pearlite specifications TU BY 100061961.002–2015]. Available at: <https://mlh.by/lioh/2015-5/3.pdf> (accessed 12.01.2023).
- [27] Dumroese R.K., Pinto J., Heiskanen J., Tervahauta A., McBurney K., Page-Dumroese D., Englund K. Biochar Can Be a Suitable Replacement for Sphagnum Peat in Nursery Production of Pinus ponderosa Seedlings. *Forests*, 2018, v. 9, p. 232.
- [28] Romanov E.M. *Vyrashchivaniye seyantsev drevesnykh rasteniy: bioekologicheskie i agrotekhnicheskie aspekty* [Growing seedlings of woody plants: bioecological and agrotechnical aspects]. Yoshkar-Ola: MarGTU, 2000, 500 p.
- [29] Zhigunov A.V. *Teoriya i praktika vyrashchivaniya posadochnogo materiala s zakrytoy kornevoy sistemoy dlya lesovosstanovleniya* [Theory and practice of growing planting material with a closed root system for reforestation]. Dis. Dr. Sci. (Agric.) 06.03.01], 1998, 40 p.

- [30] Zhigunov A.V., Sokolov A.I., Kharitonov V.A. *Vyrashchivanie posadochnogo materiala s zakrytoy kornevoy sistemoy v Ust'yanskom komplekse* [Growing planting material with a closed root system in the Ustyansky complex. Practical recommendations]. Petrozavodsk: Karel'skiy nauchnyy tsentr RAN [Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2016, 43 p.
- [31] Yeager T.H., Fare D.C., J. Lea-Cox J. Best management practices: Guide for producing container-grown plants, Southern Nurserymen's Assoc., 2007, no. 3, pp. 200–203.
- [32] López-López N., Segarra G., Vergara Diaz O., López-Fabal A., Trillas M.I. Compost from forest cleaning green waste and *Trichoderma asperellum* strain T34 reduced incidence of *Fusarium circinatum* in *Pinus radiata* seedlings. *Biological Control*, 2015, v. 95. DOI 10.1016/j.biocontrol.2015.12.014
- [33] Abaurre G.W., Alonso J.M., Saggin Júnior O.J., de Faria S.M. Sewage Sludge Compared with Other Substrates in the Inoculation, Growth, and Tolerance to Water Stress of *Samanea saman*. *Water*, 2021, v. 13, p. 1306. <https://doi.org/10.3390/w13091306>
- [34] *Spravochnik po lesnym pitomnikam* [Directory of forest nurseries]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forestry industry], 1983, 280 p.
- [35] Mukhortov D.I., Antropova A.V. *Rost i razvitie seyantsev sosny obyknovennoy v konteynerakh pri ispol'zovanii substratov razlichnoy plotnosti slozheniya* [Growth and development of seedlings of Scotch pine in containers using substrates of different density of addition]. *Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distantsionnyy monitoring: mezhdunarodnyy sbornik nauchnykh statey* [Forest ecosystems under climate change: biological productivity and remote monitoring: international collection of scientific articles]. Ed. E.A. Kurbanov. Yoshkar-Ola: Volga State Technological University, 2019, pp. 42–53.
- [36] Wall A., Heiskanen J. Effect of air-filled porosity and organic matter concentration of soil on growth of *Picea abies* seedlings after transplanting // *Scandinavian J. of Forest Research*, 2003, v. 18, iss. 4, pp. 344–350. DOI: 10.1080/02827580310001742
- [37] Teben'kova D.N., Lukina N.V., Vorob'ev R.A., Orlova M.A. *Vskhozhest' semyan i biometricheskie parametry seyantsev na substratakh iz tverdykh otkhodov tsellyulozno-bumazhnoy promyshlennosti* [Seed germination and biometric parameters of seedlings on substrates from solid waste of the pulp and paper industry]. *Lesovedenie* [Forest science], 2014, no. 6, pp. 30–41.
- [38] Nakvasina E.N. *Ritmika rosta seyantsev sosny i eli. Bioekologicheskoe obosnovanie agrotekhniki vyrashchivaniya* [Growth rhythm of pine and spruce seedlings. Bioecological substantiation of agrotechnics of cultivation]. Arkhangelsk: NArFU, 2016, 158 p.
- [39] Isaeva A.M. *Obrabotka i utilizatsiya osadkov stochnykh vod* [Treatment and disposal of sewage sludge]. Penza: PGUAS, 2013, 128 p.
- [40] D'yakov M.S., Vaysman Ya.I., Glushankova I.S. *Ekologicheski bezopasnyy sposob utilizatsii tverdykh otkhodov biokhimicheskikh ochistnykh sooruzheniy s polucheniem produktov, obladayushchikh tovarnymi svoystvami* [Ecologically safe method of utilization of solid wastes of biochemical treatment facilities with obtaining products with commercial properties]. *Ekologia i promyshlennost' v Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2013, no. 11, pp. 53–61.

## Acknowledgments

*The authors are grateful to E.M. Romanov and A.A. Gorelova, E.S. Moiseeva, P.A. Saulina, A.A. Igamberdieva for help in preparing substrate compositions; A.M. Antonov and G.A. Ivanov for providing composted sludge.*

*The research was supported by the World-class Scientific and Educational Center «Russian Arctic: New Materials, Technologies and research Methods», Subproject 4 «Research and selection the optimal composition of the substrate (soil) for growing seedlings of coniferous species to the reforestation conditions on the forest raw material base of the enterprises of OOO PKP «Titan» and «Arkhangelsk Pulp and Paper Mill».*

## Authors' information

**Nakvasina Elena Nikolaevna**  — Dr. Sci. (Agriculture), Professor of the Department of Forestry and Forest Management of Northern Arctic Federal University named after M.V. Lomonosov, [nakvasina@yandex.ru](mailto:nakvasina@yandex.ru)

**Koptev Sergey Viktorovich** — Dr. Sci. (Agriculture), Associate Professor, Head of the Department of Forestry and Forest Management of Northern Arctic Federal University named after M.V. Lomonosov, [s.koptev@narfu.ru](mailto:s.koptev@narfu.ru),

**Nikitina Maria Viktorovna** — Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor of the Northern Arctic Federal University named after M.V. Lomonosov, [m.nikinina@narfu.ru](mailto:m.nikinina@narfu.ru)

Received 14.06.2023.

Approved after review 23.01.2024.

Accepted for publication 22.03.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article  
The authors declare that there is no conflict of interest

## УТОЧНЕНИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О МЕХАНИЗМЕ ВОДОУСТОЙЧИВОСТИ ПОЧВ

Д.А. Ушкова<sup>1</sup>, И.В. Горепекин<sup>1</sup>, Г.Н. Федотов<sup>1✉</sup>, Ю.П. Батырев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Россия, 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 12, Факультет почвоведения МГУ

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

gennadiy.fedotov@gmail.com

Агрегатный состав почв и водоустойчивость агрегатов связаны с органическим веществом почв, его количеством и качеством, но до сих пор не существует удовлетворительной гипотезы, объясняющей механизмы этой взаимосвязи. Цель работы — проверка значимости влияния расклинивающего давления воды на водоустойчивость почв и уточнение представлений о механизме данного свойства. Оценку водоустойчивости почв проводили авторским методом лезвий. Проведенная проверка показала, что его корреляция с методом мокрого просеивания по Саввинову, проведенная на 17 образцах почв, превышает 85 %. В ходе экспериментов установлено, что при контакте агрегатов с водой их водоустойчивость экспоненциально снижается. Снижение водоустойчивости при контакте с водой принято объяснять расклинивающим давлением воды. Проведенные эксперименты по замене воды на растворы соли при капиллярном увлажнении агрегатов не подтвердили эту теорию. Поэтому при помощи растрового электронного микроскопа был проверен раствор, полученный после капиллярного контакта агрегатов с водой. Установлено, что при капиллярном контакте агрегатов с водой туда выделяется лабильная части гуминовых веществ. Таким образом, водоустойчивость почвенных образцов при контакте с водой снижается за счет выхода гуминовых веществ и уменьшения количества структурообразующих связей в агрегате.

**Ключевые слова:** водоустойчивость и органическое вещество почв, расклинивающее давление воды, влияние температуры на водоустойчивость, дифильность органического вещества почв

**Ссылка для цитирования:** Ушкова Д.А., Горепекин И.В., Федотов Г.Н., Батырев Ю.П. Уточнение представлений о механизме водоустойчивости почв // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 3. С. 78–86. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-78-86

Одним из ключевых требований, предъявляемых к почвам при возделывании на них сельскохозяйственных растений, является их структурное состояние. Почвы, имеющие агрономически ценную структуру, обладают некоторыми важными физическими свойствами: рыхлостью, облегчающей прорастание семян и развитие из них растений [1], благоприятным для развития растений водно-воздушным и тепловым режимами, противозерозионной устойчивостью [2, 3]. Они сохраняются лишь в том случае, когда почвы способны противостоять разрушающему действию воды [4, 5] и агротехнологическим воздействиям, т. е. быть водо- и механически устойчивыми [6–9]. Такие типы устойчивости почв определяют количество и прочность внутриагрегатных связей [7], обеспечивающих в определенном диапазоне влажности существование почвенных агрегатов в нераздельном, едином состоянии. По-видимому, оба вида устойчивости почвенных агрегатов определяются прежде всего существованием некоторых почвенных «клеев» [2, 10], имеющих органическую природу и позволяющих сохранять устойчивость почвенных агрегатов при водном и механическом воздействиях.

В работах [7, 11] указано, что агрегатный состав почв и их водоустойчивость связаны с наличием в почвах органического вещества, его количеством и качеством. Тем не менее, до сих пор нет удовлетворительных объяснений механизмов этой взаимосвязи. Кроме того, устойчивость структуры определяется наличием в почвах ионов Ca, Al, Fe, доли коллоидных компонентов, а также действием таких живых организмов, как растения, грибы, микроорганизмы и их экссудатов [10–16].

По данным литературных источников [17], водоустойчивость почв связана с их гидрофобностью, т. е. количеством (плотностью) гидрофобных связей. Согласно предложенному в работах [18, 19] механизму, гидрофильные участки гуминовых веществ (ГВ) взаимодействуют с глинистыми минералами, а гидрофобные — между собой, связывая почвенные частицы в агрегат и обеспечивая водо- и механическую устойчивость почвенной структуры. Следует отметить, что эта точка зрения имеет недостатки, поскольку имеются в виду абстрактные ГВ, не имеющие размера и формы. Указывается, что они должны входить в состав почвенных гелей, но не рассматривается в каком виде они там находятся

## Сравнительная характеристика почвенных образцов

## Comparative characteristics of soil samples

Номер образца	Классификация почв СССР, 1977	Горизонт	Средневзвешенный диаметр агрегатов (СВД), мм	Предельная нагрузка на агрегат, мН/агрегат
1	Агродерново-подзолистая	Апах	0,125 ± 0,021	23,3 ± 2,3
2	Дерново-подзолистая	Апах	0,304 ± 0,051	17,5 ± 1,7
3	То же	Апах	0,392 ± 0,066	17,6 ± 1,7
4	«→»	Апах	0,161 ± 0,027	19,0 ± 1,9
5	Серая лесная освоенная	Апах	0,654 ± 0,111	28,1 ± 2,5
6	Чернозем выщелоченный	Апах	0,868 ± 0,147	36,1 ± 3,6
7	Каштановая	А	0,163 ± 0,028	19,9 ± 1,9
8	Серозем типичный	А	0,443 ± 0,075	16,2 ± 1,1
9	Красно-коричневая (красноцветная)	А (0–7)	3,935 ± 0,667	51,8 ± 1,2
10	То же	В (7–22)	3,497 ± 0,592	42,2 ± 1,4
11	«→»	ВС (62–85)	0,933 ± 0,158	3,3 ± 1,5
12	Бурозем	Апах	0,961 ± 0,163	33,7 ± 1,3
13	Чернозем типичный	А	0,927 ± 0,157	31,2 ± 0,5
14	То же	Апах	0,982 ± 0,166	34,7 ± 0,9
15	Дерново-подзолистая	Апах	0,386 ± 0,065	13,7 ± 0,4
16	Горно-луговая	А(10–30)	0,999 ± 0,325	35,1 ± 1,0
17	Бурозем	А	1,920 ± 0,169	39,5 ± 1,1

и какие физические механизмы определяют их положение в гелях. На эти вопросы частично отвечает модель почвенных гелей, возникающих и существующих в почвах в виде надмолекулярных образований — фрактальных кластеров — с размером частиц 100...200 нм, образующихся из первичных частиц ГВ размером 2...10 нм [20]. Однако четкой концепции о природе устойчивости почвенных агрегатов, доказанной экспериментами, в настоящий момент в почвоведении нет.

Есть и другое мнение о механизме формирования водоустойчивых агрегатов. По А.А. Шинкареву [21], почвенные отдельные частицы представляют собой совокупность частиц, связанных между собой свежими слабо разложившимися органическими остатками, которые выполняют армирующую функцию. По данным экспериментов, исследователи показали, что в наиболее агрегированных почвах содержание гидрофильных компонентов ГВ повышено [22].

В литературе также отмечается, что при отсутствии растительных остатков в почве в ней устанавливается минимальное содержание гумуса [23]. По мнению исследователей, устойчивая структура почвы формируется при оптимальном содержании именно лабильной, быстро минерализуемой части гумуса [24].

Таким образом, пока не существует единых представлений о механизме формирования водоустойчивости почв.

Высказывается предположение, что к факторам, снижающим водоустойчивость почв,

относится расклинивающее давление воды, а механизм разрушения внутриагрегатных связей обусловлен расклинивающими свойствами водной пленки, заключенной между частицами почвы. Согласно физико-химической теории эффективных напряжений в грунтах, устойчивость и неустойчивость дисперсных систем, к которым относятся и почвы, определяется соотношением сил притяжения и отталкивания между частицами [25]. В основе данного явления лежит осмотическая составляющая, обусловленная перекрытием диффузных атмосфер двойных электрических слоев, существующих на границах жидкой прослойки и твердой фазы почвы. Однако проверки воздействия расклинивающего давления воды на водоустойчивость почвенных агрегатов в литературе нами обнаружено не было.

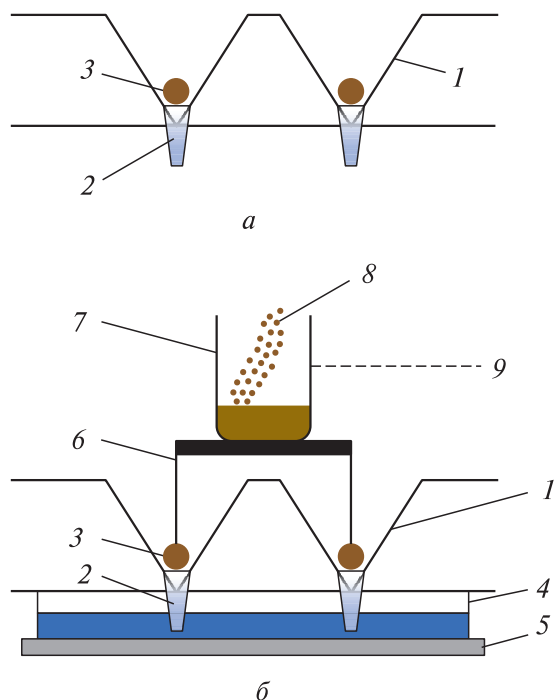
### Цель работы

Цель работы — проверка значимости влияния расклинивающего давления воды на водоустойчивость почв и уточнение представлений о механизме данного свойства.

### Объекты и методы исследования

В работе были использованы образцы, представленные в табл. 1. Результаты определения водоустойчивости почвенных агрегатов по методу Саввинова сравнивали с результатами, полученными методом «лезвий».

В ходе исследования использовали метод «лезвий», основанный на рассечении лезвием близких



**Рис. 1.** Схема кассеты с фитилями и агрегатами для определения устойчивости почвенных агрегатов (а): 1 — уголки кассеты; 2 — хлопчатобумажные фитили; 3 — почвенные агрегаты; общая схема определения устойчивости почвенных агрегатов (б): 1 — уголки кассеты; 2 — хлопчатобумажные фитили; 3 — почвенные агрегаты; 4 — емкость с водой; 5 — весы; 6 — площадка с закрепленными на ней лезвиями; 7 — мерный стаканчик с песком; 8 — добавляемый в мерный стаканчик песок; 9 — луч лазера, направленный на мерную шкалу стаканчика

**Fig. 1.** Scheme of the cassette with wicks and aggregates for determining the stability of soil aggregates (a): 1 — corners of the cassette; 2 — cotton wicks; 3 — soil aggregates; general scheme of determining the stability of soil aggregates (b): 1 — corners of the cassette; 2 — cotton wicks; 3 — soil aggregates; 4 — container with water; 5 — scales; 6 — platform with blades fixed on it; 7 — measuring cup with sand; 8 — sand added to the measuring cup; 9 — laser beam directed to the measuring cup scale

к насыщению водой агрегатов и определении предельного напряжения их разрушения [26].

При подготовке образцов агрегаты почв полевой влажности (0,7 относительно наименьшей влагоемкости) просеивали через сито с диаметром ячеек 4,5...5,0 мм и высушивали до воздушно-сухого состояния. Было установлено, что получение агрегатов просевом высушенных или влажных (с последующим высушиванием) образцов не оказывает значительного влияния на их устойчивость.

В ходе измерения воздушно-сухие агрегаты помещали в кассету, представляющую собой три пары алюминиевых уголков, закрепленных таким образом, чтобы угол был ориентирован по направлению действия силы тяжести (рис. 1, а).

В нижней части уголка размещены фитили из хлопчатобумажной ткани.

В алюминиевые уголки на фитили укладывали по 14 почвенных агрегатов так, чтобы они касались один другого. Количество агрегатов, укладываемых в уголки, лимитировалось размерами емкости для вакуумирования.

Посредством вакуумирования удаляли из агрегатов воздух в течение 15 мин при разрежении, равном 15 кПа. Условия были подобраны в ходе изучения водоустойчивости агрегатов в предварительных экспериментах. В качестве изученных параметров при удалении воздуха из агрегатов выступали время вакуумирования и величина разрежения. Проведенные эксперименты показали, что при времени вакуумирования 15 мин и величине разрежения 15 кПа удается минимизировать разрушающее влияние защемленного воздуха, т. е. значения водоустойчивости становятся постоянными.

Кассету с агрегатами в вакуумируемом эксикаторе закрепляли на трех парах мощных неодимовых магнитов так, чтобы магнитами, находящимися снаружи эксикатора, можно было перемещать кассету внутри эксикатора: вверх-вниз.

После удаления воздуха из агрегатов кассету перемещали в эксикаторе так, чтобы фитили пришли в контакт с водой, и агрегаты в вакууме через фитили капиллярно увлажнялись до значений, близких к насыщению. При проверке влияния действия расклинивающего давления воды на водоустойчивость эксикатор наполняли растворами солей разной концентрации. Ввиду неодинаковой смачиваемости агрегатов различных почвенных типов для каждого из них время капиллярного увлажнения подбирали индивидуально. Так, для образцов черноземов, например, время увлажнения составило 30 мин, для серой лесной и дерново-подзолистой почв — 15 мин.

После увлажнения агрегатов в вакууме кассету извлекали из эксикатора и помещали в расположенную на весах емкость с водой таким образом, чтобы фитили под агрегатами обеспечивали сохранение насыщения их водой, достигнутое на этапе вакуумирования.

В связи с тем, что образец был насыщен водой через фитили без прямого контакта с ней, агрегаты самопроизвольно не разрушались благодаря стягивающим капиллярным силам.

Затем на линейно расположенные агрегаты помещали устройство, представляющее собой два параллельно расположенных лезвия (см. рис. 1, б), закрепленные на площадке, на которую устанавливали стаканчик с мерной шкалой. Добавляя песок в стаканчик, повышали нагрузку на агрегаты, которую фиксировали с помощью весов. Для исключения ошибок на



мерную шкалу стаканчика направляли луч лазера, закрепленный на другом штативе. Это позволяло хорошо контролировать процесс прохождения лезвиями средней части агрегатов.

В целях стандартизации получаемых данных рассчитывали предельное сопротивление разрушения агрегатов. Экспериментально определяемую нагрузку в граммах выражали в миллиютонах на агрегат (мН/агрегат).

Для проверки корректности результатов, полученных новым методом, было проведено измерение водоустойчивости тех же образцов методом ситового просеивания в стоячей воде по Саввинову [27].

Для изучения влияния воздействия воды на водоустойчивость при отсутствии механического воздействия [28] образец вакуумировали и капиллярно насыщали в течение 1, 2, 3, 19 ч, после чего определяли водоустойчивость методом «лезвий».

Для обнаружения выходящих из почвенных агрегатов частиц агрегаты располагали на хлопчатобумажной ткани, натянутой на круг диаметром 10 см, вырезанный из пластиковой крышки для банок. Причем с круга из крышки в воду свисали фитили из хлопчатобумажной ткани длиной примерно 5 см. Данному устройству было присвоено название «паук». На ткань помещали 3–4 десятка агрегатов размером 4–5 мм. Устройство «паук» помещали в эксикатор и вакуумным насосом откачивали из него воздух при разрежении, равном 15 кПа, в течение 15 мин. Используя магнитные манипуляторы, фитили находящихся в вакууме устройств, приводили в контакт с водой. Через 20...30 мин агрегаты намокали. Затем отключали вакуум и переносили «пауков» в стаканы, обеспечивая контакт фитилей с находящейся в стаканах водой.

Воду, которая могла содержать частицы, вышедшие из агрегатов, разбавляли в 10 раз и наносили по 5 мкл на атомно-гладкую поверхность слюды и высушивали. Далее перед исследованием на образцы напыляли золото с помощью установки JFC-1600 (фирма JEOL, Япония). Электронно-микроскопические исследования проводили на растровом электронном микроскопе JEOL-6060A (фирма JEOL, Япония) с вольфрамовым катодом при ускоряющем напряжении 2...5 кВ.

С помощью микроскопа РЭМ JEOL-6060A был проведен рентгенолокальный анализ частиц, выделяющихся из почвенных агрегатов в воду. Для этого создавали многослойную конструкцию из этих частиц, последовательно нанося на слюду раствор, содержащий частицы, и высушивая.

Для проверки влияния температуры на водоустойчивость почвенной структуры после капиллярного увлажнения агрегатов и их вакуумирования кассету с образцами размещали под инфракрасной лампой для нагревания. Для пре-

дотвращения высыхания агрегатов капиллярный контакт с водой температурой 50...70 °С продолжали поддерживать. Измерение водоустойчивости проводили одновременно с определением температуры.

## Результаты и обсуждение

Для проверки соответствия получаемых методом «лезвий» данных водоустойчивости агрегатов, определяемой классическим методом Саввинова эксперименты провели на 17 образцах (см. табл. 1). В результате было установлено, что полученные на одних и тех же образцах почв данные (см. табл. 1), хорошо коррелируют между собой. Коэффициент корреляции между определенным по методу Саввинова средневзвешенным диаметром (СВД) и предельной нагрузкой разрушения по методу «лезвий» превышает 85 % (рис. 2).

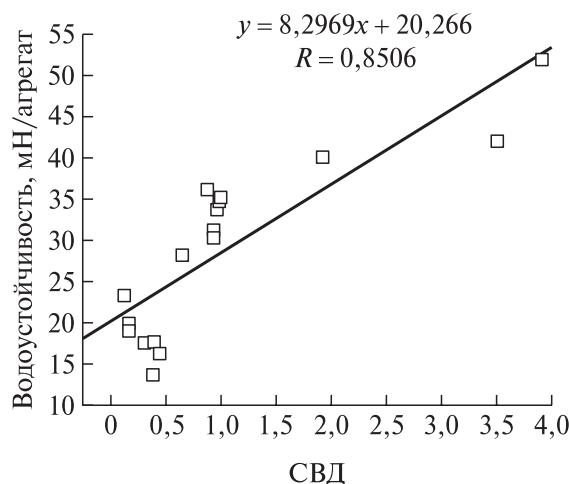


Рис. 2. Зависимость устойчивости агрегатов, определенной по методу «лезвий» (мН/агрегат), от водоустойчивости (средневзвешенного диаметра), установленной по методу Саввинова

Fig. 2. Dependence of aggregate stability determined by the «blade» method (mN/aggregate) on water resistance (weighted average diameter) determined by the Savvinov method

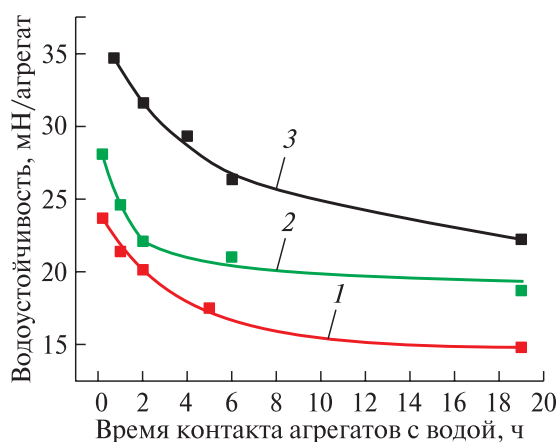
Для проверки влияния расклинивающего давления воды на определяемую водоустойчивость чернозема, серой лесной и дерново-подзолистой почв было проведено определение данного показателя в растворах солей разных концентраций. Использование солей увеличивает ионную силу раствора, что минимизирует перекрытие двойных электрических слоев на границе раздела фаз и уменьшает влияние расклинивающего давления воды. При значимом влиянии расклинивающего давления воды на водоустойчивость образцов почв при таком методе определения должна была бы превышать их водоустойчивость, измеренную в воде, однако различий мы не обнаружили (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

**Водоустойчивость почвенных агрегатов, помещенных в воду и водный раствор хлорида калия (мН/агрегат), определенная методом «лезвий»**

**Water stability of soil aggregates placed in water and potassium chloride aqueous solution (mN/aggregate), determined by the «blade» method**

Почва	Вода	0,1 н раствор хлорида калия	1 н раствор хлорида калия
Дерново-подзолистая	23,75 ± 0,86	23,71 ± 1,32	23,87 ± 1,55
Серая лесная	28,12 ± 2,49	27,67 ± 0,93	27,31 ± 0,77
Чернозем типичный	34,73 ± 0,88	34,32 ± 1,37	34,10 ± 1,33



**Рис. 3.** Зависимость водоустойчивости почвенных агрегатов от времени их контакта с водой: 1 — дерново-подзолистая почва; 2 — серая лесная почва; 3 — чернозем

**Fig. 3.** Dependence of water resistance of soil aggregates on the time of their contact with water: 1 — sod-podzolic soil; 2 — grey forest soil; 3 — chernozem

Этот факт может свидетельствовать о том, что, несмотря на привычность представлений о значимом влиянии расклинивающего давления воды на водоустойчивость почв, они не соответствуют действительности.

Как отмечено выше, наиболее распространено представление о механизме водоустойчивости в виде модели, основанной на гидрофобном взаимодействии участков амфифильных молекул гуминовых веществ [19, 20], обладающих мозаичной гидрофильно-гидрофобной поверхностью. Если анализировать полученные экспериментальные данные исходя из этой модели, гидрофильные и гидрофобные участки на поверхности частиц гумусовых веществ чередуются, но указанное выше увеличение размера ионных атмосфер около гидрофильных участков не влияет на взаимодействие частиц гумусовых веществ через гидрофобные участки.

Поскольку гидрофильные и гидрофобные участки в молекулах гуминовых веществ пространственно не разъединены, объяснить отсутствие влияния увеличения размера ионных атмосфер на водоустойчивость можно только дальнедействием гидрофобных сил [29]. Расчеты, представленные в работе Б.В. Дерягина и Н.В. Чураева [30], показывают, что для частиц размером 100 нм действие расклинивающего давления воды простирается на 15...20 нм, а в работе О.И. Виноградовой [29] приводятся данные о распространении действия гидрофобных сил до 100 нм.

Это хорошо объясняет возникшее противоречие между наличием в почвах расклинивающего давления воды и отсутствием его влияния на водоустойчивость почвенных агрегатов, что, однако, не позволяет понять причину водоустойчивости почв.

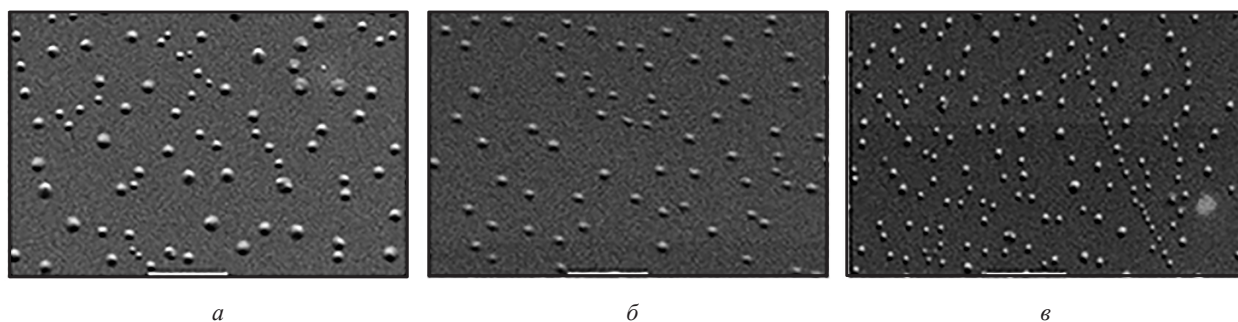
А.Р. Декстер отметил, что при контакте агрегатов с водой их водоустойчивость уменьшается [28]. Для проверки полученных им экспериментальных данных было принято решение, используя метод «лезвий», изменять время капиллярного контакта агрегатов с водой перед определением их водоустойчивости. Было изучено влияние времени взаимодействия агрегатов почв различных типов с водой на величину их водоустойчивости (рис. 3).

Из полученных в ходе эксперимента данных следует, что при увеличении времени контакта агрегатов всех изученных почв с водой их водоустойчивость экспоненциально снижается, что подтверждает результаты, полученные А.Р. Декстером [28]. Следовательно, вода без механического воздействия некоторым образом влияет на водоустойчивость почвенной структуры.

Поскольку полученные результаты не объясняют это, предположили, что влияние могут оказывать некие частицы, вышедшие из агрегатов в раствор.

Для проверки такого предположения с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) изучили воду, с которой контактировали почвенные агрегаты, так как она могла содержать эти частицы.

На микрофотографиях хорошо видны частицы сферической формы, выделившиеся из чернозема, дерново-подзолистой и серой лесной почв (рис. 4, а–в). По литературным данным пришли к предварительному заключению о том, что эти частицы ни что иное, как надмолекулярные образования гумусовых веществ. Рентгенолокальный анализ показал, что в составе Ф-кластеров содержится 95 % углерода. Мы пересчитали результаты на содержание гумусовых компонентов и получили 97 % содержания в них углерода, являющегося основой почвенных гелей [19].



**Рис. 4.** Ф-кластеры, перешедшие в воду через хлопчатобумажную ткань в течение 19 ч при контакте с агрегатами чернозема (а), серой лесной (б) и дерново-подзолистой почв (в); увеличение  $\times 5000$ , масштабный отрезок равен 5 мкм  
**Fig. 4.** F-clusters transferred to water through cotton cloth during 19 h in contact with aggregates of chernozem (a), grey forest soil (б) and sod-podzolic soil (в); magnification  $\times 5000$ , scale segment equal to 5  $\mu\text{m}$

Таким образом, водоустойчивость почвенных образцов при контакте с водой снижается за счет выхода гумусовых частиц и, по-видимому, уменьшения количества внутриагрегатных связей.

Для уточнения представлений о механизме водоустойчивости был дополнительно проведен эксперимент по изучению влияния температуры на водоустойчивость почвенной структуры. Для проверки влияния температуры на водоустойчивость почвенной структуры после капиллярного увлажнения агрегатов и их вакуумирования кассету с образцами размещали под инфракрасной лампой для их нагревания. Для предотвращения высыхания агрегатов, капиллярный контакт с водой с температурой 50...70 °С продолжали поддерживать. Измерение водоустойчивости проводили одновременно с определением температуры. Если именно гидрофобные связи обеспечивают прочность агрегатов, то при определении водоустойчивости при повышенных температурах водоустойчивость должна возрастать [14, 17].

Эксперименты показали, что для почв, не подвергавшихся высушиванию, характерно увеличение водоустойчивости их агрегатов. Однако при остывании агрегатов их водоустойчивость снижается до начальных значений. Это подтверждает предположение о том, что в основе механизма водоустойчивости почв, не подвергавшихся высушиванию, лежит взаимодействие между гидрофобными участками амфифильных молекул гумусовых веществ, обладающих мозаичной поверхностью.

При определении водоустойчивости воздушно-сухих агрегатов при повышенных температурах, данный показатель оставался неизменным, что позволяет предположить важное значение как гидрофобных, так и гидрофильных связей. При повышении температуры прочность гидрофобных связей должна расти, а гидрофильных — снижаться, поэтому отсутствие влияния температуры можно трактовать как результат совместного влияния на водоустойчивость гидрофильных и гидрофобных связей.

Из полученных данных следует, что для водоустойчивости почв важное значение имеют совместно действующие внутрипочвенные гидрофильные и гидрофобные связи, что объединяет представления разных исследователей о механизме их водоустойчивости.

## Выводы

1. В ходе экспериментов не подтверждены литературные данные о влиянии расклинивающего давления воды на водоустойчивость почвенной структуры.
2. Установлено, что при контакте с водой почвенных агрегатов из них выделяются частицы органического вещества. Этот процесс сопровождается снижением водоустойчивости почвенных агрегатов.
3. Обнаружено увеличение водоустойчивости образцов, не подвергавшихся высушиванию, определяемой при повышенных температурах. Это говорит о гидрофобной природе структурообразующих связей во влажных почвах.
4. Не обнаружено увеличения водоустойчивости воздушно-сухих образцов, определяемой при повышенных температурах. Это говорит об изменении структурообразующих связей в воздушно-сухих образцах почв.

## Список литературы


- [1] Lamichhane J.R., Debaeke P., Steinberg C., You M.P., Barbetti M.J., Aubertot J.N. Abiotic and biotic factors affecting crop seed germination and seedling emergence: a conceptual framework // *Plant and soil*, 2018, v. 432, pp. 1–28.
- [2] Haydu-Houdeshella C-A., Grahamb R.C., Hendrix P.F., Peterson A.C. Soil aggregate stability under chaparral species in southern California // *Geoderma*, 2018, v. 320, pp. 201–208.
- [3] Mao J., Nierop K.G.J., Dekker S.C., Dekker L.W., Chen B. Understanding the mechanisms of soil water repellency from nanoscale to ecosystem scale: a review // *J. of Soils and Sediments*, 2019, v. 19, pp. 171–185.

- [4] Иванова О.И., Бураков Д.А. Эрозия почв. Красноярск: Изд-во Красноярского государственного аграрного университета, 2020. 103 с.
- [5] Рычкова М.И. Водопрочность почвы и урожайность озимой пшеницы в зависимости от способа основной обработки и предшественника на эрозионно-опасном склоне // Живые и биокосные системы, 2020. № 31. URL: <https://jbks.ru/archive/issue-31/article-4> (дата обращения 15.02.2023).
- [6] Вершинин П.В. Почвенная структура и условия ее формирования М.: Издательство Академии наук СССР, 1958. 188 с.
- [7] Николаева Е.И. Устойчивость почвенных агрегатов к водным и механическим воздействиям: дис. ... канд. биол. наук МГУ. М., 2016. 104 с.
- [8] Ghezelbash E., Hossein Mohammadi M., Shorafa M. Investigation of Soil Mechanical Resistance Threshold Values for Two Wheat Cultivars in a Loamy Sand Soil // *J. of Soil Science and Plant Nutrition*, 2022, v. 22, pp. 1–12.
- [9] Schjøninga P., Lamandéa M., Munkholma L.J., Lyngvig H.S., Nielsen J.Aa. Soil precompression stress, penetration resistance and crop yields in relation to differently-trafficked, temperate-region sandy loam soils // *Soil and Tillage Research*, 2016, v. 163, pp. 298–308.
- [10] Totsche K.U., Amelung W., Gerzabek M.H., Guggenberger G., Klumpp E., Knief C., Lehndorff E., Mikutta R., Peth S., Prechtel A., Ray N., Kögel-Knabner I. Microaggregates in soils // *J. of Plant Nutrition and Soil Science*, 2018, v. 181, no. 1, pp. 104–136.
- [11] Verchot L.V., Dutaur L., Shepherd K.D., Albrecht A. Organic matter stabilization in soil aggregates: Understanding the biogeochemical mechanisms that determine the fate of carbon inputs in soils // *Geoderma*, 2011, v. 161(3–4), pp. 182–193.
- [12] García-González I., Quemada M., Gabriel J.L., Alonso-Ayuso M., Hontoria C. Legacy of eight year cover cropping on mycorrhizae, soil, and plants // *J. of Plant Nutrition and Soil Science*, 2018, v. 181, no. 6, pp. 818–826.
- [13] Lucas M., Schlüter S., Vogel H.J., Vetterlein D. Soil structure formation along an agricultural chronosequence // *Geoderma*, 2019, v. 350, pp. 61–72.
- [14] Rowley M.C., Grand S., Verrecchia É.P. Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon // *Biogeochemistry*, 2018, v. 137, no. 1–2, pp. 27–49.
- [15] Song R., Liu L., ChunSheng W., LiYan M. Effect of soybean root exudates on soil aggregate size and stability // *J. of Northeast Forestry University*, 2009, v. 37, no. 7, pp. 84–86.
- [16] Naveed M., Brown L.K., Raffan A.C., George T.S., Bengough A.G., Roose T., Sinclair I., Kobernick N., Cooper L., Hackett C.A., Hallett P.D. Plant exudates may stabilize or weaken soil depending on species, origin and time // *European J. of Soil Science*, 2017, v. 68, no. 6, pp. 806–816.
- [17] Vogelmann E.S., Reichert J.M., Prevedello J., Awe G.O., Mataix-Solera J. Can occurrence of soil hydrophobicity promote the increase of aggregates stability? // *Catena*, 2013, v. 110, pp. 24–31.
- [18] Милановский Е.Ю. Гумусовые вещества почв как природные гидрофобно-гидрофильные соединения. М.: ГЕОС, 2009. 186 с.
- [19] Шейн Е.В., Милановский Е.Ю. Роль и значение органического вещества в образовании и устойчивости почвенных агрегатов // *Почвоведение*, 2003. № 1. С. 3–61.
- [20] Федотов Г.Н., Добровольский Г.В. Возможные пути формирования наноструктуры в почвенных гелях // *Почвоведение*, 2012. № 8. С. 908–920.
- [21] Шинкарев А.А., Мельников Л.В., Зайнуллин Т.Е. Природа водопрочности агрегатов гумусовых горизонтов темно-серой лесной почвы // *Почвоведение*, 1999. № 3. С. 348–353.
- [22] Шинкарев А.А., Перепелкина Е.Б. Содержание и состав гумусовых веществ в водопрочных агрегатах темно-серой лесной почвы // *Почвоведение*, 1997. № 2. С. 165–172.
- [23] Когут Б.М. Трансформация гумусового состояния черноземов при их сельскохозяйственном использовании // *Почвоведение*, 1998. № 7. С. 794–802.
- [24] Когут Б.М. Принципы и методы оценки содержания трансформируемого органического вещества в пахотных почвах // *Почвоведение*, 2003. № 3. С. 308–316.
- [25] Осипов В.И. Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах // *Грунтоведение*, 2013. № 2. С. 3–34.
- [26] Ушкова Д.А., Конкина У.А., Горепекин И.В., Потапов Д.И., Шейн Е.В., Федотов Г.Н. Устойчивость агрегатов пахотных почв: экспериментальное определение и нормативная характеристик // *Почвоведение*, 2023. № 2. С. 203–210.
- [27] Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
- [28] Dexter A.R., Horn R., Kemper W. Two mechanisms of age hardening // *J. Soil Sci.*, 1988, v. 39, pp. 163–175.
- [29] Виноградова О.И. Особенности гидродинамического и равновесного взаимодействия гидрофобных поверхностей: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 2000. 175 с.
- [30] Дерягин Б.В., Чураев Н.В. Смачивающие пленки. М.: Наука, 1984. 159 с.

## Сведения об авторах

**Ушкова Дарья Александровна** — студентка факультета почвоведения, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

**Горепекин Иван Владимирович** — научный сотрудник Евразийского центра по продовольственной безопасности МГУ имени М.В. Ломоносова, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», [decembrist96@yandex.ru](mailto:decembrist96@yandex.ru)

**Федотов Геннадий Николаевич**  — д-р биол. наук, вед. науч. сотр. факультета почвоведения МГУ, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», [gennadiy.fedotov@gmail.com](mailto:gennadiy.fedotov@gmail.com)

**Батырев Юрий Павлович** — канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), [batyrev@mgul.ac.ru](mailto:batyrev@mgul.ac.ru)

Поступила в редакцию 17.04.2023.

Одобрено после рецензирования 22.03.2024.

Принята к публикации 22.03.2024.

# CLARIFICATION OF CONCEPTS ABOUT SOIL WATER STABILITY MECHANISM

D.A. Ushkova<sup>1</sup>, I.V. Gorepekin<sup>1</sup>, G.N. Fedotov<sup>1✉</sup>, Yu.P. Batyrev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science, GSP-1, 1, p. 12, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia

<sup>2</sup>BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

gennadiy.fedotov@gmail.com

The aggregate composition of soils and the water stability of aggregates are related to soil organic matter, its quantity and quality, but so far there is no satisfactory hypothesis explaining the mechanisms of this relationship. The purpose of the work is to verify the significance of the wedging water pressure influence on soil water stability and clarify ideas about the mechanism of this phenomenon. The assessment of soil water stability was carried out by the author's method of blades. The conducted verification showed that its correlation with the Savvinov wet sieving method carried out on 17 soil samples exceeds 85 %. During the experiments, it was found that when the units come into contact with water, their water stability decreases exponentially. The decrease in water stability in contact with water is usually explained by the wedging water pressure. Our experiments on replacing water with salt solutions during capillary humidification of aggregates did not confirm this theory. Therefore, using a scanning electron microscope, we tested the solution obtained after capillary contact of the aggregates with water. It was found that during capillary contact of aggregates with water, a labile part of humic substances is released there. Thus, the water stability of soil samples in contact with water is reduced due to the release of HS and a decrease in the number of structure-forming bonds in the aggregate.

**Keywords:** water stability and organic matter of the soil, wedging water pressure, temperature effect on water stability, diphilicity of soil organic matter

**Suggested citation:** Ushkova D.A., Gorepekin I.V., Fedotov G.N., Batyrev Yu.P. *Utochnenie predstavleniy o mekhanizme vodoustoychivosti pochv* [Clarification of concepts about soil water stability mechanism]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 3, pp. 78–86. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-78-86

## References

- [1] Lamichhane J.R., Debaeke P., Steinberg C., You M.P., Barbetti M.J., Aubertot J.N. Abiotic and biotic factors affecting crop seed germination and seedling emergence: a conceptual framework. *Plant and soil*, 2018, v. 432, pp. 1–28.
- [2] Haydu-Houdeshella C.A., Grahamb R.C., Hendrix P.F., Peterson A.C. Soil aggregate stability under chaparral species in southern California. *Geoderma*, 2018, v. 320, pp. 201–208.
- [3] Mao J., Nierop K.G.J., Dekker S.C., Dekker L.W., Chen B. Understanding the mechanisms of soil water repellency from nanoscale to ecosystem scale: a review. *J. of Soils and Sediments*, 2019, v. 19, pp. 171–185.
- [4] Ivanova O.I., Burakov D.A. *Eroziya pochv* [Soil erosion]. Krasnoyarsk: Krasnoyarskiy gosudarstvenniy agrarniy universitet, 2020, 103 p.
- [5] Rychkova M. I. *Vodoprochnost' pochvy i urozhajnost' ozimoy pshenicy v zavisimosti ot sposoba osnovnoy obrabotki i predshestvennika na erozionno-opasnom sklone* [Soil water stability and yield of winter wheat depending on the method of main processing and the predecessor on the erosion-hazardous slope]. *Zhivye i biokosnye sistemy*, 2020, no. 31. Available at: <https://jbsk.ru/archive/issue-31/article-4> (accessed 15.02.2023).
- [6] Vershinin P.V. *Pochvennaya struktura i usloviya ee formirovaniya* [Soil structure and conditions of its formation]. Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1958, 188 p.
- [7] Nikolayeva E.I. *Ustoychivost' pochvennykh agregatov k vodnym i mekhanicheskim vozdeystviyam* [Resistance of soil aggregates to water and mechanical influences]. Diss. Cand. Sci. (Biol.), MSU. Moscow, 2016, 104 p.
- [8] Ghezelbash E., Hossein Mohammadi M., Shorafa M. Investigation of Soil Mechanical Resistance Threshold Values for Two Wheat Cultivars in a Loamy Sand Soil. *J. of Soil Science and Plant Nutrition*, 2022, pp. 1–12.
- [9] Schjønning P., Lamandéa M., Munkholma L.J., Lyngvig H.S., Nielsen J.Aa. Soil precompression stress, penetration resistance and crop yields in relation to differently-trafficked, temperate-region sandy loam soils. *Soil and Tillage Research*, 2016, v. 163, pp. 298–308.
- [10] Totsche K.U., Amelung W., Gerzabek M.H., Guggenberger G., Klumpp E., Knief C., Lehdorff E., Mikutta R. Peth S., Prechtel A., Ray N., Kögel-Knabner I. Microaggregates in soils. *J. of Plant Nutrition and Soil Science*, 2018, v. 181, no. 1, pp. 104–136.
- [11] Verchot L.V., Dautaur L., Shepherd K.D., Albrecht A. Organic matter stabilization in soil aggregates: Understanding the biogeochemical mechanisms that determine the fate of carbon inputs in soils. *Geoderma*, 2011, v. 161(3–4), pp. 182–193.
- [12] García-González I., Quemada M., Gabriel J.L., Alonso-Ayuso M., Hontoria C. Legacy of eight year cover cropping on mycorrhizae, soil, and plants. *J. of Plant Nutrition and Soil Science*, 2018, v. 181, no. 6, pp. 818–826.
- [13] Lucas M., Schlüter S., Vogel H.J., Vetterlein D. Soil structure formation along an agricultural chronosequence. *Geoderma*, 2019, v. 350, pp. 61–72.
- [14] Rowley M.C., Grand S., Verrecchia É.P. Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon. *Biogeochemistry*, 2018, v. 137, no. 1–2, pp. 27–49.
- [15] Song R., Liu L., ChunSheng W., LiYan M. Effect of soybean root exudates on soil aggregate size and stability. *J. of Northeast Forestry University*, 2009, v. 37, no. 7, pp. 84–86.
- [16] Naveed M., Brown L.K., Raffan A.C., George T.S., Bengough A.G., Roose T., Sinclair I., Koebnick N., Cooper L., Hackett C.A., Hallett P.D. Plant exudates may stabilize or weaken soil depending on species, origin and time. *European J. of Soil Science*, 2017, v. 68, no. 6, pp. 806–816.

- [17] Vogelmann E.S., Reichert J.M., Prevedello J., Awe G.O., Mataix-Solera J. Can occurrence of soil hydrophobicity promote the increase of aggregates stability? *Catena*, 2013, v. 110, pp. 24–31.
- [18] Milanovskiy E.Yu. *Gumusovye veshchestva pochv kak prirodnye gidrofobno-gidrofil'nye soedineniya* [Humus substances of soils as natural hydrophobic-hydrophilic compounds]. Moscow: GEOS, 2009, 186 p.
- [19] Shein E.V., Milanovskiy E.Yu. *Rol' i znachenie organicheskogo veshchestva v obrazovanii i ustoychivosti pochvennykh agregatov* [The role and significance of organic matter in the formation and stability of soil aggregates]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 2003, no. 1, pp. 3–61.
- [20] Fedotov G.N., Dobrovolskiy G.V. *Vozможные пути формирования наноструктуры в почвенных гелях* [Possible ways of nanostructure formation in soil gels]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 2012, no. 8, pp. 908–920.
- [21] Shinkarev A.A., Mel'nikov L.V., Zaynullin T.E. *Priroda vodoprochnosti agregatov gumusovykh gorizontov temno-seroy lesnoy pochvy* [The nature of water resistance of aggregates of humus horizons in dark gray forest soil]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 1999, no. 3, pp. 348–353.
- [22] Shinkarev A.A., Perepelkina E.B. *Soderzhanie i sostav gumusovykh veshchestv v vodoprochnykh agregatakh temno-seroy lesnoy pochvy* [The content and composition of humic substances in water-stable aggregates of dark gray forest soil]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 1997, no. 2, pp. 165–172.
- [23] Kogut B.M. Transformatsiya gumusovogo sostoyaniya chernozemov pri ikh sel'skokhozyaystvennom ispol'zovanii [Transformation of the humus state of chernozems during their agricultural use]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 1998, no. 7, pp. 794–802.
- [24] Kogut B.M. *Printsipy i metody otsenki sodержaniya transformiruemogo organicheskogo veshchestva v pakhotnykh pochvakh* [Principles and methods for assessing the content of transformed organic matter in arable soils]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 2003, no. 3, pp. 308–316.
- [25] Osipov V.I. *Fiziko-khimicheskaya teoriya effektivnykh napryazheniy v gruntakh* [Physico-chemical theory of effective stresses in soils]. *Gruntovedenie* [Ground Science], 2013, no. 2, pp. 3–34.
- [26] Ushkova D.A., Konkina U.A., Gorepekin I.V., Potapov D.I., Shein E.V., Fedotov G.N. *Ustoychivost' agregatov pakhotnykh pochv: eksperimental'noe opredelenie i normativnaya kharakteristik* [Stability of aggregates of arable soils: experimental determination and normative characteristics]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 2023, v. 56, no. 2, pp. 203–210.
- [27] Vadyunina A.F., Korchagina Z.A. *Metody issledovaniya fizicheskikh svoystv pochv* [Methods for studying the physical properties of soils]. Moscow: Agropromizdat, 1986, 416 p.
- [28] Dexter A.R., Horn R., Kemper W. Two mechanisms of age hardening. *J. Soil Sci.*, 1988, v. 39, pp. 163–175.
- [29] Vinogradova O.I. *Osobennosti gidrodinamicheskogo i ravnovesnogo vzaimodeystviya gidrofobnykh poverkhnostey* [Features of hydrodynamic and equilibrium interaction of hydrophobic surfaces]. Diss. Dr. Sci. (Phys.-Math.). Moscow. 2000, 175 p.
- [30] Deryagin B.V., Churaev N.V. *Smachivayushchie plenki* [Wetting films]. Nauka [Science], 1984, 159 p.

## Author's information

**Ushkova Dar'ya Aleksandrovna** — student of the Faculty of Soil Science of the Lomonosov Moscow State University

**Gorepekin Ivan Vladimirovich** — Researcher at the Eurasian Center for Food Security of Lomonosov Moscow State University of the Lomonosov Moscow State University, decembrist96@yandex.ru

**Fedotov Gennadiy Nikolaevich** — Dr. Sci. (Biol.), Senior Researcher of the Faculty of Soil Science of the Lomonosov Moscow State University, gennadiy.fedotov@gmail.com

**Batyrev Yuriy Pavlovich** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), batyrev@mgul.ac.ru

Received 17.04.2023.

Approved after review 22.03.2024.

Accepted for publication 22.03.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article  
The authors declare that there is no conflict of interest

## ГОРОДСКИЕ ЛЕСА МОСКВЫ В СВЕТЕ ИЗМЕНЕНИЙ ЛЕСНОГО КОДЕКСА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ 2023 ГОДА

Е.И. Майорова✉, В.Д. Шершнева

ФГБОУ ВО «Государственный университет управления», Россия, 109542, Москва, Рязанский проспект, д. 99

tro1003@mail.ru

Городские леса имеют определяющее значение для экологии и состояния здоровья горожан. Однако в настоящее время их существование в крупных городах находится под угрозой. Одна из ключевых причин этого — несовершенство Лесного кодекса Российской Федерации. Принятие нового Кодекса, который учитывал бы интересы сохранения городских лесов и их экологической ценности, действительно могло бы стать важным шагом и в направлении устойчивого развития городов. Однако пока пробелы закрываются внесением изменений в действующее законодательство. Проанализированы последствия усиления антропогенного воздействия на городские леса Москвы, влекущие ухудшение экологического состояния лесных насаждений, в связи с принятием поправок в Лесной кодекс РФ. Нововведения касаются органов государственной регистрации недвижимости, а также охраны окружающей благоустройства лесных территорий и строительства на них. От степени сохранности городских лесов зависит комфортность городской среды. На первый план выходит создание рекреационной инфраструктуры, а не сохранения экологического значения леса. Подготовка подзаконными нормативными актами дополнений к ст. 21 ФЗ № 301 от 04.08.2023 позволит несколько снизить негативное влияние хозяйственного освоения городских лесов. Исследование и анализ последствий изменений в Лесном кодексе Российской Федерации для городских лесов, помогли выявить уязвимые места и предложить решения для сохранения и улучшения состояния лесных территорий, что отражено в предложенных авторами рекомендациях по внедрению улучшений в систему управления городскими лесами. Поскольку соответствующими службами перечень московских городских лесов не представлен, авторы составили собственный оригинальный упорядоченный список с указанием их статуса и адресов расположения, что позволит более точно определить общую картину состояния лесных территорий в городе.

**Ключевые слова:** городской лес, экосистема, лесное законодательство, рекреация, капитальное строительство, Лесной кодекс Российской Федерации, правовой режим

**Ссылка для цитирования:** Майорова Е.И., Шершнева В.Д. Городские леса Москвы в свете изменений Лесного кодекса Российской Федерации 2023 года // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 3. С. 87–95. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-87-95

В России уровень урбанизации, по разным данным, почти достиг 75 % [1–3]. Большинство исследователей отмечают воздействие агрессивной городской среды на здоровье горожан [4, 5]. В московском мегаполисе городские леса весомы для экологии и состояния здоровья жителей. Эта разновидность насаждений является одним из источников кислорода, значительно улучшающим качество городского воздуха. Городские леса — важная составляющая природных экосистем, имеющая важное значение для сохранения биологического разнообразия, которое является неотъемлемой основой жизни на планете Земля. Лесные экосистемы — сложные и разнообразные, они обладают самоорганизацией и стойкостью благодаря богатству биологических видов, которые являются их неотъемлемой частью, а также наличию сложно структурированных пищевых цепей [6]. В настоящее время большинство стран мира решает задачу гармонизации сосуществования человеческого общества и природы. Так, Китай с

2015 г. реализует крупные проекты по сохранению биоразнообразия, постоянно усиливая надзор и инспекционный контроль над деятельностью, способной создать угрозу биоразнообразию [7]. Кроме того, леса обеспечивают горожанам огромные возможности для релаксации и контакта с природой. Анализ экологической обстановки в городах — это основное направление изучения окружающей среды человека [8]. В свою очередь сохранение и развитие городских лесов как важнейшего элемента природного окружения является одной из важнейших задач городской власти и требует постоянного внимания.

Непрерывная трансформация Лесного кодекса Российской Федерации непосредственно сказывается на городских лесах: изменяются порядок регулирования данной сферы и особенности управления [9].

### Цель работы

Цель работы — анализ правового и фактического состояния городских лесов Москвы вследствие изменения лесного законодательства.

## Материалы и методы

Объектом исследования является анализ последних поправок, внесенных в Лесной кодекс Российской Федерации (ЛК РФ), которые связаны с регулированием отношений в сфере охраны городских лесов и установлением особого порядка правового воздействия, а также особенностями управления ими. Были использованы следующие методические приемы: 1) изучение динамики модификации законодательных актов, регулирующих рассматриваемые отношения, связанные с городскими лесами; 2) рассмотрение работы муниципальных органов, включая органы местного самоуправления других городов; 3) выявление новых тенденций и перспектив управления городскими лесами Москвы, а также изменений их правового режима и состояния.

Несмотря на многочисленные (48 поправок) изменения, вносимые в ЛК РФ с момента его вступления в силу, признано, что совокупность принципов управления важнейшей для страны лесной промышленностью недостаточно продуктивно. Несовершенства ЛК РФ от 2006 г. привели к расширению объемов незаконного оборота древесины, а также увеличению площадей лесных пожаров, связанному, а часто и обусловленному, подобными рубками.

Все громче звучат голоса о принятии нового ЛК РФ, учитывающего «узкие места» предыдущего документа. Так, был подготовлен законопроект № 72794-8, направленный на устранение недостатков действующего ЛК РФ [10]. Он предусматривает, в первую очередь, противодействие незаконным вырубкам путем ужесточения ответственности за их совершение, запрещение заключения договоров аренды для ведения лесного хозяйства в эксплуатационных лесах для заготовки древесины и некоторые другие важные меры подобного характера.

С 5 мая 2023 года планировалось провести реформу системы лесоустройства. В связи с этим был введен единый федеральный план работ по лесоустройству для земель лесного фонда с учетом зон интенсивного пользования. Одной из важных информационных методик стал лесной таксационный учет (по ст. 68 ЛК РФ) [11, 12].

Эти меры предназначены для сохранения лесных ресурсов страны. Одновременно с этим, в Федеральном законе «О внесении изменений в Лесной кодекс Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 02.07.2021 № 301-ФЗ ст. 21 определено, что строительство, реконструкция, капитальный ремонт, ввод и вывод из эксплуатации, снос, ликвидация и консервация объектов капитального строительства, не связанных с созданием лесной инфраструктуры, разрешены [13].

Большинство изменений, внесенных № 301-ФЗ, касаются главным образом эксплуатационных лесов. Являясь крупнейшей лесной державой, Россия обладает не только эксплуатационными и резервными лесами, а также, например, рекреационными лесами, в которых осуществляется отдых граждан и различные виды активного времяпрепровождения. Под рекреационной деятельностью понимается предоставление «услуг в сфере туризма, физической культуры и спорта, организация отдыха и укрепление здоровья граждан» (ст. 41 ЛК РФ). Подобные мероприятия в основном проводятся на особо охраняемых природных территориях (ООПТ) с учетом соответствующих законодательных норм.

Городские леса являются отдельной категорией в системе рекреационных лесов и одновременно служат ООПТ местного значения или особо охраняемыми зелеными территориями (ООЗТ). Однако, как и для городских лесов, правовой статус и режим этих зон до сих пор не установлены. Следует подчеркнуть, что четкого деления на лесопарки, парки и городские леса в Москве не существует, однако большие зеленые массивы традиционно считаются городскими лесами [14], которые подчиняются тем же биологическим законам, что и леса, расположенные за чертой города [15, 16].

Поправки, принятые в сентябре 2023 г., касаются органов государственной регистрации недвижимости и охраны окружающей среды. Требуется, чтобы границы городских лесов были внесены в Единый государственный реестр недвижимости. Возможно, данная мера позволит рассматривать вопрос о городских лесах более предметно. При этом в отношении создания и совершенствования статистической базы рекреации перспективно использование современных информационных технологий, например проведение экологического мониторинга [17].

Несмотря на отсутствие четкого определения термина «городские леса», существуют законодательные акты, которые нормируют использование природных ресурсов в рекреационных лесах обобщенно. Например, до настоящего времени действуют принятые в 1985 г. рекомендации и правила [18, 19].

В связи с интенсивным строительством в Мневниковской, Нагатинской, Братеевской и Крылатской поймах утрачена растительность. Кроме того, отсутствует даже перечень городских лесов.

Мы попытались упорядочить и систематизировать список имеющихся лесных массивов столицы — ООПТ как городских лесов с учетом их статуса и местоположения (таблица).



**Лесные массивы Москвы****Moscow forested areas**

Наименование леса	Статус	Адрес
Алешкинский лес	Лесной массив	Москва, Алешкинский лес
Березовая роща	То же	Москва, Зеленоград, 2-й микрорайон
Березовая роща	«←→»	Москва, поселение Внуковское, квартал № 91
Березовый лес	«←→»	Москва, Березовый лес
Белкин лес	«←→»	Москва, пос. Коммунарка, Белкин лес
Битцевский лес	Лесопарк	Москва, Новоясеневский тупик
Говоровский лес	Лесной массив	Москва, поселение Московский, квартал № 27, Говоровский лес
Грачевка	То же	Москва, поселение Новофедоровское, квартал № 249
Долина реки Сходни в Куркине	Ландшафтный заказник	Москва, природный парк Долина реки Сходни в Куркино
Круглая Роща	Лесной массив	Москва, Круглая Роща
Культурный лес	То же	Москва, поселение Сосенское, квартал № 152, Культурный лес
Матвеевский лес	«←→»	Москва, ул. Старовольнская
Октябрьское радиополе	«←→»	Москва, лес Октябрьское радиополе
Останкинская дубрава	«←→»	Москва, Останкинская дубрава
Сад воспоминаний	«←→»	Москва, Сад воспоминаний
Соловьиная роща	«←→»	Москва, Соловьиная Роща
Роща Субботник	«←→»	Москва, роща Субботник
Сысоевский лес	«←→»	Москва, поселение Десновское, Сысоевский лес
Теплый Стан	Ландшафтный заказник	Москва, ландшафтный заказник Теплый Стан
Тушинский природно-исторический парк	Парк	Москва, ул. Свободы, 52
Урочище Сеча	Лесной массив	Москва, урочище Сеча
Хованская дубрава	То же	Москва, поселение Сосенское, квартал № 27
Чоботовский лес	Парк	Москва, 9-я улица Новые Сады

Полученные данные могут быть полезны для дальнейшего анализа и разработки предложений по улучшению законодательства и практики управления городскими лесами. Также этот

список может стать основой для проведения мониторинга состояния лесных насаждений и разработки программ по их сохранению и развитию.

Качественное управление тем или иным объектом возможно лишь при доскональном знании данного объекта. В лесах, расположенных на землях населенных пунктов, где количество произрастающих экземпляров критично, лесоустройство особенно актуально.

Количество и состояние деревьев изменяются в зависимости от условий, в которых они произрастают, а также от степени воздействия человека на окружающую среду. Наименьшее влияние оказывается на лесопарки и парки, в то время как на простых посадках, расположенных на улицах с высокой интенсивностью движения транспорта, наблюдается наибольшая антропогенная нагрузка [20]. По этой причине, проведение комплекса мероприятий, связанных с организацией лесного хозяйства в городских лесах, должно осуществляться муниципальными учреждениями, ответственными за выполнение соответствующих функций. При их отсутствии органы местного самоуправления могут осуществлять закупки работ по сохранению лесов и мероприятий по лесоустройству согласно законодательству [21]. Благоустройство, которое допустимо на ООПТ и ООЗТ, должно проводиться согласно Приказу Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации (МПР) [22]. Однако акт так и не стал действительным, хотя в соответствии с ним предыдущие Приказы МПР «Об утверждении Особенности использования, охраны, защиты, воспроизводства лесов, расположенных на особо охраняемых природных территориях» от 16.07.2007 № 181 и «Об утверждении Требований к составу и к содержанию проектной документации лесного участка, порядка ее подготовки» от 03.02.2017 № 54 утратили силу [23, 24]. Такое положение характерно для состояния лесного хозяйства после принятия ЛК РФ в 2006 г. Упомянутые документы в основном запрещали сплошные рубки на ООПТ, что логично. Также логично включение в комплекс благоустройства городских лесов мероприятий, не нарушающих функционирование и естественный облик природы: рубок, ухода, санитарных мероприятий, противопожарной защиты и т. д. Возможно, невыполнение Приказов МПР № 181 и № 54 обусловлено многочисленными обращениями к Президенту Российской Федерации некоторых ученых РАН, научных экспертов, инициативных групп и более 20 тыс. москвичей с призывом вмешаться и остановить планы масштабного хозяйственного освоения ООПТ Москвы.

Впрочем, эти обращения не помешали введению новшеств в ЛК РФ [25]. Изменения в ст. 41 касаются главным образом городских лесов: п. 4 данной статьи позволяет осуществлять благоустройство соответствующих лесных участков во время рекреационной деятельности, т. е. появилась возможность проведения любых строительных работ в городских лесах. Преобладание интересов строительного комплекса при принятии плано-проектных решений (внесение изменений в границы зеленых массивов, размещение рекреационных объектов) приводит к замене оставшихся городских лесов парковыми зонами, что угрожает уничтожением природных экосистем [26].

Поскольку и до принятия Федерального закона от 04.08.2023 № 486-ФЗ «О внесении изменений в Лесной кодекс Российской Федерации и статью 98 Земельного кодекса Российской Федерации» рекреационное освоение городских лесов осуществлялось ударными темпами, «экологические реверансы» вроде того, что рекреационные объекты «не смогут занимать площадь, превышающую 20 % общей площади предоставленного лесного участка и должны размещаться только на лесных участках, входящих в специальную зону, определенную в лесном плане субъекта РФ», не имеют отношения к делу [25]. То же самое касается невозможности строительства жилых зданий и сооружений на территории городских лесов. Существующие разрешение на строительство гостиниц отработанный механизм перевода апартаментов — коммерческой недвижимости — в жилую [27]. В представленном проекте закона было предложено размещать капитальные сооружения исключительно на территории лесных участков, включенных в особую зону, которая была определена в соответствии с лесным планом соответствующего субъекта федерации. Эта особая зона не должна превышать 3 % общей площади лесничества. Однако данные оговорки не были включены в окончательный вариант документа.

Для реализации деятельности в пределах территорий, которые не входят в 20 % общей площади земель, предназначенных для организации спортивных дорожек, троп и трасс, а также иных элементов благоустройства, включая необходимые постройки, осветительные приборы и урны, дополнительно выделяются участки, не входящие в эти 20 % (по ч. 3 ст. 41 № 486-ФЗ).

Стандартизация для лыжных трасс, велосипедных и пешеходных дорожек должна включать в себя определенные параметры: лыжные трассы — ширину не менее 3 м, для того чтобы обеспечить проезд специальных машин для уплотнения снега и прокладывания лыжни. Примерная протяженность лыжной трассы составляет 5 км.

В целях учета движения маломобильных граждан, дорожки оформляют шириной не менее 2 м, а велосипедные — двухполосными с двухсторонним движением, шириной от 2,5 до 3,6 м. Таким образом, в ходе благоустройства лесов лыжными трассами, дорожками для маломобильных граждан и велосипедистов произойдет отчуждение около 4 га леса.

Для сохранения количества произрастающих растений при организации и устройстве экскурсионных экологических троп, лыжных и велосипедных трасс целесообразно максимально придерживаться так называемых «волчьих троп» — маршрутов, стихийно протоптанных жителями. Такой прием используется также при планировке новых придомовых территорий

Внушает беспокойство и тот факт, что для обеспечения объектов рекреации электричеством, водой, газом и др., необходима прокладка траншей и организация технических зон подводимых инженерных коммуникаций [28]. Суммарная площадь указанных зон, а также подъездных дорог может значительно превысить 1 га.

Мэрия Москвы провела многомиллионные тендеры на обследование и подготовку планов развития 67 ООПТ на предмет размещения в них объектов капитального строительства. Городские леса отдаются во власть застройщиков, о чем недвусмысленно указывалось еще в проекте закона № 793310-7 от 13 сентября 2019 г. в части совершенствования правового регулирования использования лесов [29].

Таким образом, на первый план выдвигается социально-оздоровительная и экономическая роль городских лесов, а не их экологические функции, что всегда признавалось основным [30]. Продвигается идея создания рекреационной инфраструктуры, а не сохранения экологического значения леса. При уменьшении экологического потенциала лесов резко снижается и их оздоровительное значение [31]. Департамент природопользования и охраны окружающей среды (ДПиОС) Москвы намерен в ближайшее время определить места на пяти ООПТ, где можно будет разместить капитальные объекты — застройка грозит Царицыно, Покровскому-Стрешнево, Кузьминкам, Люблино, Останкино, Битцевскому лесу. Департамент объявил тендер на эту работу, размещенный на сайте госзакупок. Исполнитель должен также выявить места на территориях ООПТ, которые утратили природоохранную ценность.

Последний прием не является новым: ныне общепринято ломать, поджигать, обливать едкими веществами древесные растения, с тем чтобы затем вырубить их как «утративших природоохранную ценность» [11].

Сложно требовать от строителей, озабоченных лишь увеличением прибыли, знания биологических законов. Однако специалисты ДПиОС Москвы должны понимать: лес — это биологическое сообщество, где все члены объединяются для совместной нейтрализации загрязнения атмосферы, усиливая общий результат — создавая кумулятивный эффект [32]. Таким насаждениям свойственны ярусность: подрост, подлесок, почвенный покров из травянистых видов, характерных для данной лесной формации. Любое воздействие на хрупкую экосистему городских лесов чревато разрушением сложившихся функциональных взаимосвязей, основанных на биоразнообразии, определенной степени сокращения популяции ключевых видов наземной и подземной биоты и, как следствие, общим угнетением насаждения и уменьшением, а иногда и утратой, возможности «оказывать экосистемные услуги» [33]. Возрастной состав насаждений является одним из важнейших признаков популяции, который определяет устойчивость и способность к самоподдержанию [34, 35]. Нормальные (оптимальные) популяции обладают полной способностью к воспроизводству через семена и/или вегетативные процессы. Однако в случае лесных популяций они могут стать регрессивными, если старые растения перестают плодоносить или если условия в сообществе препятствуют развитию подроста [36].

Плодовитость имеет важное значение в долгосрочной жизнеспособности популяции. Способность к производству растениями семян обеспечивает возможность передачи генетической информации следующему поколению, а также разнообразие генетического материала, что способствует адаптации к изменяющимся условиям окружающей среды. Именно непрерывность популяции способствует ее жизнеспособности, устойчивости и экологической продуктивности [30]. Поэтому выделение земельных участков на территории городских лесов для различных государственных и муниципальных нужд, приводящее к дроблению лесных массивов, с экологической точки зрения недопустимо. Необходимо всемерно поддерживать существование городских лесов — целостной естественной экосистемы, ценность которых для здоровья жителей мегаполиса невозможно переоценить [37, 38].

### Рекомендации по внесению изменений в Лесной кодекс РФ

Поскольку новый ЛК РФ не принят, можно надеяться, что его авторы все-таки учтут пожелания ученых и требования горожан по сохранению городских лесов, хотя бы их части. Вместе с тем целесообразно предусмотреть в новом документе следующие нормы:

1) оптимизацию системы управления лесами, не оставляя «бесхозных» лесных массивов вне зависимости от их площади; поддержание стабильности природной среды путем установления особых режимов природопользования для посетителей;

2) ориентирование законодательства не на устранение результатов деградации лесных насаждений под влиянием различных вредных факторов, а на профилактику их возникновения;

3) проведение процедуры оценки воздействия на окружающую среду учеными профильных вузов, а также профилактики и мероприятий по выявлению и устранению процессов деградации городских лесных насаждений вследствие различных отрицательных воздействий;

4) при организации и устройстве экскурсионных экологических троп, лыжных и велопешеходных трасс придерживаться протоптанных жителями маршрутов в целях максимального сбережения произрастающих растений;

5) выделение особо защитных участков лесов, максимально защищенных от рекреационной дигрессии и иных неблагоприятных факторов, даже если 20 % лесного массива будут застроены;

6) регулярное проведение мониторинга состояния городских лесов, что позволит определить содержание, интенсивность и направленность лесохозяйственных мероприятий.

### Выводы

В ходе анализа поправок в Лесной Кодекс Российской Федерации, принятых в сентябре 2023 г. было выявлено, что некоторые актуальные вопросы так и не были закрыты, например, до настоящего времени отсутствует легальное определение городского леса и перечень участков городских лесов Москвы. Разрешение некоторых проблем можно рассматривать двойственно. Так, дозволение благоустройства леса может пагубно сказаться на природной естественной экосистеме, этому будет содействовать практика их замены парками. Увеличивающееся количество объектов рекреации требует дополнительных территорий для инженерных коммуникаций, что тоже способствует уменьшению площади городских лесов. Кроме того, разрешение строительства гостиниц на природе приведет к росту их популярности и последующим за этим переводом в жилые помещения для частных лиц через лазейки в законодательстве. Положительным моментом стоит отметить использование экологического мониторинга для отслеживания состояния лесов, что позволит своевременно заметить и устранить проблемы по уменьшению популярности растений и их качества. Предлагается внести изменения, требующие рассматривать городские леса не как

территорию, подлежащую освоению, а как экологическую систему, необходимую для поддержания комфортности городской среды.

## Список литературы

- [1] Бруз В.В. Тенденции урбанизации и проблемы управления современным мегаполисом // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Экономика, 2020. № 4. С. 26–38.
- [2] Манаева И.В. Урбанизация и экономическое развитие в регионах России // Экономический анализ: теория и практика, 2017. Т. 16. № 9. С. 1635–1663.
- [3] Балабейкина О.А., Файбусович Э.Л. Уровень урбанизированности территории Российской Федерации: региональный разрез // Географический вестник / Geographical Bulletin, 2018. С. 72–82.
- [4] Петров Б.А., Сенников И.С. Исследование по оценке влияния экологических факторов городской среды на здоровье населения // Фундаментальные исследования, 2014. № 7. С. 349–352.
- [5] Потапов И.И., Карцева Е.В., Корешкова С.В., Щетинина И.А. Экологические проблемы и здоровье России // Экономика природопользования, 2016. С. 15–34.
- [6] Мартыненко В.Б., Миркин Б.М., Широких П.С. Лесные экосистемы и урбанизация // Лесоведение, 2009. № 3. С. 77–88.
- [7] Создание общего будущего для жизни на Земле. URL: [http://ru.china-embassy.gov.cn/rus/zgxw/202110/t20211015\\_9547124.htm](http://ru.china-embassy.gov.cn/rus/zgxw/202110/t20211015_9547124.htm) (дата обращения: 20.11.2023).
- [8] Данченко А.М., Данченко М.А., Мясников А.Г. Современное состояние городских лесов и их использование (на примере г. Томска) // Вестник Томского государственного университета. Биология, 2010. № 4 (12). С. 90–104.
- [9] Федеральный закон от 04.12.2006 N 200-ФЗ «Лесной кодекс Российской Федерации» (ред. от 04.08.2023). URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_64299/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/) (дата обращения 22.11.2023).
- [10] Проект федерального закона № 72794-8 «Лесной кодекс Российской Федерации». Внесен на рассмотрение в Государственную Думу Российской Федерации 16.02.2022. URL: <https://sozd.duma.gov.ru/bill/72794-8> (дата обращения 22.11.2023).
- [11] Моисеев Н.А. О концепции современного лесоустройства в России // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2017. № 219. С. 58–73.
- [12] Соколов В.А. Проблемы лесоустройства в России // Сибирский лесной журнал, 2021. № 1. С. 3–12.
- [13] Федеральный закон от 02.07.2021 г. № 301-ФЗ «О внесении изменений в Лесной кодекс Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации». URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_388987/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_388987/) (дата обращения 22.11.2023).
- [14] Полякова Г.А., Гутников В.А. Парки Москвы: экология и флористическая характеристика. М.: ГЕОС, 2000. 406 с.
- [15] Лоскутов С.Р., Шапченкова О.А., Ведрова Э.Ф., Анискина А.А., Мухортова Л.В. Гигроскопические свойства подстилки хвойных и лиственных насаждений Средней Сибири // Сибирский экологический журнал, 2013. Т. 20. № 5. С. 695–702.
- [16] Попова И.В., Бурак Е.Э., Воробьева Ю.А. Оценка роли зеленых насаждений в формировании комфортных микроклиматических условий в летний период // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки, 2019. № 2. С. 47–55.
- [17] Майорова Е.И., Мышко Ф.Г., Шагиева Р.В. Правовые и организационные особенности цифровой трансформации управления при обеспечении экологически устойчивого развития Москвы // Studies in Systems, Decision and Control. Springer International Publishing Ag, Gewerbestrasse 11, Cham, Switzerland, CH-6330. 1798 с.
- [18] Рекомендации по организации и ведению хозяйства в лесах рекреационного назначения. Одобрены ученым советом института «Союзгипролесхоз» 21 декабря 1985 года. URL: <https://docs.cntd.ru/document/9032037> (дата обращения 22.11.2023).
- [19] Приказ Министерства природных ресурсов Российской Федерации от 24 апреля 2007 г. № 108 «Об утверждении Правил использования лесов для осуществления рекреационной деятельности». URL: <https://docs.cntd.ru/document/902042537> (дата обращения 22.11.2023).
- [20] Борисочкина Т.И., Когут Б.М., Хаматнуров Ш.А. Эколого-геохимическое состояние почв и грунтов зеленых насаждений Москвы (аналитический обзор) // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева, 2021. № 109. С. 129–164.
- [21] Федеральный закон «О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд» от 05.04.2013 № 44-ФЗ. URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_144624/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_144624/) (дата обращения 22.11.2023).
- [22] Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 12.08.2021 № 558 «Об утверждении Особенности использования, охраны, защиты, воспроизводства лесов, расположенных на особо охраняемых природных территориях» (зарегистрирован 17.11.2021 № 65869). URL: <https://docs.cntd.ru/document/608934721> (дата обращения 22.11.2023).
- [23] Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 16 июля 2007 г. № 181 «Об утверждении Особенности использования, охраны, защиты, воспроизводства лесов, расположенных на особо охраняемых природных территориях». URL: <https://docs.cntd.ru/document/902055496> (дата обращения 22.11.2023).
- [24] Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от от 12 марта 2008 г. № 54 «О внесении изменений в Особенности использования, охраны, защиты, воспроизводства лесов, расположенных на особо охраняемых природных территориях». URL: <https://docs.cntd.ru/document/902093137> (дата обращения 22.11.2023).
- [25] Федеральный закон от 04.08.2023 № 486-ФЗ «О внесении изменений в Лесной кодекс Российской Федерации и статью 98 Земельного кодекса Российской Федерации». URL: <https://docs.cntd.ru/document/1302361138> (дата обращения 22.11.2023).
- [26] Иванова Т.Н. Благоустройство городской среды как значимый фактор повышения качества жизни г.о. Тольятти // Концепт, 2016. Т. 38. С. 62–69.
- [27] Перевод апартamentos в жилой фонд // Law-divorce. URL: <https://law-divorce.org/perevod-apartamentov-v-zhiloj-fond/> (дата обращения 19.11.2023).
- [28] Гусев Е.В., Мухаметзянов З.Р. Среда как предпосылка взаимодействия работ при строительстве объекта // Вестник гражданских инженеров, 2012. № 2 (3). С. 138–142.
- [29] Проект федерального закона № 793310-7 «О внесении изменений в Лесной кодекс Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации». Внесен на рассмотрение в Государственную Думу Российской Федерации 13.09.2019. URL: <https://sozd.duma.gov.ru/bill/793310-7> (дата обращения 22.11.2023).
- [30] Ткаченко М.Е. Общее лесоводство. М.: Государственное лесотехническое издательство, 1955. 600 с.

- [31] Липка О.Н., Корзухин М.Д., Замолодчиков Д.Г., Добролюбов Н.Ю., Крыленко С.В., Богданович А.Ю., Семенов С.М. Роль лесов в адаптации природных систем к изменениям климата // *Лесоведение*, 2021. № 5. С. 531–546.
- [32] Морозов Г.Ф. Учение о типах насаждений / под ред. В.В. Гумана. М.: Юрайт, 2021. 371 с.
- [33] Логинов А.А., Лыков И.Н., Васильева М.А. Укрупненная оценка стоимости экосистемных услуг леса // *Проблемы региональной экологии*, 2018. № 3. С. 120–124.
- [34] Тэнсли А.Г. Использование и злоупотребление терминами и концепциями растительного происхождения // *Экология*, 1935. С. 284.
- [35] Сукачев В.Н. Идея развития в фитоценологии // *Советская ботаника*, 1942. № 1–3. С. 5–17.
- [36] Тараканов А.М., Сурина Е.А., Сеньков А.О. Лесохозяйственные мероприятия по адаптации растительности к изменению климата // *Актуальные проблемы лесного комплекса*, 2017. № 47. С. 67–71.
- [37] Майорова Е.И. Экология и экологическое законодательство Москвы. М.: МГУЛ, 2010. 362 с.
- [38] Майорова Е.И., Равчеева В.О., Савкина А.О., Шершнева В.Д. Правовые и социальные аспекты использования городских лесов Москвы // *Advances in Law Studies*, 2023. № 4. С. 41–45.

## Сведения об авторах

**Майорова Елена Ивановна** <sup>✉</sup> — д-р. юр. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Государственный университет управления», [tol003@mail.ru](mailto:tol003@mail.ru)

**Шершнева Виктория Денисовна** — студент 3 курса, ФГБОУ ВО «Государственный университет управления», [sv4812@mail.ru](mailto:sv4812@mail.ru)

Поступила в редакцию 04.12.2023.

Одобрено после рецензирования 18.12.2023.

Принята к публикации 22.03.2024.

## MOSCOW URBAN FORESTS IN VIEW OF RUSSIAN FEDERATION FORESTRY CODE CHANGES IN 2023

**E.I. Mayorova** <sup>✉</sup>, **V.D. Shershneva**

State University of Management, 99, Ryazansky av., 109542, Moscow, Russia

[tol003@mail.ru](mailto:tol003@mail.ru)

The purpose of the work is to analyze the legal and actual state of Moscow urban forests as a result of changes in forest legislation. The relevance of the work lies in the need for an overdue review of innovations in the Forestry Code, which are relevant in connection with the need to improve legislation in the field of forestry and forest protection. The importance of forests for the ecology, economy and social sphere requires the development of effective mechanisms and tools for managing forest resources, as well as protecting them from illegal logging and other forms of negative impact. The materials of the study, which are the basis, include the works of classics of forestry, ecology and environmental law, data from the analysis of recent legislative acts in the field of urban forests exploitation. The novelty of the research lies in the analysis of the latest changes made to the Forestry Code of the Russian Federation in August 2023. In the course of the research, the dialectical method, methods of analysis and synthesis, the unity of historical and logical, scientific abstraction, a systematic approach and others have been widely used, which have proven efficiency in understanding environmental issues. The amendments to the Forest Code are aimed at strengthening the legal framework for the sustainable use of forest resources, improving the efficiency of forestry, protecting forests and preserving their area. The results of the study were conclusions about the need to prevent the impact of negative factors, the allocation of areas protected from exposure, and the importance of monitoring the state of forests was also indicated.

**Keywords:** urban forest, forest legislation, recreation, capital construction, Forest Code of the Russian Federation, legal regime

**Suggested citation:** Mayorova E.I., Shershneva V.D. *Gorodskie lesa Moskvy v svete izmeneniy Lesnogo kodeksa Rossiyskoy Federatsii 2023 goda* [Moscow urban forests in view of Russian Federation Forestry Code changes in 2023]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 3, pp. 87–95.

DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-87-95

## References

- [1] Bruz V.V. *Tendentsii urbanizatsii i problemy upravleniya sovremennym megapolisom* [Trends of urbanization and problems of modern megalopolis management]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Ekonomika* [Bulletin of the Moscow State Regional University. Series: Economics], 2020, no. 4, pp. 26–38.

- [2] Manaeva I.V. *Urbanizatsiya i ekonomicheskoe razvitiye v regionakh Rossii* [Urbanization and economic development in the regions of Russia] *Ekonomicheskiy analiz: teoriya i praktika* [Economic analysis: theory and practice], 2017, v. 16, no. 9, pp. 1635–1663.
- [3] Balabeikina O.A., Faibusovich E.L. *Uroven' urbanizirovannosti territorii Rossiyskoy Federatsii: regional'nyy razrez* [The level of urbanization of the territory of the Russian Federation: a regional section]. *Geograficheskiy vestnik* [Geographical Bulletin], 2018, pp. 72–82.
- [4] Petrov B.A., Sennikov I.S. *Issledovanie po otsenke vliyaniya ekologicheskikh faktorov gorodskoy sredy na zdorov'e naseleniya* [A study to assess the impact of environmental factors of the urban environment on public health]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research], 2014, no. 7, pp. 349–352.
- [5] Potapov I.I., Kartseva E.V., Koreshkova S.V., Shchetinina I.A. *Ekologicheskie problemy i zdorov'e Rossii* [Environmental problems and health of Russia]. *Ekonomika prirodopol'zovaniya* [Economics of environmental management], 2016, pp. 15–34.
- [6] Martynenko V.B., Mirkin B.M., Shirokikh P.S. *Lesnye ekosistemy i urbanizatsiya* [Forest ecosystems and urbanization]. *Lesovedeniye* [Forestry], 2009, no. 3, pp. 77–78.
- [7] *Sozdanie obshchego budushchego dlya zhizni na Zemle* [Creating a common future for life on Earth]. Posol'stvo KNR v RF [Embassy of the People's Republic of China in the Russian Federation]. Available at: [http://ru.china-embassy.gov.cn/rus/zgxw/202110/t20211015\\_9547124.htm](http://ru.china-embassy.gov.cn/rus/zgxw/202110/t20211015_9547124.htm) (accessed 20.11.2023).
- [8] Danchenko A.M., Danchenko M. A., Myasnikov A. G. *Sovremennoe sostoyanie gorodskikh lesov i ikh ispol'zovanie (na primere g. Tomsk)* [The current state of urban forests and their use (on the example of Tomsk)]. *Vestnik Tomskogo gos. un-ta. Biologiya* [Bulletin of the Tomsk State University. Biology], 2010, № 4 (12), pp. 90–104.
- [9] *Federal'nyy zakon ot 04.12.2006 N 200-FZ «Lesnoy kodeks Rossiyskoy Federatsii» (red. ot 04.08.2023)* [Federal Law of December 4, 2006 № 200-FZ «Forest Code of the Russian Federation» (as amended on August 4, 2023)]. Available at: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_64299/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/) (accessed 22.11.2023).
- [10] *Proekt federal'nogo zakona № 72794-8 «Lesnoy kodeks Rossiyskoy Federatsii». Vnesen na rassmotrenie v Gosudarstvennuyu Dumu Rossiyskoy Federatsii 16.02.2022* [Draft Federal Law No. 72794-8 «Forest Code of the Russian Federation». Submitted to the State Duma on February 16, 2022]. Available at: <https://sozd.duma.gov.ru/bill/72794-8> (accessed 22.11.2023).
- [11] Moiseev N.A. *O kontseptsii sovremennogo lesoustroystva v Rossii* [On the concept of modern forest management in Russia] *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Izvestiya St. Petersburg Forestry Academy], 2017, v. 219, pp. 58–73.
- [12] Sokolov V.A. *Problemy lesoustroystva v Rossii* [Problems of forest management in Russia]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian Forest Journal], 2021, no. 1, pp. 3–12.
- [13] *Federal'nyy zakon ot 02.07.2021 g. № 301-FZ «O vnesenii izmeneniy v Lesnoy kodeks Rossiyskoy Federatsii i otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossiyskoy Federatsii»* [Federal Law No. 301-FZ dated July 2, 2021 «On Amendments to the Forest Code of the Russian Federation and Certain Legislative Acts of the Russian Federation»]. Available at: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_388987/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_388987/) (accessed 22.11.2023).
- [14] Polyakova G.A., Gutnikov V.A. *Parki Moskvy: ekologiya i floristicheskaya kharakteristika* [Parks of Moscow: ecology and floristic characteristics]. Moscow: Geos, 2000, p. 406.
- [15] Loskutov S.R., Shapchenkova O.A., Vedrova E.F., Aniskina A.A., Mukhortova L.V. *Gigroskopicheskie svoystva podstilki khvoynykh i listvennykh nasazhdeniy Sredney Sibiri* [Hygroscopic properties of the litter of coniferous and deciduous plantations in Central Siberia]. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal* [Siberian Ecological Journal], 2013, v. 20, no. 5, pp. 695–702.
- [16] Popova I.V., Burak E.E., Vorobyova Yu.A. *Otsenka roli zelenykh nasazhdeniy v formirovaniy komfortnykh mikroklimaticeskikh usloviy v letniy period* [Assessment of the role of green spaces in the formation of comfortable microclimatic conditions in the summer period]. *Vestnik Baltiyskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. Seriya: Estestvennye i meditsinskie nauki* [Bulletin of the Baltic Federal University named after I. Kant. Series: Natural and Medical Sciences], 2019, no. 2, pp. 47–55.
- [17] Mayorova E.I., Myshko F.G., Shagiya R.V. *Pravovyye i organizatsionnyye osobennosti tsifrovoy transformatsii upravleniya pri obespechenii ekologicheskoy ustoychivogo razvitiya Moskvy* [Legal and organizational features of digital management transformation in ensuring environmentally sustainable development of Moscow]. *Sotsial'no-ekonomicheskiye sistemy: paradigmy budushchego: «Issledovaniya sistem, resheniy i kontrolya»* [Socio-Economic Systems: Paradigms for the Future: «Studies in Systems, Decision and Control»]. *Studies in Systems, Decision and Control*. Springer International Publishing Ag, Gewerbestrasse 11, Cham, Switzerland, CH-6330, 1798 p.
- [18] *Rekomendatsii po organizatsii i vedeniyu khozyaystva v lesakh rekreatsionnogo naznacheniya. Odobreny uchenym sovetom instituta «Soyuzgiproleskhoz» 21 dekabrya 1985 goda* [Recommendations for organizing and managing forests for recreational purposes. Approved by the Scientific Council of the Soyuzgiproleskhoz Institute on December 21, 1985]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/9032037> (accessed 22.11.2023).
- [19] *Prikaz Ministerstva prirodnykh resursov Rossiyskoy Federatsii ot 24 aprelya 2007 g. № 108 «Ob utverzhdenii Pravil ispol'zovaniya lesov dlya osushchestvleniya rekreatsionnoy deyatel'nosti»* [Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation dated April 24, 2007 No. 108 «On approval of the Rules for the use of forests for recreational activities»]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/902042537> (accessed 22.11.2023).
- [20] Borisochkina T.I., Kogut B.M., Khamaturov Sh.A. *Ekologo-geokhimicheskoe sostoyanie pochv i gruntov zelenykh nasazhdeniy Moskvy (analiticheskiy obzor)* [Ecological and geochemical state of soils and soils of green spaces in Moscow (analytical review)]. *Byulleten' Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva* [Bulletin of the Soil Institute named after V.V. Dokuchaeva], 2021, no. 109, pp. 129–164.
- [21] *Federal'nyy zakon «O kontraktnoy sisteme v sfere zakupok tovarov, rabot, uslug dlya obespecheniya gosudarstvennykh i munitsipal'nykh nuzhd» ot 05.04.2013 № 44-FZ* [Federal Law «On the contract system in the field of procurement of goods, works, services to meet state and municipal needs» dated May 04, 2013, no. 44-FZ]. Available at: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_144624/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_144624/) (accessed 22.11.2023).
- [22] *Prikaz Ministerstva prirodnykh resursov i ekologiy Rossiyskoy Federatsii ot 12.08.2021 № 558 «Ob utverzhdenii Osobennostey ispol'zovaniya, okhrany, zashchity, vosproizvodstva lesov, raspolozhennykh na osobo okhranyaemykh prirodnykh territoriyakh» (zaregistririvan 17.11.2021 № 65869)* [Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation dated August 12, 2021, no. 558 «On approval of the Peculiarities of the use, conservation, defense, and reproduction of forests located in specially protected natural areas» (Registered November 17, 2021, no. 65869)]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/608934721> (accessed 22.11.2023).

- [23] *Prikaz Ministerstva prirodnykh resursov i ekologii Rossiyskoy Federatsii ot 16 iyulya 2007 g. № 181 «Ob utverzhdenii Osobennostey ispol'zovaniya, okhrany, zashchity, vosproizvodstva lesov, raspolozhennykh na osobo okhranyaemykh prirodnykh territoriyakh»* [Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation dated July 16, 2007, no. 181 «On approval of the Peculiarities of the use, conservation, protection, and reproduction of forests located in specially protected natural areas»]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/902055496> (accessed 22.11.2023).
- [24] *Prikaz Ministerstva prirodnykh resursov i ekologii Rossiyskoy Federatsii ot 12 marta 2008 g. № 54 «O vnesenii izmeneniy v Osobennosti ispol'zovaniya, okhrany, zashchity, vosproizvodstva lesov, raspolozhennykh na osobo okhranyaemykh prirodnykh territoriyakh»* [Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation dated March 12, 2008, no. 54 «On amendments to the Peculiarities of the use, conservation, protection, and reproduction of forests located in specially protected natural areas»]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/902093137> (accessed 22.11.2023).
- [25] *Federal'nyy zakon ot 04.08.2023 № 486-FZ «O vnesenii izmeneniy v Lesnoy kodeks Rossiyskoy Federatsii i stat'yu 98 Zemel'nogo kodeksa Rossiyskoy Federatsii»* [Federal Law of August 4, 2023, no. 486-FZ «On Amendments to the Forest Code of the Russian Federation and Article 98 of the Land Code of the Russian Federation»]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1302361138> (accessed 22.11.2023).
- [26] Ivanova T.N. *Blagoustroystvo gorodskoy sredy kak znachimyy faktor povysheniya kachestva zhizni g.o. Tol'yatti* [Improvement of the urban environment as a significant factor in improving the quality of life in Tolyatti]. *Kontsept* [Concept], 2016, v. 38, pp. 62–69.
- [27] *Perevod apartamentov v zhiloy fond* [Transfer of apartments to the housing stock]. Law-divorce. Available at: <https://law-divorce.org/perevod-apartamentov-v-zhiloy-fond/> (accessed 19.11.2023).
- [28] Gusev E.V., Mukhametzyanov Z.R. *Sreda kak predposylka vzaimodeystviya rabot pri stroitel'stve ob'ekta* [The environment as a prerequisite for the interaction of works during the construction of an object]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers], 2012, no. 2 (3), pp. 138–142.
- [29] *Proekt federal'nogo zakona № 793310-7 «O vnesenii izmeneniy v Lesnoy kodeks Rossiyskoy Federatsii i otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossiyskoy Federatsii»*. *Vnesen na rassmotrenie v Gosudarstvennyuyu Dumu 13.09.2019* [Draft Federal Law, no. 793310-7 «On Amendments to the Forest Code of the Russian Federation and Certain Legislative Acts of the Russian Federation». Submitted for consideration to the State Duma on 13.09.2019. Available at: <https://sozd.duma.gov.ru/bill/793310-7> (accessed 22.11.2023)
- [30] Tkachenko M.E. *Obshchee lesovodstvo* [General forestry]. Gosudarstvennoe lesotekhnicheskoe izdatel'stvo [State Forestry Publishing House], 1955, p. 600.
- [31] Lipka O. N., Korzukhin M. D., Zamolodchikov D. G., Dobrolyubov N. Yu., Krylenko S. V., Bogdanovich A. Yu., Semenov S. M. *Rol' lesov v adaptatsii prirodnykh sistem k izmeneniyam klimata* [The role of forests in the adaptation of natural systems to climate change]. *Lesovedenie* [Forestry], 2021, no. 5, pp. 531–546.
- [32] Morozov G.F. *Uchenie o tipakh nasazhdeniy* [The doctrine of types of plantings]. Edited by V.V. Guman. Moscow: Yurait, 2021, p. 371.
- [33] Loginov A.A., Lykov I.N., Vasilyeva M.A. *Ukrupnennaya otsenka stoimosti ekosistemnykh uslug lesa* [An integrated assessment of the cost of ecosystem services of the forest]. *Problemy regional'noy ekologii* [Problems of regional ecology], 2018, no. 3, pp. 120–124.
- [34] Tansley A.G. *Ispol'zovanie i zloupotreblenie terminami i kontseptsiyami rastitel'nogo proiskhozhdeniya* [The use and abuse of terms and concepts of plant origin]. *Ekologiya* [Ecology], 1935, p. 284.
- [35] Sukachev V.N. *Ideya razvitiya v fitotsenologii* [The idea of development in phytocenology]. *Sov. botanika* [Soviet Botany], 1942, no. 1–3, pp. 5–17.
- [36] Tarakanov A.M., Surina E.A., Senkov A.O. *Lesokhozyaystvennyye meropriyatiya po adaptatsii rastitel'nosti k izmeneniyu klimata* [Forestry measures for vegetation adaptation to climate change]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex], 2017, no. 47, pp. 67–71.
- [37] Mayorova E.I. *Ekologiya i ekologicheskoe zakonodatel'stvo Moskvy* [Ecology and environmental legislation of Moscow]. Moscow: MSFU, 2010, p. 362.
- [38] Mayorova E.I., Ravcheeva V.O., Savkina A.O., Shershneva V.D. *Pravovye i sotsial'nye aspekty ispol'zovaniya gorodskikh lesov Moskvy* [Legal and social aspects of the use of urban forests in Moscow]. *Advances in Law Studies* [Advances in Law Studies], 2023, no. 4, pp. 41–45.

## Authors' information

**Mayorova Elena Ivanovna** <sup>✉</sup> — Dr. Sci. (Law), Professor, State University of Management, [trol003@mail.ru](mailto:trol003@mail.ru)  
**Shershneva Victoria Denisovna** — 3rd year Student of the State University of Management, [sv4812@mail.ru](mailto:sv4812@mail.ru)

Received 04.12.2023.

Approved after review 18.12.2023.

Accepted for publication 22.03.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article  
The authors declare that there is no conflict of interest

## ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ДРЕВЕСНО-ЦЕМЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.И. Запруднов<sup>1✉</sup>, В.В. Никитин<sup>1</sup>, С.П. Карпачев<sup>1</sup>, Г.А. Махнин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1  
<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Россия, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

zaprudnov@mgul.ac.ru

Приведены результаты исследований деформаций древесно-цементных материалов, возникающих под действием кратковременных нагрузок. Определены значения начального модуля упругости (335...495 МПа) и коэффициента Пуассона древесно-цементных материалов (0,154...0,101), изменяющиеся в зависимости от класса древесно-цементного материала по прочности на сжатие В0,35...В1. Установлено возрастание значений начального модуля упругости и модуля сдвига древесно-цементного материала с увеличением относительного объемного содержания цемента  $c_2$  от 0,50 до 0,58 и уменьшение коэффициента Пуассона. Выявлена возможность повышения значений начального модуля упругости и модуля сдвига с помощью увеличения относительного объемного содержания наполнителя (золы)  $c_4$  от 0 до 0,1 при постоянном расходе вяжущего и органического наполнителя. Указано согласование полученных значений начального модуля упругости и коэффициентов Пуассона древесно-цементных материалов с данными, полученными ранее, однако они, как и прочность древесно-цементных материалов, оказались на 20...25 % ниже теоретических. Показано влияние конгломератной структуры древесно-цементного материала на его упругие и пластические свойства, что связано с образованием и накоплением микротрещин и пластическими свойствами гелевой составляющей цементного камня. Сделан вывод, что для прогнозирования деформаций ползучести и усадки древесно-цементных материалов, в зависимости от возраста загрузки, можно использовать ранее полученные аналитические зависимости.

**Ключевые слова:** древесно-цементные материалы, деформации ползучести и усадки, модуль упругости, коэффициент Пуассона

**Ссылка для цитирования:** Запруднов В.И., Никитин В.В., Карпачев С.П., Махнин Г.А. Деформационные свойства древесно-цементных материалов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 3. С. 96–104. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-96-104

Деформации древесно-цементных материалов представляют собой интегральные характеристики, которые зависят от свойств его компонентов, состава, условий приготовления и твердения древесно-цементной смеси, условий эксплуатации [1–7, 16–19, 22, 24].

Деформации в древесно-цементном материале возникают в процессе твердения, изготовления конструкций из него, и их эксплуатации вследствие изменений объема. Их размеры зависят от структуры древесно-цементного материала, свойств составляющих его компонентов, особенностей технологии и некоторых других факторов. При проектировании конструкций из древесно-цементного материала, учитывают его деформационные свойства, оказывающие большое влияние на качество и долговечность этих конструкций [11–15].

Деформации древесно-цементного материала условно можно подразделить на следующие виды:

– собственные деформации древесно-цементной смеси (первоначальная усадка) и древесно-цементного материала (усадка и расширение),

возникающие под действием протекающих в них физико-химических процессов;

– деформации, формирующейся под действием механических нагрузок [8–10, 20, 21].

При этом различают деформации древесно-цементного материала, возникающие вследствие как кратковременного, так и длительного действия нагрузок — ползучести и температурных деформаций.

### Цель работы

Цель работы — исследование деформаций древесно-цементных материалов, возникающих под действием кратковременных нагрузок и зависимости модуля упругости, модуля сдвига, коэффициента Пуассона от относительного объемного содержания цемента и золы в древесно-цементном композите.

### Объекты и методы исследования

Значения модуля упругости и коэффициента Пуассона древесно-цементных материалов определены в 28-суточном возрасте по ГОСТ 24452–80 «Бетоны. Методы определения призмной



прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона» на образцах — призмах квадратного сечения и при одновременном установлении их призмной прочности [1, 2, 5].

Для измерения продольных деформаций применяли индикаторы часового типа ИЧ-10 с ценой деления 0,01 мм на базе измерения 40 см. Для измерения поперечных деформаций использовали механические тензометры с базой измерения 100 мм и ценой деления 0,001 мм. Тензометры крепились с помощью струбцин перпендикулярно к исследуемой поверхности.

Определение начального модуля упругости при сжатии и растяжении проводилось при напряжении не более 0,3 предела прочности, принятом для всех бетонов условия.

Приращение относительных продольных  $\varepsilon_1$  и поперечных  $\varepsilon_2$  деформаций вычисляли как среднее арифметическое показаний приборов по четырем граням призмы.

Для каждой ступени нагрузки подсчитывали упругую часть деформации  $\varepsilon_{1y}$  ( $\varepsilon_{2y}$ ) как разность между величиной полной деформации  $\varepsilon_1$  ( $\varepsilon_2$ ) и суммой приращений деформаций ползучести  $\sum \varepsilon_{1n}$  ( $\sum \varepsilon_{2n}$ ), полученные при выдержке нагрузки на всех предыдущих ступенях по формулам

$$\varepsilon_{1y} = \varepsilon_1 - \sum \varepsilon_{1n}; \quad (1)$$

$$\varepsilon_{2y} = \varepsilon_2 - \sum \varepsilon_{2n}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{1y}$  и  $\varepsilon_{2y}$  — приращения упруго-мгновенных относительных продольных и поперечных деформаций образца, соответствующих уровню нагрузки  $P_1 = 0,3P_p$ , и замеренные в начале каждой ступени ее приложения;

$\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  — приращения полных относительных продольных и поперечных деформаций образца, соответствующих уровню нагрузки  $P_1 = 0,3P_p$ , замеренные в конце ступени ее приложения;

$\sum \varepsilon_{1n}$  и  $\sum \varepsilon_{2n}$  — приращения относительных продольных и поперечных деформаций быстро натекающей ползучести, полученные при выдержке нагрузки ступенями до уровня нагрузки  $P_1 = 0,3P_p$ ;

$P_p$  — нагрузка разрушения образца древесно-цементного материала, кН.

Модуль упругости вычисляли для каждого образца по формуле

$$E = \frac{\sigma_{30}}{\varepsilon_{30}}, \quad (3)$$

где  $E$  — модуль упругости, МПа;

$\sigma_{30}$  — приращение напряжения от условного нуля до уровня нагрузки  $0,3P_p$ ;

$\varepsilon_{30}$  — приращение относительной продольной деформации образца, соответствующей нагрузке  $P_1 = 0,3P_p$ , замеренное в начале каждой ступени ее приложения.

Коэффициент Пуассона  $\nu$  вычисляли для каждого образца по формуле

$$\nu = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}. \quad (4)$$

Одновременно исследовали предельную сжимаемость древесно-цементного материала, определяли коэффициенты упругости и пластичности. Замеренную сжимаемость древесно-цементного материала при нагрузке, равной  $0,9P_p$ , экстраполировали на разрушающее усилие, используя при этом график зависимости величины продольных деформаций в древесно-цементном материале от напряжений. При оценке предельной сжимаемости древесно-цементного материала учитывали полную сжимаемость  $\varepsilon_1$  с учетом пластических  $\varepsilon_{1n}$  и упругих деформаций  $\varepsilon_{1y}$ . Предельную сжимаемость вычисляли по формуле

$$\varepsilon_{сж} = \frac{\varepsilon_{1y} + \varepsilon_{1n}}{l_1} = \frac{\varepsilon_1}{l_1}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_{сж}$  — предельная сжимаемость;

$l_1$  — фиксированная база изменения продольной деформации образца.

Коэффициенты упругости и пластичности определяли по формулам

$$k_y = \frac{\varepsilon_{1y}}{\varepsilon_1}; \quad (6)$$

$$k_n = \frac{\varepsilon_{1n}}{\varepsilon_1}. \quad (7)$$

## Результаты исследования

Результаты исследований представлены в табл. 1, на рис. 1 и 2. На рис. 1 и 2 приведена зависимость модуля упругости ( $E$ ), модуля сдвига ( $\mu$ ) и коэффициента Пуассона ( $\nu$ ) от относительного объемного содержания цемента  $c_2$  и золы  $c_4$  в древесно-цементном материале при расходе органического заполнителя 150 и 170 кг/м<sup>3</sup>.

Относительные объемные содержания компонентов  $c_2$  и  $c_4$  определены следующим образом

$$c_1 = \frac{v_1}{v_1 + v_2 + v_3 + v_4}; \quad c_2 = \frac{v_2}{v_1 + v_2 + v_3 + v_4}; \quad (8)$$

$$c_3 = \frac{v_3}{v_1 + v_2 + v_3 + v_4}; \quad c_4 = \frac{v_4}{v_1 + v_2 + v_3 + v_4},$$

где  $c_1, c_2, c_3, c_4, v_1, v_2, v_3, v_4$  — соответственно относительные и абсолютные объемные содержания компонентов из органического заполнителя, цемента, воды и золы для составов древесно-цементных материалов, приведенных в табл. 2 и 3.

Т а б л и ц а 1

Начальный модуль упругости и коэффициент Пуассона для древесно-цементных материалов  
Initial modulus of elasticity and Poisson's ratio for wood-cement materials

Класс по прочности на сжатие	Нагрузка, % от $P_p$	Напряжения, $\sigma$ , МПа	Деформации, мм/м		Модуль упругости $E$ , МПа	Коэффициент Пуассона $\nu$	Модуль сдвига $\mu$ , МПа
			продольные, $\epsilon_{1y}$	поперечные, $\epsilon_{2y}$			
В0,35	10	0,05	0,146	0,015	347	0,105	157
	20	0,10	0,296	0,033	341	0,112	153
	30	0,15	0,454	0,070	335	0,154	145
	40	0,20	0,631	0,107	320	0,170	137
	50	0,26	0,823	0,145	316	0,176	134
В0,75	10	0,13	0,296	0,018	424	0,062	200
	20	0,26	0,591	0,058	436	0,098	198
	30	0,38	0,926	0,125	415	0,135	183
	40	0,48	1,210	0,172	398	0,142	168
	50	0,55	1,459	0,232	377	0,159	165
В1	10	0,19	0,356	0,015	542	0,042	260
	20	0,38	0,716	0,049	525	0,069	245
	30	0,56	1,130	0,114	495	0,101	235
	40	0,68	1,425	0,152	478	0,107	216
	50	0,75	1,586	0,239	473	0,113	212

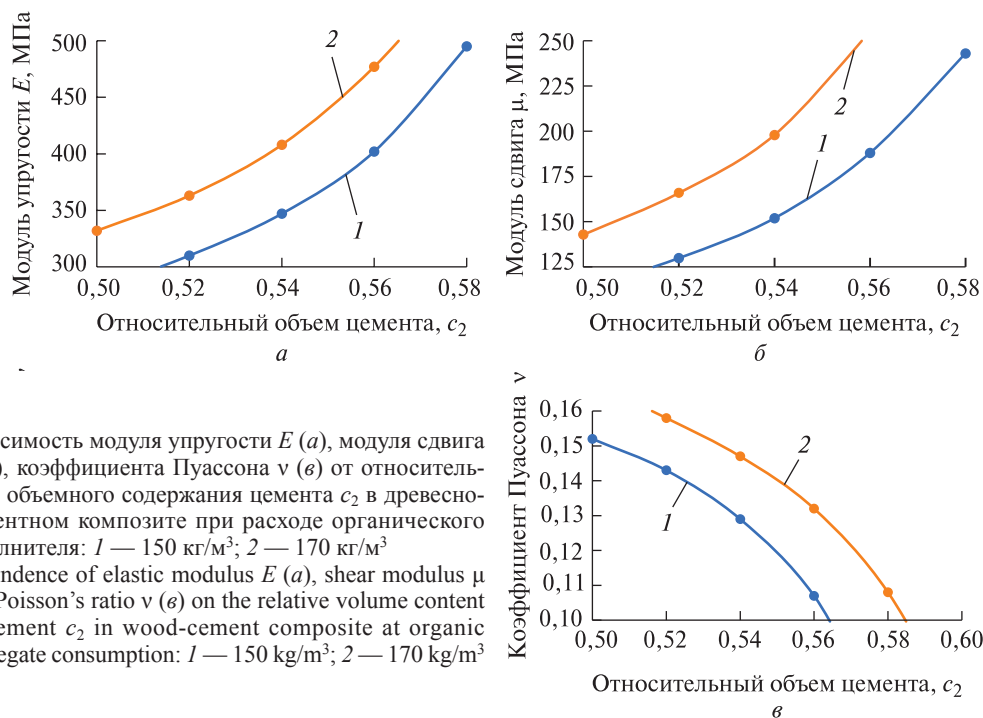


Рис. 1. Зависимость модуля упругости  $E$  (а), модуля сдвига  $\mu$  (б), коэффициента Пуассона  $\nu$  (в) от относительного объемного содержания цемента  $c_2$  в древесно-цементном композите при расходе органического заполнителя: 1 — 150 кг/м<sup>3</sup>; 2 — 170 кг/м<sup>3</sup>

Fig. 1. Dependence of elastic modulus  $E$  (a), shear modulus  $\mu$  (b), Poisson's ratio  $\nu$  (v) on the relative volume content of cement  $c_2$  in wood-cement composite at organic aggregate consumption: 1 — 150 kg/m<sup>3</sup>; 2 — 170 kg/m<sup>3</sup>

Анализ результатов исследований показал, что значение начального модуля упругости изменяется в пределах 335...495 МПа в зависимости от класса древесно-цементного материала по прочности на сжатие В0,35...В1, а коэффициент Пуассона — в пределах 0,154...0,101.

С увеличением относительного объемного содержания цемента  $c_2$  от 0,50 до 0,58 возрастают значения начального модуля упругости и модуля сдвига древесно-цементного материала, а коэффициент Пуассона уменьшается.

Установлено, что для теплоизоляционного древесно-цементного материала увеличение относи-

тельного объемного содержания наполнителя (зола)  $c_4$  от 0 до 0,1, при постоянном расходе вяжущего и органического заполнителя, также позволяет увеличить значение начального модуля упругости и модуля сдвига.

Для древесно-цементного материала с наполнителем из древесной стружки (шерсти) величина начального модуля упругости составила 134 МПа, а коэффициента Пуассона 0,062.

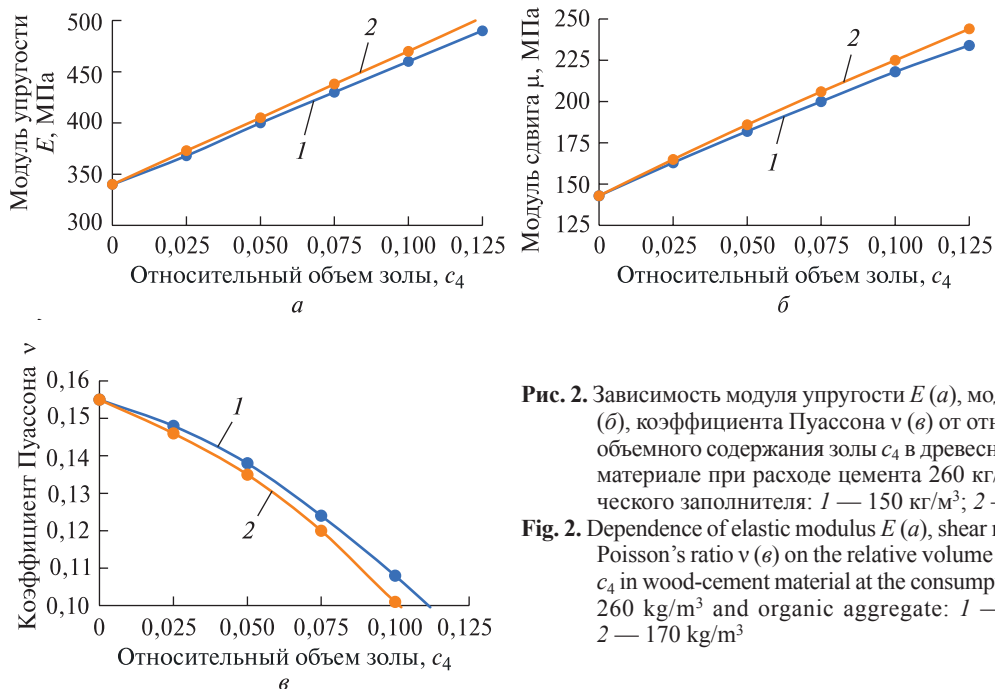
Коэффициент упругости древесно-цементного материала в зависимости от класса колеблется от 0,60 до 0,75, а коэффициент пластичности от 0,26 до 0,36.

## Результаты испытаний на сжатие древесно-цементных материалов

## Compression test results of wood-cement materials

Наименование заполнителя	Расход и соотношения компонентов			Средняя прочность $\bar{R}_{сж}^{28}$ , МПа		Средняя плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Класс по прочности на сжатие
	заполнитель, кг/м <sup>3</sup>	цемент : заполнитель (Ц/З)	вода : заполни- тель (В/З)	экспертные значения	теоретические значения		
Древесная дробленка	150	1,73	1,38	0,52	0,50	410	B0,35
	150	2,03	1,53	1,08	1,06	455	B0,75
	150	2,33	1,63	1,41	1,42	500	B1
	170	1,53	1,07	0,50	0,50	430	B0,35
	170	1,79	1,53	1,09	1,06	475	B0,75B1
	170	1,92	1,64	1,48	1,42	497	B0,75B1
Костра конопли	160	1,90	1,71	0,48	0,50	464	B0,35
	180	1,69	1,52	0,52	0,50	484	B0,35
Древесная шерсть	70	2,29	2,06	0,23	–	230	–
	75	2,13	1,92	0,24	–	235	–
	80	2,0	1,80	0,25	–	240	–

*Примечание.* Теоретическое значение средней прочности ( $\bar{R}$ ) древесно-цементного материала каждого класса определено при нормативном коэффициенте вариации, равном  $v = 18\%$  по формуле  $\bar{R} = \frac{B}{(1-1,64v)}$ .



**Рис. 2.** Зависимость модуля упругости  $E$  (а), модуля сдвига  $\mu$  (б), коэффициента Пуассона  $\nu$  (в) от относительного объемного содержания золы  $c_4$  в древесно-цементном материале при расходе цемента 260 кг/м<sup>3</sup> и органического заполнителя: 1 — 150 кг/м<sup>3</sup>; 2 — 170 кг/м<sup>3</sup>

**Fig. 2.** Dependence of elastic modulus  $E$  (a), shear modulus  $\mu$  (б), Poisson's ratio  $\nu$  (в) on the relative volume content of ash  $c_4$  in wood-cement material at the consumption of cement 260 kg/m<sup>3</sup> and organic aggregate: 1 — 150 kg/m<sup>3</sup>; 2 — 170 kg/m<sup>3</sup>

Предельная сжимаемость древесно-цементного материала в среднем для класса древесно-цементного материала по прочности на сжатие B0,35, B0,75 и B1 составляет 2,55 мм/м.

Полученные величины начальных модулей упругости и коэффициентов Пуассона теплоизоляционных древесно-цементных материалов хорошо согласуются с данными работ [12], однако они, как и прочность древесно-цементных материалов, оказались на 20...25 % ниже теоретических.

В настоящее время описания деформационных свойств многих древесно-цементных материалов ограничиваются результатами экспериментов по определению механических показателей без теоретического обобщения. Численные показатели деформации древесно-цементных материалов, выпускаемых промышленными предприятиями, варьируют в зависимости от качества исходных сырьевых материалов, технологии их изготовления, климатических и других факторов [11–20].

**Результаты испытаний на сжатие древесно-цементных материалов с заполнителем из древесной дробленки и минеральным наполнителем (зола)**

**Compression test results of wood-cement materials with wood crushed aggregate and mineral filler (ash)**

Коэффициент уплотнения, $K_{упл}$	Расход и соотношения компонентов				Средняя прочность $\bar{R}_{сж}^{28}$ МПа		Средняя плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Класс по прочности на сжатие
	заполнитель, кг/м <sup>3</sup>	зола, кг/м <sup>3</sup>	цемент : заполнитель, Ц/З	вода : заполнитель, В/З	экспертные значения	теоретические значения		
1,1	150	0	1,73	1,21	0,55	0,50	410	B0,35
	150	30	1,73	1,39	1,10	1,06	440	B0,75
	150	30	2,13	1,81	1,47	1,42	470	B1
1,2	170	0	1,53	1,22	0,57	0,50	430	B0,35
	170	30	1,53	1,26	1,04	1,06	460	B0,75B1
	170	60	1,53	1,42	1,49	1,42	490	
1,3	190	30	1,53	1,17	1,50	1,42	480	B1

*Примечание.* Теоретическое значение средней прочности ( $\bar{R}$ ) древесно-цементного теплоизоляционного материала каждого класса определяется при нормативном коэффициенте вариации, равном  $v = 18\%$  по формуле  $\bar{R} = \frac{B}{(1-1,64v)}$

К числу наиболее изученных деформационных характеристик следует отнести модуль упругости, коэффициент Пуассона, набухание и усадку. Недостаточно изучены такие упругие постоянные древесно-цементных материалов, как, например, модуль сдвига, численные значения которого необходимы для проектирования и расчета конструкций.

Влажностные деформации древесно-цементных материалов в процессе эксплуатации конструкций оказывают существенное влияние на их качество. Данные отечественных исследователей об этих свойствах древесно-цементных материалов получены лишь по предельным величинам усадки и набухания.

Анализ литературных данных свидетельствует о необходимости дальнейших более детальных исследований влияния различных факторов на прочностные и деформационные свойства древесно-цементных материалов. По нашему мнению, при разработке теории прочности и деформации древесно-цементных материалов подход должен быть несколько другим и основываться на исследовании зависимости между основными механическими характеристиками материалов и свойствами составляющих их компонентов. Эта задача может быть решена методами механики композиционных материалов.

## Выводы

По результатам проведенных исследований установлено наличие для древесно-цементных материалов двух областей деформирования: неполной упругости и интенсивного развития деформаций. В первой области упругая деформация линейно зависит от напряжений, а во второй — эта зависимость нелинейная. Остаточная дефор-

мация появляется с самого начала загрузки и непропорциональна напряжениям на всем протяжении деформирования. Границе между областями соответствует напряжение, которое, независимо от возраста материала к моменту загрузки, составляет 65 % призмочной прочности.

Для аналитического описания деформаций ползучести  $\epsilon_n(\tau, \tau_1)$  древесно-цементных материалов бетонов в области линейного деформирования можно использовать зависимость  $\epsilon_n(\tau, \tau_1) = \sigma(\tau_1)C(\tau, \tau_1)$ , где  $C(\tau, \tau_1)$  — некоторая удельная по отношению к абсолютным значениям напряжений относительная деформация ползучести.

Для прогнозирования значений относительных деформаций усадки древесно-цементных материалов в области линейного деформирования, накопленных от момента времени  $\tau_1$ , можно использовать аналитическую зависимость  $\epsilon_w(\tau, \tau_1) = \epsilon_w(\infty, 0)(e^{-\gamma_w \tau} - e^{-\gamma_w \tau_1})$ , в которой значения предельной деформации усадки  $\epsilon_w(\infty, 0)$  и показателя степени  $\gamma_w$  определяются математической обработкой опытных данных для каждого из рассматриваемых материалов.

Модуль деформаций древесно-цементных материалов является случайной величиной, значения которой зависят от прочности и плотности материалов. Поэтому при его определении необходимо учитывать вероятностный характер распределения этих величин и вид функции распределения.

## Список литературы

- [1] Гончарова М.А., Бочарников А.С., Комаричев А.В. Композиционные материалы на основе цементно-водных активированных систем для инъекционного уплотнения бетона ограждающих конструкций // Строительные материалы, 2015. № 5. С. 31–35.

- [2] Васильков С.Н. Технологии производства и применения экологически чистых и энергоэффективных строительных материалов на основе древесного сырья // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*, 2004. № 11. С. 50.
- [3] Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны. М.: АСВ, 2006. 368 с.
- [4] Галебуй С. Механизм формирования прочности и разрушения поризованного арболита на стеблях хлопчатника // *Механизация строительства*, 2011. № 10. С. 23–24.
- [5] Андреев А.А., Колесников Г.Н., Чалкин А.А. Древесно-цементный композит с добавкой стеатита как конструкционный и деформирующий материал // *Ученые записки Петрозаводского государственного университета*. Серия: «Естественные и технические науки», 2014. № 6 (143). С. 75–78.
- [6] Аракелян А.А. Прочностные и деформативные свойства легких бетонов в зависимости от свойств заполнителей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1986. 24 с.
- [7] Гончарова М.А., Чернышеви М.А. Формирование систем твердения композитов на основе техногенного сырья // *Строительные материалы*, 2013. № 5. С. 60–63.
- [8] Запруднов В.И. Создание качественных древесно-цементных материалов // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2017. Т. 21. № 6. С. 54–60. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-54-60
- [9] Зайцев Ю.В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушений. М.: Стройиздат, 1982. 196 с.
- [10] Король Е.А. Трехслойные ограждающие железобетонные конструкции из легких бетонов и особенности их расчета. М.: АСВ, 2001. С. 52–69.
- [11] Новикова Н.О., Ярцев В.П. Применение арболита и его аналогов в разных странах // *Синергия наук*, 2018. № 19. С. 524–537.
- [12] Мельникова Л.В. Технология композиционных материалов из древесины. М.: МГУЛ, 2004. 234 с.
- [13] Наназашвили И.Х. Арболит — эффективный строительный материал. М.: Стройиздат, 1984. 125 с.
- [14] Подчуфаров В.С., Чемлева Т.А., Щербаков А.С. Об оптимальном составе арболита повышенного качества // *Научные труды МГУЛ*, 1976. Вып. 93. С. 68–88.
- [15] Рыбьев И.А. Две важнейшие закономерности в свойствах материалов с конгломератным типом структуры // *Строительные материалы*, 1965. № 1. С. 17–20.
- [16] Цепяев В.А. Длительная прочность и деформативность конструкционных древесно-цементных материалов и несущих элементов на их основе: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Нижний Новгород: Изд-во НГАСУ, 2001. 46 с.
- [17] Хорошун Л.П., Щербаков А.С. Прочность и деформативность арболита. Киев: Наукова думка, 1979. 192 с.
- [18] Савин В.И., Колосов Г.Е., Соколов Б.А. Стеновые панели из поризованного арболита // *Легкие бетоны на основе отходов промышленности и конструкции из них*. М.: Изд-во НИИЖБ, 1983. С. 8–14.
- [19] Савин В.И., Давидюк А.Н. Технология и основные физико-механические свойства поризованного арболита на полимерном вяжущем // *Научные труды МГУЛ*, 1986. Вып. 180. С. 30–43.
- [20] Jayanudin J., Fahrurrozi M., Wirawan S.K., Rochmadi R. Mathematical modeling of the red ginger oleoresin release from chitosan-based microcapsules using emulsion crosslinking method // *Engineering Science and Technology*, 2019, v. 22, iss. 2, pp. 458–467.
- [21] Щибря А.Ю. Эффективный теплоизоляционный материал из поризованного арболита на рисовой лузге: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 2000. С. 21.
- [22] Boadu K.B., Antwi-Boasiako C., Ofosuhene L. Solvent extraction of inhibitory substances from three hardwoods of different densities and their compatibility with cement in composite production // *J. of the Indian Academy of Wood Science*, 2018, v. 15, pp. 140–148.
- [23] Berkenkamp R. Wood fiber-cement product, process and properties. Ed. A.A.Moslemi, *Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials*. Madison, WI. Forest Products Society, 2017, pp. 8–13.
- [24] Cheumani Y.A.M., Ndikontar M., De Jéso B, Sèbe G. Probing of wood–cement interactions during hydration of wood–cement composites by proton low-field NMR relaxomet // *J. Mater. Sci.*, 2011, v. 46, pp. 1167–1175.
- [25] Fan M., Ndikontar M.K., Zhou X., Ngamveng J.N. Cement-bonded composites made from tropical woods // *Compatibility of wood and cement*. Construction and Building Materials, 2012, v. 36, pp. 135–140.
- [26] Frybort S., Mauritz R., Teischinger A., Muller U. Cement bonded composites – a mechanical review // *BioResources*, 2008, v. 3(2), pp. 602–626.
- [27] Jorge F.C., Pereira C., Ferreira J.M.F. Wood-cement composites: a review // *Holz als Roh-und Werkstoff*, 2004, v. 62(5), pp. 370–377.
- [28] Parchen C.F.A., Iwakiri, S., Zeller, F. Vibro-dynamic compression processing of low-density wood-cement composites // *Eur. J. Wood Prod.*, 2016, v. 74, pp. 75–81. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0982-1>
- [29] Ronquim R.M., Ferro F.S., Icimoto F.H., Campos C.I., Bertolini M.S., Christoforo A.L., Rocco Lahr F.A. Physical and Mechanical Properties of Wood-Cement Composite with Lignocellulosic Grading Waste Variation // *International J. of Composite Materials*, 2014, v. 4(2), pp. 69–72.
- [30] Sá V.A., Bufalino L., Albino V.C.S., Corrêa A.A., Mendes L.M., Almeida N.A. Mixture of three reforestation species on the cement-wood panels production // *Revista Árvore*, 2012, v. 36, no. 3, pp. 549–557.
- [31] Sanaev V.G., Zaprudnov V.I., Gorbacheva G.A., Oblivin A.N. Factors affecting the quality of wood-cement composites // *Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*, 2016, t. 9, no. 2, pp. 63–71.
- [32] Sahin H.T., Kaya A.I., Yaçın O.U., Kılınçarslan Ş., Şimşek Y., Mantanis G.I. A study on the production process and properties of cement-based wood composite materials // *J. Graduate School of Natural and Applied Sciences of Mehmet Akif Ersoy University*, 2019, v. 10(2), pp. 219–228.
- [33] Ronquim R.M., Ferro F.S., Icimoto F.H., Campos C.I., Bertolini M.S., Christoforo A.L., Rocco Lahr F.A. Physical and Mechanical Properties of Wood-Cement Composite with Lignocellulosic Grading Waste Variation // *International J. of Composite Materials*, 2014, v. 4(2), pp. 69–72.
- [34] Torkaman J., Ashori A., Momtazi A.S. Using wood fiber waste, rice husk ash, and limestone powder waste as cement replacement materials for lightweight concrete blocks // *Construction and Building Materials*, 2014, v. 50, pp. 432–436.
- [35] Zaprudnov V.I., Sanaev V.G., Gorbacheva G.A., Karpachev S.P., Levushkin D.M. The influence of chemical additives on strength of wood-cement composite // *Materials Science Forum*, 2019, t. 972, pp. 69–76.
- [36] Zhou Y., Kamdem D.P. Effect of cement/wood ratio on the properties of cement-bonded particleboard using CCA-treated wood // *Forest Products J.*, 2002, v. 52 (2), pp. 73–81.

## Сведения об авторах

**Запруднов Вячеслав Ильич**<sup>✉</sup> — д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), zaprudnov@mgul.ac.ru

**Никитин Владимир Валентинович** — д-р техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), nikitinvv@bmstu.ru

**Карпачев Сергей Петрович** — д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), karpachevs@mail.ru

**Махнин Георгий Александрович** — студент, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», makhninga@student.bmstu.ru

Поступила в редакцию 12.12.2023.

Одобрено после рецензирования 16.12.2023.

Принята к публикации 10.04.2024.

## DEFORMATION PROPERTIES OF WOOD-CEMENT MATERIALS

V.I. Zaprudnov<sup>1✉</sup>, V.V. Nikitin<sup>1</sup>, S.P. Karpachev<sup>1</sup>, G.A. Makhnin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

<sup>2</sup>BMSTU, 5, Block 1, 2nd Baumanskaya st., 105005, Moscow, Russia

zaprudnov@mgul.ac.ru

The results of studies of deformations of wood-cement materials arising under the action of short-term loads are presented. For this purpose, the initial modulus of elasticity and the Poisson's ratio of wood-cement materials were determined. It is established that the value of the initial modulus of elasticity ranges from 335...495 MPa, depending on the class of wood-cement material in compressive strength B0,35...B1, and the Poisson's ratio is within 0,154...0,101. It is established that with an increase in the relative volume content of cement  $c_2$  from 0,50 to 0,58, the value of the initial modulus of elasticity increases and the shear modulus of the wood-cement material, and the Poisson's ratio decreases. It was found that for heat-insulating wood-cement material, an increase in the relative volume content of filler (ash)  $c_4$  from 0 to 0,1, with constant consumption of binder and organic filler, also allows increasing the value of the initial modulus of elasticity and shear modulus. For wood-cement material with a filler made of wood chips (wool), the value of the initial modulus of elasticity was 134 MPa, and the Poisson's ratio was 0,062. The coefficient of elasticity of wood-cement material, depending on the class, ranges from 0,60 to 0,75, and the coefficient of plasticity from 0,26 to 0,36. The obtained value of the ultimate compressibility of wood-cement material on average for the class of wood-cement material in terms of compressive strength B0,35, B0,75 and B1 is 2,55 mm/m. It is noted that the obtained values of the initial elastic modulus and Poisson coefficients of wood-cement materials are in good agreement with the data of previously performed work, however, they, as well as the strength of wood-cement materials, turned out to be 20...25 % lower than theoretical ones. It has been established that the conglomerate structure of wood-cement material determines the manifestation of both elastic and plastic properties associated with the formation and accumulation of microcracks, with the plastic properties of the gel component of cement stone. It is concluded that previously obtained analytical dependences can be used to predict creep deformations and shrinkage of wood-cement materials depending on the age of loading.

**Keywords:** wood-cement materials, creep and shrinkage deformations, modulus of elasticity, Poisson's ratio

**Suggested citation:** Zaprudnov V.I., Nikitin V.V., Karpachev S.P., Makhnin G.A. *Deformatsionnye svoystva drevesno-tsementnykh materialov* [Deformation properties of wood-cement materials]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 3, pp. 96–104. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-96-104


## References

- [1] Goncharova M.A., Bocharnikov A.S., Komarichev A.V. *Kompozitsionnye materialy na osnove tsementno-vodnykh aktivirovannykh sistem dlya in'ektsionnogo uplotneniya betona ograzhdayushchikh konstruksiy* [Composite materials based on cement-water activated systems for injection compaction of concrete enclosing structures]. *Stroitel'nye materialy* [Building Materials], 2015, no. 5, pp. 31–35.
- [2] Vasil'kov S.N. *Tekhnologii proizvodstva i primeniya ekologicheskikh i energoeffektivnykh stroymaterialov na osnove drevesnogo syr'ya* [Technologies of production and application of environmentally friendly and energy-efficient building materials based on wood raw materials]. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka* [Building materials, equipment, technologies of the XXI century]. 2004, no. 11, p. 50.

- [3] Bazhenov Yu.M., Dem'yanova B.C., Kalashnikov V.I. *Modifitsirovannye vysokokachestvennye betony* [Modified high-quality concretes]. Moscow: DIA, 2006, 368 p.
- [4] Galebuy S. *Mekhanizm formirovaniya prochnosti i razrusheniya porizovannogo arbolita na steblyakh khlopchatnika* [The mechanism of strength formation and destruction of porous arbolite on cotton stems]. *Mekhanizatsiya stroitel'stva* [Mechanization of construction], 2011, no. 10, pp. 23–24.
- [5] Andreev A.A., Kolesnikov G.N., Chalkin A.A. *Drevesno-tsementnyy kompozit s dobavkoy steatita kak konstruksionnyy i deformiruyushchiy material* [Wood-cement composite with the addition of steatite as a structural and deforming material]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: «Estestvennye i tekhnicheskie nauki»* [Scientific notes of Petrozavodsk State University. Ser.: «Natural and technical sciences»], 2014, no. 6 (143), pp. 75–78.
- [6] Arakelyan A.A. *Prochnostnye i deformativnye svoystva legkikh betonov v zavisimosti ot svoystv zapolniteley* [Strength and deformative properties of light concretes depending on the properties of aggregates]. Dis. Cand. Sci. (Tech.). Moscow, 1986, 24 p.
- [7] Goncharova M.A., Chernyshev M.A. *Formirovanie sistem tverdeniya kompozitov na osnove tekhnogennoy syr'ya* [Formation of composite hardening systems based on technogenic raw materials]. *Stroitel'nye materialy* [Building materials], 2013, no. 5, pp. 60–63.
- [8] Zaprudnov V.I. *Sozdanie kachestvennykh drevesno-tsementnykh materialov* [Creation of quality wood-cement materials]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 54–60. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-54-60
- [9] Zaytsev Yu.V. *Modelirovanie deformatsiy i prochnosti betona metodami mekhaniki razrusheniy* [Modeling of deformations and strength of concrete by methods of fracture mechanics]. Moscow: Stroyizdat, 1982, 196 p.
- [10] Korol' E.A. *Trekhsloynnye ograzhdayushchie zhelezobetonnye konstruksii iz legkikh betonov i osobennosti ikh rascheta* [Three-layer enclosing reinforced concrete structures made of light concrete and features of their calculation]. Moscow: DIA, 2001, pp. 52–69.
- [11] Novikova N.O., Yartsev V.P. *Primenenie arbolita i ego analogov v raznykh stranakh* [The use of arbolite and its analogues in different countries]. *Sinerгиya nauk* [Synergy of Sciences], 2018, no. 19, pp. 524–537.
- [12] Mel'nikova L.V. *Tekhnologiya kompozitsionnykh materialov iz drevesiny* [Technology of composite materials made of wood]. Moscow: MSFU, 2004, 234 p.
- [13] Nanazashvili I.Kh. *Arbolit — effektivnyy stroitel'nyy material* [Arbolite is an effective building material]. Moscow: Stroyizdat, 1984, 125 p.
- [14] Podchufarov V.S., Chemleva T.A., Shcherbakov A.S. *Ob optimal'nom sostave arbolita povyshennogo kachestva* [On the optimal composition of high-quality arbolite]. *Nauchnye trudy MGUL* [Scientific works of MGUL], 1976, iss. 93, pp. 68–88.
- [15] Ryb'ev I.A. *Dve vazhneyshie zakonomernosti v svoystvakh materialov s konglomeratnym tipom struktury* [Two important patterns in the properties of materials with a conglomerate type of structure]. *Stroitel'nye materialy* [Building materials], 1965, no. 1, pp. 17–20.
- [16] Tsepaev V.A. *Dlitel'naya prochnost' i deformativnost' konstruksionnykh drevesno-tsementnykh materialov i nesushchikh elementov na ikh osnove* [Long-term strength and deformability of structural wood-cement materials and bearing elements based on them]. Dis. Dr. Sci. (Tech.). Nizhny Novgorod: NGASU, 2001, 46 p.
- [17] Khoroshun L.P., Shcherbakov A.S. *Prochnost' i deformativnost' arbolita* [Strength and deformability of arbolite]. Kiev: Nauk. Dumka, 1979, 192 p.
- [18] Savin V.I., Kolosov G.E., Sokolov B.A. *Stenovye paneli iz porizovannogo arbolita* [Wall panels made of porous arbolite]. *Legkie betony na osnove otkhodov promyshlennosti i konstruksii iz nikh* [Book Light concretes based on industrial waste and structures made from them]. Moscow: NIIZHB, 1983, pp. 8–14.
- [19] Savin V.I., Davidyuk A.N. *Tekhnologiya i osnovnye fiziko-mekhanicheskie svoystva porizovannogo arbolita na polimernom vyazhushchem* [Technology and basic physico-mechanical properties of porous arbolite on a polymer binder]. *Nauchnye trudy MGUL* [Scientific works of MGUL], 1986, iss. 180, pp. 30–43.
- [20] Jayanudin J., Fahrurrozi M., Wirawan S.K., Rochmadi R. *Mathematical modeling of the red ginger oleoresin release from chitosan-based microcapsules using emulsion crosslinking method*. *Engineering Science and Technology*, 2019, v. 22, iss. 2, pp. 458–467.
- [21] Shchibrya A.Yu. *Effektivnyy teploizolyatsionnyy material iz porizovannogo arbolita na risovoy luzge* [Effective thermal insulation material from porous arbolite on rice husk]. Dis. Cand. Sci. (Tech.). Rostov-on-Don, 2000, p. 21.
- [22] Boadu K.B., Antwi-Boasiako C., Ofosuhene L. *Solvent extraction of inhibitory substances from three hardwoods of different densities and their compatibility with cement in composite production*. *J. of the Indian Academy of Wood Science*, 2018, v. 15, pp. 140–148.
- [23] Berkenkamp R. *Wood fiber-cement product, process and properties*. Ed. A.A. Moslemi, *Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials*. Madison, WI: Forest Products Society, 2017, pp. 8–13.
- [24] Cheumani Y.A.M., Ndikontar M., De Jéso B, Sèbe G. *Probing of wood-cement interactions during hydration of wood-cement composites by proton low-field NMR relaxomet*. *J. Mater. Sci.*, 2011, v. 46, pp. 1167–1175.
- [25] Fan M., Ndikontar M.K., Zhou X., Ngamveng J.N. *Cement-bonded composites made from tropical woods. Compatibility of wood and cement*. *Construction and Building Materials*, 2012, v. 36, pp. 135–140.
- [26] Frybort S., Mauritz R., Teischinger A., Muller U. *Cement bonded composites – a mechanical review*. *BioResources*, 2008, v. 3(2), pp. 602–626.
- [27] Jorge F.C., Pereira C., Ferreira J.M.F. *Wood-cement composites: a review*. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 2004, v. 62(5), pp. 370–377.
- [28] Parchen C.F.A., Iwakiri, S., Zeller, F. *Vibro-dynamic compression processing of low-density wood-cement composites*. *Eur. J. Wood Prod.*, 2016, v. 74, pp. 75–81. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0982-1>
- [29] Ronquim R.M., Ferro F.S., Icimoto F.H., Campos C.I., Bertolini M.S., Christoforo A.L., Rocco Lahr F.A. *Physical and Mechanical Properties of Wood-Cement Composite with Lignocellulosic Grading Waste Variation*. *International J. of Composite Materials*, 2014, v. 4(2), pp. 69–72.
- [30] Sá V.A., Bufalino L., Albino V.C.S., Corrêa A.A., Mendes L.M., Almeida N.A. *Mixture of three reforestation species on the cement-wood panels production*. *Revista Árvore*, 2012, v. 36, no. 3, pp. 549–557.

- [31] Sanaev V.G., Zaprudnov V.I., Gorbacheva G.A., Oblivin A.N. Factors affecting the quality of wood-cement composites. Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering, 2016, t. 9, no. 2, pp. 63–71.
- [32] Sahin H.T., Kaya A.I., Yalçın O.U., Kılınçarslan Ş., Şimşek Y., Mantanis G.I. A study on the production process and properties of cement-based wood composite materials. J. Graduate School of Natural and Applied Sciences of Mehmet Akif Ersoy University, 2019, v. 10(2), pp. 219–228.
- [33] Ronquim R.M., Ferro F.S., Icimoto F.H., Campos C.I., Bertolini M.S., Christoforo A.L., Rocco Lahr F.A. Physical and Mechanical Properties of Wood-Cement Composite with Lignocellulosic Grading Waste Variation. International J. of Composite Materials, 2014, v. 4(2), pp. 69–72.
- [34] Torkaman J., Ashori A., Momtazi A.S. Using wood fiber waste, rice husk ash, and limestone powder waste as cement replacement materials for lightweight concrete blocks. Construction and Building Materials, 2014, v. 50, pp. 432–436.
- [35] Zaprudnov V.I., Sanaev V.G., Gorbacheva G.A., Karpachev S.P., Levushkin D.M. The influence of chemical additives on strength of wood-cement composite. Materials Science Forum, 2019, t. 972, pp. 69–76.
- [36] Zhou Y., Kamdem D.P. Effect of cement/wood ratio on the properties of cement-bonded particleboard using CCA-treated wood. Forest Products J., 2002, v. 52 (2), pp. 73–81.

## Authors' information

**Zaprudnov Vyacheslav Il'ich**  — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), zaprudnov@mgul.ac.ru

**Nikitin Vladimir Valentinovich** — Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), nikitinvv@bmstu.ru

**Karpachev Sergey Petrovich** — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), karpachevs@mail.ru

**Makhnin Georgiy Aleksandrovich** — Student of the BMSTU, makhninga@student.bmstu.ru

Received 12.12.2023.

Approved after review 26.12.2023.

Accepted for publication 10.04.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest



## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ГИДРОЛИЗА РАСТИТЕЛЬНЫХ БЕЛКОВ В ПРИСУТСТВИИ ДРОЖЖЕВЫХ ПРОТЕАЗ

А.Н. Иванкин

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1  
aivankin@mgul.ac.ru

Дано описание методологии оптимизации процесса ферментативного гидролиза растительных белков дрожжевыми протеазами *Saccharomyces carlsbergensis* с использованием в качестве субстрата модельного соевого белка. Ферментативную обработку осуществляли под действием автолизированных отходов пивных дрожжей, содержащих до 40 % активных дрожжевых клеток. Показано, что в результате оптимизации процесса с использованием симплекс метода планирования эксперимента были найдены оптимальные условия ведения процесса ферментативного гидролиза растительных белков в присутствии биомассы пивных дрожжей, которые составили: концентрация белка в суспензии 30 %, количество добавляемой дрожжевой суспензии 40 %, содержание цитрата натрия 5,6 %, этанола 4,2 %, добавленной воды 20,2 %. Время гидролитической обработки в оптимуме при температуре 58 °С составляло 4,3 часа. Выход продукта, оцениваемый по содержанию азота свободных аминокислот, увеличивался с 10...12 % без оптимизации до 34 % в результате проведенной оптимизации параметров процесса. Показано, что максимальная скорость процесса гидролитического распада растительных белков в оптимальных условиях составляет более  $0,48 \cdot 10^{-3}$  мгNH<sub>2</sub>/мл-мин, а энергия активации  $E_a$  80,7 кДж/моль. Установлена возможность дополнительного увеличения выхода целевого гидролизата за счет повторного внесения в систему ферментного препарата панкреатина, в результате чего удавалось увеличивать выход продукта до 52...55 % и получать сбалансированный по аминокислотному составу продукт. Получены данные, о том, что аминокислотный состав ферментативного гидролизата включал все незаменимые аминокислоты, г/100 г белка: Иле 4,7; Лей 7,0; Лиз 6,9; Мет 1,6; Цис 3,7; Фен 5,8; Тир 4,1; Тре 4,2; Трп 1,5; Вал 6,8; а также заменимые аминокислоты: Ала 5,9; Арг 5,5; Асп 8,8; Гис 3,3; Гли 3,8; Глу 10,2; Про 5,1; Сер 9,0. Полученный ферментативный гидролизат обладает потенциально высокой биологической ценностью, что может способствовать его эффективному использованию в составе высокопитательных систем.

**Ключевые слова:** растительные белки, ферментативный гидролиз, пивные дрожжи, биодеградация, оптимизация условий

**Ссылка для цитирования:** Иванкин А.Н. Оптимизация процесса гидролиза растительных белков в присутствии дрожжевых протеаз // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 3. С. 105–114.  
DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-105-114

Растительные белки являются важнейшими компонентами природного сырья и должны составлять неотъемлемую часть всех пищевых систем. В связи с этим, основное направление сельскохозяйственной деятельности заключается в получении высококачественных пищевых продуктов с оптимальным для питания человека содержанием белка [1, 2].

Количество белка в сырье природного происхождения различается и может составлять в таких традиционных сельскохозяйственных продуктах, как рис — до 7 %, в пшенице — до 15 %, в сое — до 40 %. Источником белка могут выступать лесные культуры, в которых, особенно в начальном вегетационном периоде, содержание белка в листе и корнях может достигать значимых значений — 7...9 % [3–5].

К важным источникам белка относятся также промышленные отходы, получаемые при перера-

ботке сельхозпродукции [6]. В таких отходах белки находятся в связанном состоянии и не могут обладать высокой питательной ценностью вследствие трудно расщепляемых природных макрокомплексов, которые не способны давать фрагментированные в пищеварительных органах человека продукты, поэтому требуется их дополнительная трансформация [6–8].

Наиболее простым способом переработки отходов пищевой, комбикормовой и микробиологической промышленности является гидролитическая деградация в мономеры и олигомеры, которые в дальнейшем могут вновь поступать в пищевые цепи и служить строительным материалом в качестве своеобразных пищевых модулей для последующего создания на их основе высокоэффективных питательных продуктов самого широкого назначения [9–11].

Белки можно извлекать из растительного сырья лесного происхождения при переработке в биотопливо [12].

В настоящее время в нашей стране и за рубежом осуществляются научные и технологические разработки процессов гидролитической переработки практически всех видов вторичных продуктов в сфере сельскохозяйственного производства. Полученные гидролизаты, как правило, используются в комбикормовой и микробиологической промышленности как биостимулирующие добавки и основы питательных сред для выращивания микроорганизмов в биотехнологии. Кроме того, разработаны гидролизаты пищевого назначения [4, 9, 13, 14].

Ранее нами и другими исследователями была показана возможность гидролиза белковых субстратов дрожжевыми протеазами остаточных пивных дрожжей [15, 16].

Переработку белкового сырья обычно осуществляют в присутствии минеральных кислот или ферментов, причем во втором случае получают продукты с более благоприятным составом. При этом достигается не только конечная цель трансформации белка в свободные аминокислоты, но и параллельно в сравнительно мягких условиях образуются короткие пептиды, что повышает биологическую ценность продукта. Если в качестве субстрата для переработки выбраны белки с низкой биологической ценностью, происходит не только гидролиз сырьевого белка, но и собственных белков дрожжей, в результате чего полученные белковые гидролизаты обогащаются не только незаменимыми аминокислотами, в частности изолейцином и триптофаном, но также сахарами и витаминами группы В. Такие гидролизаты, как и следовало ожидать, обладают повышенной биологической ценностью.

К сожалению, выход подобных ферментативных гидролизатов невелик и может составлять 10...12 % общей массы гидролизуемого белка. Отсюда следует целесообразность изучения протекания процесса гидролиза белков в оптимальных условиях.

## Цель работы

Цель работы — определение оптимальных условий ферментативного гидролиза растительных белков дрожжевыми протеазами остаточных пивных дрожжей с использованием метода математического планирования эксперимента.

## Материалы и методы

В качестве сырьевого субстрата для биотрансформации использовали модельный соевый изолят с содержанием 65 % растительного белка.

В качестве ферментной системы использовали автолизированные отходы пивоваренных дрожжевых культур *Saccharomyces carlsbergensis* 16-й генерации в виде водной суспензии с содержанием

сухих веществ 6...7 % и содержанием физиологически активных клеток не менее 40 %.

Для повышения выхода продукта в систему дополнительно вводили панкреатин медицинский с содержанием белка по Лоури 300...500 мг/г препарата и активностью по Ансону 5000...6000 ед./г. При использовании панкреатина в качестве ферментного препарата гидролиз проводили в 0,1 М фосфатном буфере (рН 7,5...8,2) с массовым соотношением фермента и субстрата 1:50 при температуре 58...60 °С в течение 4 ч при постоянном перемешивании, отбирая пробы через 15...30 мин.

Для стабилизации рН в систему добавляли цитрат натрия. Для предотвращения развития нежелательных процессов микробного обсеменения при гидролизе в систему добавляли плазмолизирующий агент этанол.

Аминокислотный состав гидролизатов анализировали на хроматографе LC 3000 фирмы Eppendorf-Biotronic (ФРГ) с использованием автоматической программы Winpeak [17, 18].

Расчет энергии активации и кинетических констант выполняли по методологии, описанной в работе [19]. Определяли основные макрокинетические константы гидролиза и энергию активации процесса по уравнению Аррениуса [18]. Для этого оценивали наличие «медленной» ( $k_{\text{III}}$ ) и «быстрой» ( $k_{\text{II}}$ ) стадий процесса. Теоретически [19, 20] предполагается, что в момент времени  $t$  скорость гидролиза химических связей  $V_t$ , обладающих близкой реакционной способностью, можно определять по уравнению

$$V_t = V_{\text{max}} e^{-kt},$$

где  $V_{\text{max}}$  — максимальная скорость биодеградации, г·л<sup>-1</sup>·с<sup>-1</sup>;

$k$  — константа эффективности протекания процесса гидролиза химических связей, с<sup>-1</sup>.

В ферментативной кинетике определяется также константа Михаэлиса  $k_M$  как концентрация субстратного белка, при которой скорость процесса составляет половину от максимальной  $V_{\text{max}}$ , что указывает на сродство фермента к субстрату [21–23]. Логарифмирование зависимости  $V_t = f(V_{\text{max}})$  с учетом того, что скорость гидролиза  $V_t$  выражается отношением текущей концентрации расщепленных химических связей к моменту времени  $t$ , дает зависимость

$$\ln V_t = \ln(P_t/t) = \ln V_{\text{max}} - kt,$$

где  $P_t$  — концентрация расщепленных связей к моменту времени  $t$ , г/л.

Размерность этой величины, выражается в граммах азота аминокрупп высвобожденных аминокислот в 1 л (или мг/мл) реакционной смеси.

При  $t \rightarrow 0, (P_i/t) \rightarrow V_0$ . Продукты гидролиза белка образуются по реакции псевдопервого порядка и начальная скорость  $V_0$  соответствует  $V_{max}$ . Построение графика в координатах  $\ln(P_i/t) = f(t)$  дает возможность методом нулевой экстраполяции на ось ординат определять  $V_{max}$ .

Поиск оптимальных условий процесса гидролиза проводили с применением стандартного симплекс-метода теории планирования эксперимента [24]. Все математические расчеты проводили с использованием стандартных компьютерных программ.

В качестве критерия оптимизации был выбран один показатель — выход ферментативного гидролизата, оцениваемый по увеличению содержания свободных аминокрупп  $N_{amin}$  (азота свободных аминокрупп) [18, 20]. В качестве переменных факторов — шесть управляемых количественных параметров процесса, имеющих непрерывный характер изменения в заданных пределах (количество белка, дрожжей, цитрата натрия, этанола в смеси, продолжительность процесса и температура). Количество добавляемой в реакционную смесь дистиллированной воды являлось контролируемым фактором, определяемым по разности: 100 за вычетом суммы количеств остальных компонентов, %.

Нормированные уровни факторов  $a_{(j,i)}$  переводили в реальные  $x_{(j,i)}$  с использованием формулы

$$x_{(j,i)} = x_{o(j,o)} + a_{(j,i)} [x_{(j,max)} - x_{(j,o)}]. \quad (1)$$

Значения  $x_{(j,max)}$  и  $x_{(j,o)}$  приведены в табл. 1,  $a_{(j,i)}$  — в табл. 2,  $x_{(j,i)}$  — в табл. 3 (опыты 1–7).

Т а б л и ц а 1

**Нормируемые уровни параметров**

**Normalized parameter levels**

Обозначения уровней	Интервалы управляемых параметров					
	Белок, %	Дрожжи, %	Цитрат, %	Этанол, %	Температура, °C	Время, ч
$x_{(j,min)}$	20	20	1	1	45	1
$x_{(j,max)}$	50	50	7	7	75	7
$x_{(j,o)}$	35	35	4	4	60	4

Выход гидролизата контролировали по степени конверсии субстрата и по количеству освобождающихся в результате гидролиза концевых групп так, как это описано в работе [19], используя метод формольного титрования [17].

Эксперименты проводили в трех повторностях. Статистическую обработку результатов осуществляли по стандартным методикам [25, 28]. Полученные результаты не выходили за пределы доверительной вероятности  $p = 0,95$ .

**Результаты и обсуждение**

Ферментативный гидролиз природных белковых субстратов представляет собой достаточно сложный процесс, обусловленный нестандартностью применяемого сырья и ферментов [26, 27]. Использование математического подхода для оптимизации процесса позволяет усовершенствовать ведение ферментативного гидролиза и повышать его эффективность.

В настоящей работе использован симплексный метод планирования эксперимента, который описан в литературе [28]. Сущность метода заключается в следующем. Первоначально проводили исходную серию опытов так, чтобы точки параметров эксперимента, соответствующие условиям проведения этих опытов, образовывали регулярный симплекс (правильный треугольник или тетраэдр) в факторном пространстве с центром в середине симплекса. После проведения опыта выявлялись условия опыта с наименьшим выходом гидролизата. Далее строили новый симплекс, для чего наихудшую точку исходного симплекса заменяли на новую, расположенную симметрично относительно центра грани симплекса, находящегося против наихудшей точки. Новая точка вместе с оставшимися параметрами образовывала регулярный симплекс, центр которого оказывался смещенным по сравнению с исходным в направлении, противоположном от худшей точки. В общем случае такое направление поиска было направлено в сторону повышения эффективности процесса, заключавшегося в целевом увеличении выхода гидролизата. После реализации опыта в дополнительной точке проводили повторное сопоставление результатов в целях выявления наихудшей точки в новом симплексе, которую заменяли ее зеркальным отображением и т. д. Шаговое восхождение с последовательным отбрасыванием наихудших точек повторяли до достижения близкой к экстремуму области, т. е. до оптимального результата.

Для симплекса, совпадающего с началом координат, одна из вершин находится на координатной оси, остальные располагаются симметрично относительно координатных осей, а координаты симплекса задавались матрицей  $X$

$$X = \begin{vmatrix} x_1 & x_2 & x_j & x_{k-1} & x_k \\ -x_1 & x_2 & x_j & x_{k-1} & x_k \\ 0 & -2x_2 & x_j & x_{k-1} & x_k \\ 0 & 0 & -jx_j & x_{k-1} & x_k \\ 0 & 0 & 0 & -(k-1)x_{k-1} & x_k \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -kx_k \end{vmatrix}. \quad (2)$$

Т а б л и ц а 2

**Факторный план эксперимента по гидролизу растительного белка  
в присутствии дрожжей рода *Saccharomyces carlsbergensis***

Factorial design of the experiment on the hydrolysis of plant protein  
in the presence of yeast of the genus *Saccharomyces carlsbergensis*

Номер опыта	Нормированные уровни факторов, $a_{(j,i)}$					
	Белок, %	Дрожжи, %	Цитрат, %	Этанол, %	Температура $t$ , °C	Время, ч
1	0,5	0,277	0,206	0,153	0,127	0,111
2	-0,5	0,277	0,206	0,153	0,127	0,111
3	0	-0,277	0,206	0,153	0,127	0,111
4	0	0	-0,614	0,153	0,127	0,111
5	0	0	0	-0,629	0,127	0,111
6	0	0	0	0	-0,343	0,111
7	0	0	0	0	0	-0,655

Т а б л и ц а 3

**Зависимость содержания свободных аминокрупп от условий гидролиза белка  
в присутствии дрожжей рода *Saccharomyces carlsbergensis***

Dependence of the content of free amino groups on the conditions of protein hydrolysis  
in the presence of yeast of the genus *Saccharomyces carlsbergensis*

Номер опыта	Реальные уровни экспериментальных факторов $x_{(j,i)}$												
	Белок		Дрожжи		Цитрат (5%-й раствор)		Этанол		$t$ , °C	Время, ч	Вода		$N_{\text{амин}}$
	$V$ , мл	%	$V$ , мл	%	$V$ , мл	%	$V$ , мл	%			$V$ , мл	%	
1	1,91	42,5	1,78	39,5	0,21	4,6	0,20	4,5	62	4,3	0,40	8,9	1,89
2	1,24	27,5	1,78	39,5	0,21	4,6	0,20	4,5	62	4,3	1,08	23,9	3,36
3	1,58	35,0	1,19	26,5	0,21	4,6	0,20	4,5	62	4,3	1,32	29,4	2,31
4	1,58	35,0	1,58	35,0	0,10	2,2	0,20	4,5	62	4,3	1,05	23,3	0,84
5	1,58	35,0	1,58	35,0	0,18	4,0	0,09	2,1	62	4,3	1,08	23,9	1,26
6	1,58	35,0	1,58	35,0	0,18	4,0	0,18	4,0	50	4,3	0,99	22,0	1,68
7	1,58	35,0	1,58	35,0	0,18	4,0	0,18	4,0	60	2,0	0,99	22,0	2,52
8	1,58	35,0	1,58	35,0	0,29	6,4	0,15	3,3	57	3,5	0,90	20,0	2,31
9	1,58	35,0	1,58	35,0	0,24	5,3	0,17	3,8	56	3,3	0,93	20,9	1,68
10	1,44	32,0	1,57	34,9	0,23	5,1	0,18	4,0	60	3,5	1,08	24,0	3,78
11	1,35	30,0	1,80	40,0	0,25	5,6	0,19	4,2	58	4,3	0,91	20,2	4,20
12	1,47	32,6	1,57	34,9	0,26	5,1	0,18	4,0	60	3,5	0,90	20,0	3,88
13	1,33	29,4	1,51	33,8	0,27	5,2	0,18	4,0	60	3,4	0,90	20,0	3,71

При длине стороны, равной 1, значения  $x_j$  равны

$$x_j = \sqrt{1/2j(j+1)}. \quad (3)$$

Высоту симплекса  $hk$  (расстояние от вершины до противоположной грани) определяли из равенства

$$hk = \frac{k+1}{\sqrt{1/2k(k+1)}}, \quad (4)$$

где  $k$  — размерность симплекса.

Число опытов  $N$  в симплексной матрице для  $k$  независимых факторов равно

$$N = k + 1. \quad (5)$$

Первоначальные числовые значения матрицы (1) подсчитаны с использованием формулы (3) (см. табл. 2). Учитывая низкую степень конверсии белка в процессе гидролиза, была составлена матрица планирования эксперимента с реальными факторами для всех проведенных опытов (см. табл. 1–3), выполненных при решении задачи оптимизации в пересчете на 5 мл общего объема реакционной смеси. Из данных табл. 3 следует, что оптимальным вариантом проведения опыта по ферментативному гидролизу является опыт № 11.

В результате оптимизации установлено, что процесс гидролиза растительного белка ферментами биомассы автолизированных остаточных пивных дрожжей рода *Saccharomyces carlsbergensis* целесообразно проводить при температуре 58 °C

в течение 4,2 ч в присутствии 4,2 % об. плазмолизирующего агента этанола и стабилизирующего реагента цитрата натрия 5,6 % об., при содержании белка в реакционной смеси 30 % об., в суспензии дрожжей 40 % об. Выход целевого ферментативного гидролизата белка при этом увеличивался против первоначального уровня с 12 до 34 %.

Результат использованного метода классической оптимизации технологического процесса был независимо подтвержден с использованием искусственного интеллекта [29]. Оптимальные параметры по симплексному методу планирования эксперимента оказались практически неотличимыми от информации, полученной для данных условий по нейросети.

Для полного понимания протекания процесса ферментативного гидролиза растительного белка в оптимальных условиях определены его макрокинетические параметры, на основании которых можно в дальнейшем устанавливать основные технологические параметры [30, 31]. На рис. 1 представлены кривые зависимости накопления продуктов суммарной реакции гидролитического расщепления при различных температурах ведения процесса.

Из рис. 1 следует, что процесс гидролиза в оптимальных условиях протекает сложнее, нежели в обычных условиях [32, 33], по-видимому, вследствие участия различных ферментов (полиферментная активность), содержащихся в дрожжевом ферментном комплексе. Кривые зависимости накопления свободных аминокрупп от времени при различных значениях температуры имеют сложный S-образный характер, четко выраженный для температур ниже 63 °C в течение первых 2 ч ведения процесса (см. рис. 1, кривые 1 и 2). При температуре 63 °C происходит интенсивное накопление продуктов гидролиза в реакционной смеси, выход гидролизата при этом оказывается ниже, чем при более низких температурах, поскольку ферментная система, очевидно, инактивируется раньше, чем достигается максимально возможная глубина протекания процесса. Расчет эффективных макрокинетических констант гидролиза был осуществлен в соответствии с описанным ранее [20, 27] так же, как и для обычного гидролиза (рис. 2, 3). Экспериментальные и расчетные данные по определению констант гидролиза, представлены в табл. 4.

Как следует из полученных данных, использование одних дрожжевых протеаз в оптимальных условиях позволяет увеличить выход ферментативного гидролизата практически в три раза. Однако достигнуть большей величины степени гидролиза за счет действия только одних дрожжевых протеаз не удается.

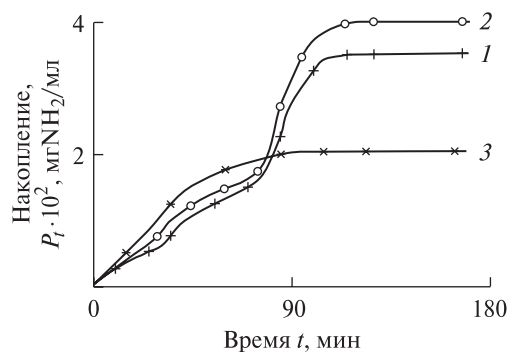


Рис. 1. Зависимость накопления продуктов ( $P_t$ ) оптимизированного гидролиза белка дрожжевым автолизатом от времени при различных температурах, °C: 1 — 53; 2 — 58; 3 — 63

Fig. 1. Dependence of products accumulation ( $P_t$ ) of optimized protein hydrolysis by yeast autolysate on time at different temperatures, °C: 1 — 53; 2 — 58; 3 — 63

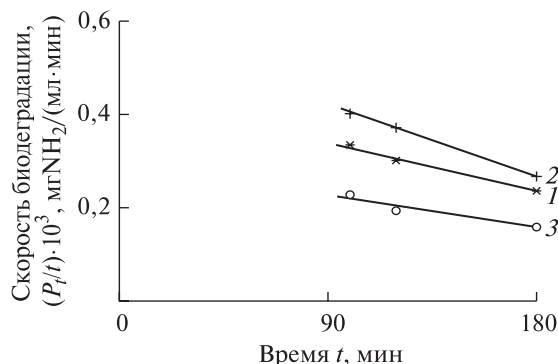


Рис. 2. Графическое определение максимальных эффективных скоростей и константы интенсивности ( $k$ ) протекания процесса оптимизированного гидролиза дрожжевым автолизатом: 1 — 53 °C; 2 — 58 °C; 3 — 63 °C ( $k = 1/125 = 0,8 \cdot 10^{-2}$ )

Fig. 2. Graphical determination of the maximum effective rates and intensity constant ( $k$ ) of the process of optimized hydrolysis by yeast autolysate: 1 — 53 °C; 2 — 58 °C, 3 — 63 °C ( $k = 1/125 = 0,8 \cdot 10^{-2}$ )

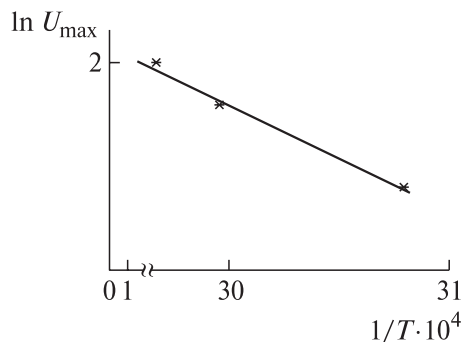


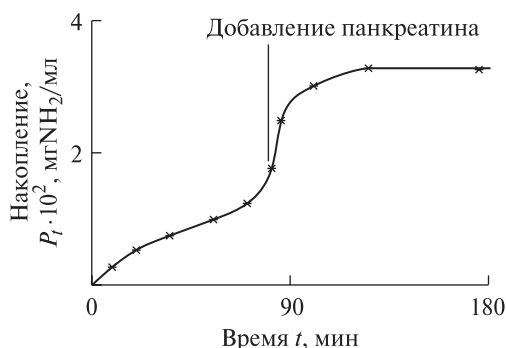
Рис. 3. Графическое определение энергии активации процесса оптимизированного гидролиза растительного белка дрожжевым автолизатом для начальной стадии процесса

Fig. 3. Graphical determination of the activation energy of the plant protein optimized hydrolysis by yeast autolysate for the initial stage of the process

### Макрокинетические константы ферментативного гидролиза растительного белка дрожжевыми протеазами

#### Macrokinetic constants of enzymatic hydrolysis of plant protein by yeast proteases

$t, ^\circ\text{C}$	Скорость реакции на медленной (I) и быстрой (II) стадиях		Энергия активации $E_{a, \text{I}}$ , кДж/моль	Константа интенсивности $k_{\text{II}} \cdot 10^2, \text{мин}^{-1}$	Константа Михаэлиса $k_M \cdot 10^2, \text{мг NH}_2/\text{мл}$	Степень конверсии, %
	$V_{\text{max I}} \cdot 10^3, \text{мг NH}_2/\text{мл} \cdot \text{мин}$	$V_{\text{max II}} \cdot 10^3, \text{мг NH}_2/\text{мл} \cdot \text{мин}$				
53	$0,294 \pm 0,006$	$0,410 \pm 0,008$	$80,7 \pm 11,4$	$0,81 \pm 0,03$	$0,54 \pm 0,12$	32,0
58	$0,445 \pm 0,008$	$0,479 \pm 0,009$				
63	$0,712 \pm 0,089$	$0,311 \pm 0,008$				



**Рис. 4.** Зависимость накопления продуктов сочетанного гидролиза растительных белков ( $P_t$ ) в оптимизированных условиях при температуре  $58^\circ\text{C}$  ферментами дрожжей рода *Saccharomyces carlsbergensis* и панкреатином (контроль по содержанию азота свободных аминокислотных групп  $N_{\text{амин}}$ )

**Fig. 4.** Dependence of the products accumulation of combined plant protein hydrolysis ( $P_t$ ) under optimized conditions at a temperature of  $58^\circ\text{C}$  by enzymes of the yeast of the genus *Saccharomyces carlsbergensis* and pancreatin (control by nitrogen content of free amino groups  $N_{\text{амин}}$ )

Это может быть связано со многими факторами, из которых, как отмечалось ранее [19, 20, 32], возможно существенное значение имеет процесс ингибирования ферментов продуктами реакции. В этом случае добавление дополнительно экзогенных ферментных препаратов может значительно увеличивать конверсию субстрата [34]. В нашем случае был использован прием добавления полиферментного препарата панкреатина эффективность которого часто используется в биотехнологии [35].

Действительно, как видно из рис. 4, добавление к реакционной массе небольшого количества панкреатина (0,1 % масс.) увеличивает степень конверсии процесса биогидролиза до 52...55 %.

Как следует из табл. 5, аминокислотный состав гидролизата, полученного в оптимальных условиях, близок по составу к эталонному яичному протеину, что указывает на его потенциально высокую биологическую ценность [27, 34]. Это может способствовать эффективному использованию

### Аминокислотный состав эталонного белка и ферментативного гидролизата, полученного в оптимальных условиях

#### Amino acid composition of the reference protein and enzymatic hydrolyzate obtained under optimal conditions

Аминокислота	Количество аминокислот, г/100 г белка	
	Яичный белок (эталон)	Ферментативный гидролизат
Аланин	6,7	$5,9 \pm 0,6$
Аргинин	2,4	$5,5 \pm 0,4$
Аспарагиновая кислота	7,0	$8,8 \pm 0,7$
Цистин	2,3	$3,7 \pm 0,2$
Глутаминовая кислота	12,4	$10,2 \pm 1,4$
Гистидин	2,4	$3,3 \pm 0,3$
Изолейцин	6,6	$4,7 \pm 0,3$
Лейцин	8,8	$7,0 \pm 0,6$
Лизин	6,4	$6,9 \pm 0,5$
Метионин	3,1	$1,6 \pm 0,2$
Фенилаланин	5,8	$5,8 \pm 0,4$
Пролин	4,2	$5,1 \pm 0,5$
Серин	8,4	$9,0 \pm 0,8$
Треонин	5,0	$4,2 \pm 0,3$
Тирозин	4,3	$4,1 \pm 0,2$
Триптофан	1,7	$1,5 \pm 0,1$
Валин	7,9	$6,8 \pm 0,7$
Глицин	3,5	$3,8 \pm 0,3$

полученного продукта в пищевых системах, а также в кормовых целях [35]. В полученном оптимизированном продукте примерно половина массы приходится на свободные аминокислоты. Наличие свободных аминокислот в составе биопродукта увеличивает его питательную ценность.

### Выводы

В результате оптимизации процесса гидролиза и введения в реакционную массу дополнительно панкреатина удалось увеличить выход ферментативного гидролизата из растительного белка до 52...55 %. Кинетический анализ подтвердил

многопрофильность механизма гидролиза растительных белков в присутствии остаточных пивных дрожжей рода *Saccharomyces carlsbergensis*.

## Список литературы

- [1] Mileti O., Baldino N., Lupi F.R., Gabriele D. Interfacial behavior of vegetable protein isolates at sunflower oil/water interface // *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2023, v. 221, p. 113035. doi.org/10.1016/j.colsurfb.2022.113035
- [2] Adeva-Andany M.A., Fernandez-Fernandez C., Carneiro-Freire N., Vila-Altesor M., Ameneiros-Rodríguez E. The differential effect of animal versus vegetable dietary protein on the clinical manifestations of diabetic kidney disease in humans // *Clinical Nutrition ESPEN*, 2022, v. 48, pp. 21–35. doi.org/10.1016/j.clnesp.2022.01.030
- [3] Castro-Rubio A., García M.C., Marina M.L. Rapid separation of soybean and cereal (wheat, corn, and rice) proteins in complex mixtures: Application to the selective determination of the soybean protein content in commercial cereal-based products // *Analytica Chimica Acta*, 2006, v. 558, no. 2, pp.28–34. doi.org/10.1016/j.aca.2005.10.076
- [4] Ijarotimi O.S., Fakayejo D.A., Oluwajuyitan T.D. Nutritional characteristics, glycaemic index and blood glucose lowering property of gluten-free composite flour from wheat, soybean, oat-bran and rice-bran // *Applied Food Research*, 2021, v. 1, no. 2, p. 100022. doi.org/10.1016/j.afres.2021.100022
- [5] Dizlek H., Girard A.L., Awika J.M. High protein and gliadin content improves tortilla quality of a weak gluten wheat // *LWT*, 2022, v. 160, no. 4, p. 113320. doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113320
- [6] Sadh P.K., Chawla P., Kumar S., Das A., Kumar R., Bains A., Sridhar K., Duhan J.S., Sharma M. Recovery of agricultural waste biomass: A path for circular bioeconomy // *Science of The Total Environment*, 2023, v. 870, no. 4, p. 161904. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161904
- [7] Кузнецова Т.Г., Иванкин А.Н., Куликовский А.В. Наносенсорный анализ мясного сырья и растительных объектов. Саарбрюккен: Lambert Academic Publishing, 2012, 232 p.
- [8] Awogbemi O., Von Kallon D.V. Pretreatment techniques for agricultural waste // *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2022, v. 6, no. 12, p. 100229. doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100229
- [9] Korkmaz K., Tokur B. Optimization of hydrolysis conditions for the production of protein hydrolysates from fish wastes using response surface methodology // *Food Bioscience*, 2022, v. 45, no. 2, p. 101312. doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101312
- [10] Ariaenejad S., Kavousi K., Sheykh A., Mamaghani A., Ghasemitabesh R., Salekdeh G.H. Simultaneous hydrolysis of various protein-rich industrial wastes by a naturally evolved protease from tannery wastewater microbiota // *Science of The Total Environment*, 2022, v. 815, no. 4, p. 152796. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152796
- [11] Srivastava R. K., Nedungadi S.V., Akhtar N., Sarangi P.K., Subudhi S., Shadangi K.P., Govarthanam M. Effective hydrolysis for waste plant biomass impacts sustainable fuel and reduced air pollution generation: A comprehensive review // *Science of The Total Environment*, 2023, v. 859(2), no. 2, p. 160260. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160260
- [12] Кадыров Ф.Ф., Яббаров А.М., Парамонова Т.А., Гнусарев С.С. Проект комплексной безотходной заготовки и переработки древесины // *Интенсификация использования и воспроизводства лесов. Ульяновск*, 2024. С. 91–96.
- [13] Kumar D., Tarafdar F., Kumar Y., Dass S.L., Pareek S., Badgujar P.C. Production of functional spent hen protein hydrolysate powder and its fortification in food supplements: A waste to health strategy // *Food Bioscience*, 2022, v. 50(B), no. 12, p. 102193. doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102193
- [14] Muhammad Mustafa Abeer M.M., Trajkovic S., Brayden D.J. Measuring the oral bioavailability of protein hydrolysates derived from food sources: A critical review of current bioassays // *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2021, v. 144, no. 12, p. 112275. doi.org/10.1016/j.biopha.2021.112275
- [15] Neklyudov A.D., Ivankin A.N., Berdutina A.V. Production and purification of protein hydrolysates (review) // *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2000, v. 36, no. 4, pp. 317–324.
- [16] Marson G.V., Machado M.T., de Castro R.J., Hubinger M.D. Sequential hydrolysis of spent brewer's yeast improved its physico-chemical characteristics and antioxidant properties: A strategy to transform waste into added-value biomolecules // *Process Biochemistry*, 2019, v. 84, no. 9, pp. 91–102. doi.org/10.1016/j.procbio.2019.06.018
- [17] Лисицын А.Б., Иванкин А.Н., Неклюдов А.Д. Методы практической биотехнологии. М.: Изд-во ВНИИМП, 2002, 408 с.
- [18] Иванкин А.Н., Олиференко Г.Л., Куликовский А.В. Аналитическая химия. М.: Кнорус, 2021, 300 с.
- [19] Neklyudov A.D., Berdutina A.V., Ivankin A.N., Karpo B.S., Osoka A.V. Determination of the kinetic constants of hydrolysis of keratin-containing raw materials // *Applied Biochemistry and Microbiology*, 1999, v. 35, no.1, pp. 45–49.
- [20] Иванкин А.Н., Красноштанова А.А. Гидролиз нанобиомакромолекулярных систем: монография. М.: МГУЛ, 2010, 396 с.
- [21] Liu P., Zhao Y., Guo H., Chang J.S., Lee D.J. Enzymolysis kinetics of corn straw by impeded Michaelis model and Box-Behnken design // *Environmental Research*, 2024, v. 242, no. 2, p. 117658. doi.org/10.1016/j.envres.2023.117658
- [22] Douglas J., Carter C.W., Wills P.R. A Michaelis-Menten model for non-homogeneous enzyme mixtures // *iScience*, 2024, v. 27, no. 2, p. 108977. doi.org/10.1016/j.isci.2024.108977
- [23] Yang M., Ye A., Yang Z., Everett D.W., Gilbert E.P., Singh H. Kinetics of pepsin-induced hydrolysis and the coagulation of milk proteins // *Journal of Dairy Science*, 2022, v. 105, no. 2, pp. 990–1003. doi.org/10.3168/jds.2021-21177
- [24] Raska P., Ulrych Z. Comparison of Modified Downhill Simplex and Differential Evolution with other Selected Optimization Methods used for Discrete Event Simulation Models // *Procedia Engineering*, 2015, v. 100, no. 2, pp. 807–815. doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.435
- [25] Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Высшая школа, 1990. 351 с.
- [26] Vyckova E., Rozhdestvenskaya L., Podgorbunskikh E., Kudachyova P. The problems and prospects of developing food products from high-protein raw materials // *Food Bioscience*, 2023, v. 56, no. 12, p. 103286. doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103286
- [27] Feng L., Wu Y., Han Y., Yao X., Li Q., Liu M., Cao Y. Structural characteristics, functional properties and nutritional value of walnut protein by limited enzymatic hydrolysis // *LWT*, 2024, v. 197, no. 4, p. 115923. doi.org/10.1016/j.lwt.2024.115923
- [28] Саутин С.Н. Планирование эксперимента в химии и химической технологии. Л.: Химия, 1975, 48 с.

- [29] Нейросеть Chat GPT. URL: <https://gpt-chatbot.ru/> (дата обращения: 15.05.2023).
- [30] Dai H., An H. Effect of protease hydrolysis pretreatment on extruder response and the structural characteristics of high-moisture plant-protein extrudates // *Journal of Food Engineering*, 2024, no. 3, p. 112062. doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.112062
- [31] Wang Y., Li Z., Li H., Selomulya K. Effect of hydrolysis on the emulsification and antioxidant properties of plant-sourced proteins // *Current Opinion in Food Science*, 2022, v. 48, no. 12, p. 100949. doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100949
- [32] Neklyudov A.D., Fedorova N.V., Plyukhina V.P., Lisitsa E.P. Enzymatic profile of autolyzing yeast of the genus *Saccharomyces* // *Applied Biochemistry and Microbiology*, 1993, v. 29, no. 5, pp. 734–743.
- [33] Blayo C., Vidcoq O., Lazennec F., Dumay E. Effects of high pressure processing (hydrostatic high pressure and ultra-high pressure homogenisation) on whey protein native state and susceptibility to tryptic hydrolysis at atmospheric pressure // *Food Research International*, 2016, v. 79, no. 1, pp. 40–53. doi.org/10.1016/j.foodres.2015.11.024
- [34] Luo L., Yan B., Xu S., Zhou J., Liang J., Zhao J., Tyagi R.D., Wong W.C. Regulation of acidogenic fermentation through exogenous additives for promoting carbon conversion of food waste in two-phase anaerobic system // *Bioresource Technology*, 2023, v. 368, no. 1, p. 128368. doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128368
- [35] Zhao Q., Fan Y., Zhao L., Zhu Y., Jiang Y., Gu J., Xue Y., Hao Z., Shen Q. Identification and molecular binding mechanism of novel pancreatic lipase and cholesterol esterase inhibitory peptides from heat-treated adzuki bean protein hydrolysates // *Food Chemistry*, 2024, v. 439, no. 5, p. 138129. doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138129

## Сведения об авторе

**Иванкин Андрей Николаевич** — д-р хим. наук, академик МАН ВШ, профессор кафедры химии и химических технологий лесного комплекса, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), [aivankin@mgul.ac.ru](mailto:aivankin@mgul.ac.ru)

Поступила в редакцию 16.05.2023.

Одобрено после рецензирования 22.05.2023.

Принята к публикации 02.02.2024.

## OPTIMISATION OF PLANT PROTEIN HYDROLYSIS IN PRESENCE OF YEAST PROTEASES

**A.N. Ivankin**

BMSTU (Mytishchi branch), 1 st. Institutskaya, 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

[aivankin@mgul.ac.ru](mailto:aivankin@mgul.ac.ru)

A methodology is described for optimizing the process of enzymatic hydrolysis of plant proteins by yeast proteases *Saccharomyces carlsbergensis* using model soy protein as a substrate. Enzymatic treatment was carried out under the influence of autolyzed brewer's yeast waste containing up to 40 % active yeast cells. It is shown that as a result of process optimization using the simplex method of experiment planning, optimal conditions for conducting the process of enzymatic hydrolysis of plant proteins in the presence of brewer's yeast biomass were found, which were: protein concentration in the suspension 30 %, amount of added yeast suspension 40 %, sodium citrate content 5,6 %, ethanol 4,2 %, added water 20,2 %. The time of hydrolytic treatment at the optimum temperature of 58 °C was 4,3 hours. The product yield, assessed by the nitrogen content of free amino groups, increased from 10...12 % without optimization to 34 % as a result of the optimization of process parameters. It has been shown that the maximum rate of the process of hydrolytic decomposition of plant proteins under optimal conditions is more than  $0,48 \cdot 10^{-3}$  mgNH<sub>2</sub>/ml·min, and the activation energy  $E_a$  is 80,7 kJ/mol. The possibility of additionally increasing the yield of the target hydrolyzate by re-introducing the enzyme preparation pancreatin into the system was established, as a result of which it was possible to increase the yield of the product to 52...55 % and obtain a product balanced in amino acid composition. It was found that the amino acid composition of the resulting enzymatic hydrolyzate included all essential amino acids, g/100 g protein: Ile 4,7; Leu 7,0; Lys 6,9; Met 1,6; Cys 3,7; Phe 5,8; Tyr 4,1; Tre 4,2; Trp 1,5; Val 6,8; as well as non-essential amino acids: Ala 5,9; Arg 5,5; Asp 8,8; His 3,3; Gly 3,8; Glu 10,2; Pro 5,1; Ser 9,0. It has been shown that the enzymatic hydrolyzate has potentially high biological value, which can facilitate its effective use as part of highly nutritious systems.

**Keywords:** plant proteins, enzymatic hydrolysis, brewer's yeast, biodegradation, optimization of conditions

**Suggested citation:** Ivankin A.N. *Optimizatsiya protsessa gidroliza rastitel'nykh belkov v prisutstvii drozhzhevykh proteaz* [Optimisation of plant protein hydrolysis in presence of yeast proteases]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 3, pp. 105–114. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-105-114



## References

- [1] Mileti O., Baldino N., Lupi F.R., Gabriele D. Interfacial behavior of vegetable protein isolates at sunflower oil/water interface. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2023, v. 221, p. 113035. doi.org/10.1016/j.colsurfb.2022.113035
- [2] Adeva-Andany M.A., Fernandez-Fernandez C., Carneiro-Freire N., Vila-Altesor M., Ameneiros-Rodríguez E. The differential effect of animal versus vegetable dietary protein on the clinical manifestations of diabetic kidney disease in humans. *Clinical Nutrition ESPEN*, 2022, v. 48, pp. 21–35. doi.org/10.1016/j.clnesp.2022.01.030
- [3] Castro-Rubio A., García M.C., Marina M.L. Rapid separation of soybean and cereal (wheat, corn, and rice) proteins in complex mixtures: Application to the selective determination of the soybean protein content in commercial cereal-based products. *Analytica Chimica Acta*, 2006, v. 558, no. 2, pp.28–34. doi.org/10.1016/j.aca.2005.10.076
- [4] Ijarotimi O.S., Fakayejo D.A., Oluwajuyitan T.D. Nutritional characteristics, glycaemic index and blood glucose lowering property of gluten-free composite flour from wheat, soybean, oat-bran and rice-bran. *Applied Food Research*, 2021, v. 1, no. 2, p. 100022. doi.org/10.1016/j.afres.2021.100022
- [5] Dizlek H., Girard A.L., Awika J.M. High protein and gliadin content improves tortilla quality of a weak gluten wheat. *LWT*, 2022, v. 160, no. 4, p. 113320. doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113320
- [6] Sadh P.K., Chawla P., Kumar S., Das A., Kumar R., Bains A., Sridhar K., Duhan J.S., Sharma M. Recovery of agricultural waste biomass: A path for circular bioeconomy. *Science of The Total Environment*, 2023, v. 870, no. 4, p. 161904. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161904
- [7] Kuznetsova T.G., Ivankin A.N., Kulikovskiy A.V. *Nanosensornyy analiz myasnogo syr'ya i rastitel'nyh ob'ektov*. [Nanosensor analysis of meat raw materials and plant objects]. Saarbrücken: LAMBERT Academic Publishing, 2012, 232 p.
- [8] Awogbemi O., Von Kallon D.V. Pretreatment techniques for agricultural waste. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2022, v. 6, no. 12, p. 100229. doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100229
- [9] Korkmaz K., Tokur B. Optimization of hydrolysis conditions for the production of protein hydrolysates from fish wastes using response surface methodology. *Food Bioscience*, 2022, v. 45, no. 2, p. 101312. doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101312
- [10] Ariaeenejad S., Kavousi K., Sheykh A., Mamaghani A., Ghasemitabesh R., Salekdeh G.H. Simultaneous hydrolysis of various protein-rich industrial wastes by a naturally evolved protease from tannery wastewater microbiota. *Science of The Total Environment*, 2022, v. 815, no. 4, p. 152796. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152796
- [11] Srivastava R. K., Nedungadi S.V., Akhtar N., Sarangi P.K., Subudhi S., Shadangi K.P., Govarthanan M. Effective hydrolysis for waste plant biomass impacts sustainable fuel and reduced air pollution generation: A comprehensive review. *Science of The Total Environment*, 2023, v. 859(2), no. 2, p. 160260. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160260
- [12] Kadyrov F.F., Yabbarov A.M., Paramonova T.A., Gnusarev S.S. *Proekt kompleksnoy bezotkhodnoy zagotovki i pererabotki drevesiny* [Project for integrated waste-free harvesting and processing of wood]. *Intensifikatsiya ispol'zovaniya i vosproizvodstva lesov* [Intensification of forest use and reproduction]. Ulyanovsk, 2024, pp. 91–96.
- [13] Kumar D., Tarafdar F., Kumar Y., Dass S.L., Pareek S., Badgujar P.C. Production of functional spent hen protein hydrolysate powder and its fortification in food supplements: A waste to health strategy. *Food Bioscience*, 2022, v. 50(B), no. 12, p. 102193. doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102193
- [14] Muhammad Mustafa Abeer M.M., Trajkovic S., Brayden D.J. Measuring the oral bioavailability of protein hydrolysates derived from food sources: A critical review of current bioassays. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2021, v. 144, no. 12, p. 112275. doi.org/10.1016/j.biopha.2021.112275
- [15] Neklyudov A.D., Ivankin A.N., Berdutina A.V. Production and purification of protein hydrolysates (review). *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2000, v. 36, no. 4, pp. 317–324.
- [16] Marson G.V., Machado M.T., de Castro R.J., Hubinger M.D. Sequential hydrolysis of spent brewer's yeast improved its physico-chemical characteristics and antioxidant properties: A strategy to transform waste into added-value biomolecules. *Process Biochemistry*, 2019, v. 84, no. 9, pp. 91–102. doi.org/10.1016/j.procbio.2019.06.018
- [17] Lisitsyn A.B., Ivankin A.N., Neklyudov A.D. *Metody prakticheskoy biotekhnologii* [Methods of practical biotechnology]. Moscow: VNIIMP, 2002, 408 p.
- [18] Ivankin A.N., Oliferenko G.L., Kulikovskiy A.V. *Analiticheskaya himiya* [Analytical chemistry]. Moscow: Knorus, 2021, 300 p.
- [19] Neklyudov A.D., Berdutina A.V., Ivankin A.N., Karpo B.S., Osoka A.V. Determination of the kinetic constants of hydrolysis of keratin-containing raw materials. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 1999, v. 35, no. 1, pp. 45–49.
- [20] Ivankin A.N., Krasnoshtanova A.A. *Gidroliz nanobiomakromolekulyarnykh sistem* [Hydrolysis of nanobio-macromolecular systems]. Moscow: Moscow State Forest University, 2010, 396 p.
- [21] Liu P., Zhao Y., Guo H., Chang J.S., Lee D.J. Enzymolysis kinetics of corn straw by impeded Michaelis model and Box-Behnken design // *Environmental Research*, 2024, v. 242, no. 2, 117658. doi.org/10.1016/j.envres.2023.117658
- [22] Douglas J., Carter C.W., Wills P.R. A Michaelis-Menten model for non-homogeneous enzyme mixtures // *Science*, 2024, v. 27, no. 2, p. 108977. doi.org/10.1016/j.isci.2024.108977
- [23] Yang M., Ye A., Yang Z., Everett D.W., Gilbert E.P., Singh H. Kinetics of pepsin-induced hydrolysis and the coagulation of milk proteins // *Journal of Dairy Science*, 2022, v. 105, no. 2, pp. 990–1003. doi.org/10.3168/jds.2021-21177
- [24] Raska P., Ulrych Z. Comparison of Modified Downhill Simplex and Differential Evolution with other Selected Optimization Methods used for Discrete Event Simulation Models // *Procedia Engineering*, 2015, v. 100, no. 2, pp. 807–815. doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.435
- [25] Lakin G.F. *Biometriya* [Biometrics]. Moscow: Higher School, 1990, 351 p.
- [26] Bychkova E., Rozhdestvenskaya L., Podgorbunskikh E., Kudachyova P. The problems and prospects of developing food products from high-protein raw materials // *Food Bioscience*, 2023, v. 56, no. 12, p. 103286. doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103286
- [27] Feng L., Wu Y., Han Y., Yao X., Li Q., Liu M., Cao Y. Structural characteristics, functional properties and nutritional value of walnut protein by limited enzymatic hydrolysis // *LWT*, 2024, v. 197, no. 4, p. 115923. doi.org/10.1016/j.lwt.2024.115923
- [28] Sautin S.N. *Planirovanie eksperimenta v himii i himicheskoy tekhnologii* [Planning an experiment in chemistry and chemical technology]. Leningrad: Chemistry, 1975, 48 p.

- [29] Chat GPT neural network. Available at: <https://gpt-chatbot.ru/> (accessed 15.05.2023).
- [30] Dai H., An H. Effect of protease hydrolysis pretreatment on extruder response and the structural characteristics of high-moisture plant-protein extrudates // *Journal of Food Engineering*, 2024, no. 3, p. 112062. doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.112062
- [31] Wang Y., Li Z., Li H., Selomulya K. Effect of hydrolysis on the emulsification and antioxidant properties of plant-sourced proteins // *Current Opinion in Food Science*, 2022, v. 48, no. 12, p. 100949. doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100949
- [32] Neklyudov A.D., Fedorova N.V., Ilyukhina V.P., Lisitsa E.P. Enzymatic profile of autolyzing yeast of the genus *Saccharomyces* // *Applied Biochemistry and Microbiology*, 1993, v. 29, no. 5, pp. 734–743.
- [33] Blayo C., Vidcoq O., Lazennec F., Dumay E. Effects of high pressure processing (hydrostatic high pressure and ultra-high pressure homogenisation) on whey protein native state and susceptibility to tryptic hydrolysis at atmospheric pressure // *Food Research International*, 2016, v. 79, no. 1, pp. 40–53. doi.org/10.1016/j.foodres.2015.11.024
- [34] Luo L., Yan B., Xu S., Zhou J., Liang J., Zhao J., Tyagi R.D., Wong W.C. Regulation of acidogenic fermentation through exogenous additives for promoting carbon conversion of food waste in two-phase anaerobic system // *Bioresource Technology*, 2023, v. 368, no. 1, p. 128368. doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128368
- [35] Zhao Q., Fan Y., Zhao L., Zhu Y., Jiang Y., Gu J., Xue Y., Hao Z., Shen Q. Identification and molecular binding mechanism of novel pancreatic lipase and cholesterol esterase inhibitory peptides from heat-treated adzuki bean protein hydrolysates // *Food Chemistry*, 2024, v. 439, no. 5, p. 138129. doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138129

## Author's information

**Ivankin Andrey Nikolayevich** — Dr. Sci. (Chem.), Member of the International Higher Education Academy of Sciences (IHEAS), Professor of the Department of Chemistry BMSTU (Mytishchi branch), [aivankin@mgul.ac.ru](mailto:aivankin@mgul.ac.ru)

Received 16.05.2023.

Approved after review 22.05.2023.

Accepted for publication 02.02.2024.

## ИССЛЕДОВАНИЕ АДСОРБЦИИ СПИРТОВ СИВУШНОЙ ФРАКЦИИ НА АКТИВНЫХ УГЛЯХ РАЗЛИЧНЫХ МАРОК

Ю.Л. Юрьев✉, А.В. Свиридов, Н.А. Дроздова

ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», Россия, 620100, Екатеринбург,  
ул. Сибирский тракт, д. 37

yurievyl@m.usfeu.ru

Приведены результаты исследования адсорбционной активности четырех образцов исходных и проактивированных водяным паром древесных углей применительно к очистке от спиртов сивушной группы, образующихся в ликеро-водочном производстве. Одним из сорбентов являлся активный уголь, полученный путем активации березового угля во вращающейся печи с зигзагообразной вставкой. Определены величины адсорбционной емкости углей различного происхождения при адсорбции спиртов сивушной группы. Рассчитаны термодинамические потенциалы процесса сорбции. Показана эффективность применения активного угля, полученного из промышленного березового угля путем его активации во вращающейся печи с зигзагообразной вставкой.

**Ключевые слова:** активный уголь, производство водки, адсорбция спиртов, термодинамический потенциал

**Ссылка для цитирования:** Юрьев Ю.Л., Свиридов А.В., Дроздова Н.А. Исследование адсорбции спиртов сивушной фракции на активных углях различных марок // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 3. С. 115–123. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-115-123

Активные угли (АУ) давно и широко используются во многих отраслях народного хозяйства [1] для сорбции различных веществ [2–5], в частности спиртов [6]. Основное значение при этом имеет структура пор [7–10]. Так, показано [11], что эффективные адсорбенты должны иметь большую долю микропор с шириной примерно в 1,5 раза больше, чем кинетический диаметр целевого адсорбата.

В работе [12] проведено исследование процесса очистки воды от ПАВ сорбцией на углях с применением электрофлотационного метода. В работе [13] установлено, что эффективным сорбционным материалом является скорлупа косточек абрикоса. Выявлено, что удельная поверхность и суммарный объем пор АУ из косточек плодов абрикоса зависят от режимов карбонизации и активации сырья. В зависимости от параметров карбонизации и активации АУ из скорлупы косточек плодов абрикоса имеют значения удельной поверхности от 25 до 1200 м<sup>2</sup>/г и более. Показано, что они являются эффективными сорбентами, применяющимися для удаления различных поллютантов из водных сред.

Для очистки воды от поллютантов предложено также использовать органоминеральные адсорбенты [14], АУ из косточек урюка [15], шелухи риса [16], скорлупы лесного ореха [17], брикетированные древесные угли на основе коры пихты [18].

Производство АУ на основе растительного сырья имеет хорошую перспективу [19–21], при

этом может использоваться и недревесное сырье [7, 22–24]. Традиционно АУ используют в ликеро-водочном производстве как для очистки исходной воды, так и для очистки сортировки [25, 26]. Технология очистки активными углями чаще всего предусматривает парогазовую активацию [27–30].

Сорбционные методы очистки традиционно применяются для улучшения дегустационных показателей водки. Вообще водкой можно назвать только сортировку, т. е. смесь специально подготовленной воды и предварительно очищенного спирта, пропущенную через АУ. С помощью АУ хорошо сорбируются высшие спирты, карбоновые кислоты и сложные эфиры. Наиболее часто в ликеро-водочной промышленности применяются дробленый уголь марки БАУ-А или порошок уголь марки ОУ-А. Обе марки производятся в основном из березового угля.

При помощи гранулированного активного угля также проводят удаление органических углеводородных загрязнителей из нефтезагрязненных сточных вод, при водоподготовке для пищевой промышленности [31] и при детоксикации почв [32].

Органические примеси, сопутствующие этиловому спирту, обычно входят в состав сивушных масел, которые имеют многокомпонентный состав.

Альдегиды придают спирту терпкость и жгучесть. Уксусный альдегид придает резкий неприятный запах, пропионовый — душливый, масляный и изовалериановый — острый фруктовый.

При переработке доброкачественной бражки в спирте-сырце больше всего уксусного альдегида. При использовании сырья невысокого качества в спирте могут появиться непредельные соединения, которые придают ему особо неприятный запах и жгучий вкус.

Высшие (по отношению к этиловому) спирты придают неприятные удушливые и резкие сивушные тона. Это относится к бутиловому, изобутиловому и изоамиловому спирту. Изопропиловый и пропиловый спирты в разбавленных растворах имеют слабые тона, без особой жгучести во вкусе.

Сложные эфиры (этилацетат, пропиловый эфир изомасляной кислоты, изобутиловый эфир масляной кислоты и др.) представляют собой продукт взаимодействия спиртов и кислот, образовавшихся в процессе брожения. Эти соединения придают спирту не свойственный ему фруктовый или цветочный запах.

Летучие кислоты (уксусная, масляная, изомасляная, пропионовая и др.) резко снижают органолептические показатели водки: пропионовая кислота придает горечь, масляная, изомасляная и валериановая — запах пота и длительное неприятное послевкусие [33]. Алифатические кислоты также могут быть адсорбированы на активных углях [34].

Метиловый спирт образуется в основном, в результате термического и биохимического расщепления пектиновых веществ. В среднем его концентрация в продуктах перегонки в пересчете на безводный спирт составляет 0,05...0,5 %. Незначительное количество метилового спирта может образоваться и в процессе спиртового брожения. Метанол, как известно, обладает очень высокой токсичностью.

## Цель работы

Цель работы — рассмотрение процесса очистки водных растворов от органических примесей сорбционным методом с применением активных углей различных марок.

## Объекты и методы исследования

Проведено исследование адсорбции спиртов сивушной группы на углях нескольких производств: активный уголь (АУ) марки БАУ производства ПО «Сорбент» г. Пермь, древесный уголь (ДУ) одного из предприятий Среднего Урала, этот же ДУ после активации в лабораторных условиях (АУЛ) и фармацевтический (аптечный) уголь марки УБФ.

Активация промышленного ДУ в целях получения АУЛ проводилась с использованием печи, оборудованной зигзагообразной вставкой [26] (рис. 1, 2).

Адсорбция изучалась [35] для всех образцов углей.

Исследования проводились на установке Ребиндера. Адсорбция рассчитывалась по уравнению Шишковского, адсорбционная емкость на границе «жидкость — газ» определялась по методу наименьших квадратов, адсорбция на границе «жидкость — твердое тело» ( $a$ ) рассчитывалась по формуле

$$a = \frac{(C_0 - C)V}{m} 1000, \quad (1)$$

где  $C_0$  и  $C$  — концентрация адсорбата (моль/л) в растворе до и после адсорбции на угле;

$V$  — объем пробы, мл;

$m$  — масса угля, г.

Концентрация ( $C$ ) определялась по изотермам поверхностного натяжения.

Геометрические параметры молекул адсорбата, определенные экспериментально, приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

### Адсорбция спиртов на границе «жидкость — газ»

#### Adsorption of alcohols at the liquid — gas interface

Спирт	293 К		
	$a_\infty \cdot 10^6$ , моль/м <sup>2</sup>	$S_0 \cdot 10^{20}$ , м <sup>2</sup>	$\delta \cdot 10^{10}$ , м
Пропанол	4,39	37,8	3,3
Бутанол	5,5	30,2	5,05
Пентанол	5,83	28,5	6,33

*Примечание.*  $S_0$  — площадь, занимаемая одной молекулой адсорбата;  $A_\infty$  — сорбционная емкость угля;  $\delta$  — длина молекулы.

Из табл. 1 следует, что длина молекул адсорбата растет в гомологическом ряду в среднем на 0,15 нм в расчете на группу  $-\text{CH}_2-$ .

## Результаты и обсуждение

Получены экспериментальные данные адсорбции высших спиртов (табл. 2–5). В таблицах используются следующие физические величины:

$k$  — константа адсорбционного равновесия в уравнении Ленгмюра;

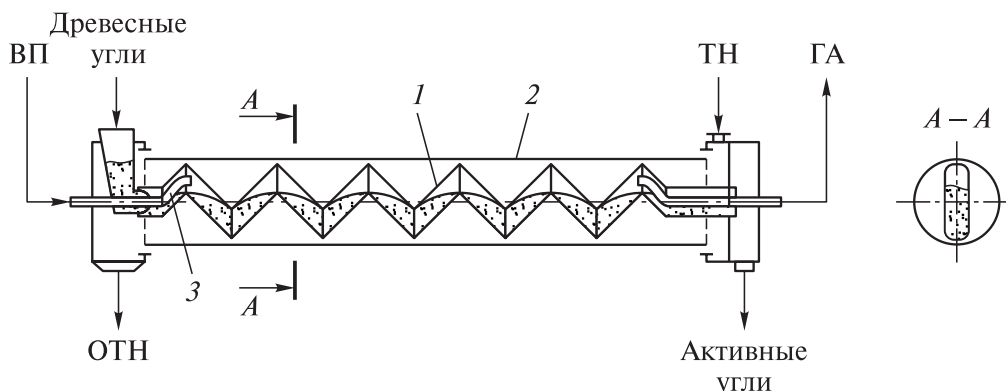
$\Delta F$  — энергия Гельмгольца,  $\Delta F = -RT \ln k$ ;

$\Delta U$  — теплота адсорбции.

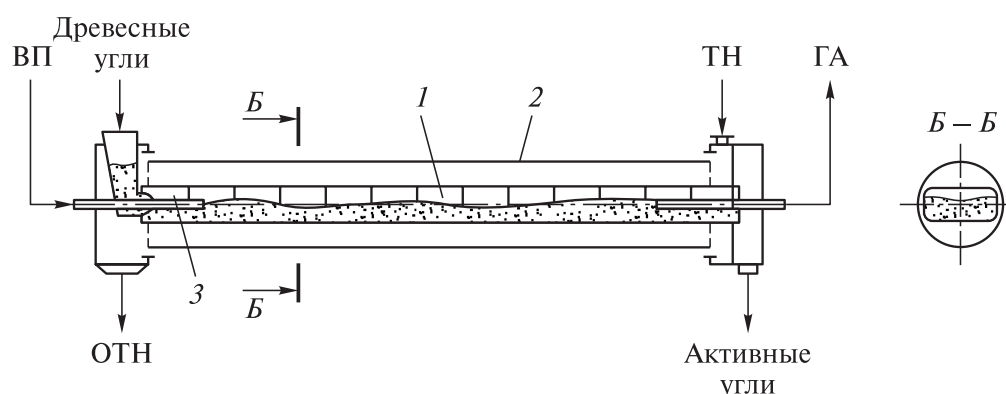
Для расчетов величин в табл. 2–5 использовали следующие формулы:

– уравнение изобары Вант-Гоффа

$$\Delta U = \frac{RT_1 T_2 \ln \left( \frac{k_{T_1}}{k_{T_2}} \right)}{T_1 - T_2}, \quad (2)$$



**Рис. 1.** Схема печи активации при вертикальном положении зигзагообразной вставки: 1 — вставка; 2 — барабан; 3 — подача пара; ТН — теплоноситель; ОТН — отработанный теплоноситель; ГА — газы активации; ВП — водяной пар; ДУ — древесный уголь; АУ — активный уголь  
**Fig. 1.** Scheme of the activation furnace at vertical position of the zigzag insert element: 1 — insert; 2 — drum; 3 — steam supply; TH — heat carrier; WTC — waste heat carrier; GA — activation gases; WV — water vapour; DU — charcoal; AU — active coal



**Рис. 2.** Схема печи активации при горизонтальном положении зигзагообразной вставки: 1 — вставка; 2 — барабан; 3 — подача пара; остальные условные обозначения см. на рис. 1  
**Fig. 2.** Scheme of the activation kiln at horizontal position of the zigzag insert element: 1 — insert; 2 — drum; 3 — steam supply; other conventional designations see on Fig. 1

Т а б л и ц а 2

**Адсорбция пропанола на углях различных марок при двух значениях температуры**  
**Adsorption of propanol on coals of different grades at two temperature values**

Марка угля	$a_{\infty} \cdot 10^3$ , моль/г	$k \cdot 10^{-3}$ , м <sup>3</sup> /моль	$\Delta F$ , Дж/моль	$\Delta U$ , Дж/моль	$\Delta S$ , Дж/(моль · К)
278 К					
Древесный уголь	5,6	0,783	-15 390	-14 970	1,51
Пермский БАУ	20,0	0,600	-14 780	-10 730	14,56
АУЛ	38,7	0,490	-14 310	-4960	33,63
Уголь активный УБФ	46,0	0,390	-13 780	-3737	36,13
293 К					
Древесный уголь	3,1	0,562	-15 420	-14 970	1,51
Пермский БАУ	16,0	0,473	-15 000	-10 730	14,56
АУЛ	31,3	0,439	-14 815	-4960	33,63
Уголь активный УБФ	38,4	0,359	-14 325	-3737	36,14

– уравнение для определения энтропии адсорбции

$$\Delta F = \Delta U - T\Delta S, \quad (3)$$

где  $\Delta S$  — энтропия адсорбции.

## Результаты и обсуждение

На основании экспериментальных данных можно сравнить сорбционную активность различных марок углей применительно к очистке

водно-спиртовых растворов: при активации ДУ адсорбционная емкость его ( $a_\infty$ ) для пропанола (см. табл. 2) увеличивается в 7 раз при температуре 278 К и в 10 раз при температуре 293 К; для бутанола (см. табл. 3) — в 9 раз при температуре 278 К и в 20 раз при температуре 293 К; для пентанола (см. табл. 4) — в 4 раза при температуре 278 К и в 6 раз при температуре 293 К. В связи с этим становится совершенно очевидной эффективность проведения процесса активации ДУ.

Т а б л и ц а 3

### Адсорбция бутанола на углях различных марок при двух значениях температуры

#### Adsorption of butanol on different grades of coal at two temperatures

Марка угля	$a_\infty \cdot 10^3$ , моль/г	$k \cdot 10^{-3}$ , м <sup>3</sup> /моль	$\Delta F$ , Дж/моль	$\Delta U$ , Дж/моль	$\Delta S$ , Дж/(моль · К)
278 К					
Древесный уголь	2,7	1,780	-17 290	-16 740	1,98
Пермский БАУ	9,4	0,902	-15 720	-11 440	15,4
АУЛ	24,1	0,568	-14 651	-6025	31,0
Уголь активный УБФ	29,8	0,508	-14 394	-4676	35,0
293 К					
Древесный уголь	1,00	1,390	-17 621	-16 740	3,0
Пермский БАУ	7,48	0,700	-15 950	-11 440	15,4
АУЛ	21,80	0,497	-15 117	-6025	31,0
Уголь активный УБФ	27,25	0,458	-14 918	-4676	35,0

Т а б л и ц а 4

### Адсорбция пентанола на углях различных марок при двух значениях температуры

#### Adsorption of pentanol on coals of different grades at two temperatures

Марка угля	$a_\infty \cdot 10^3$ , моль/г	$k \cdot 10^{-3}$ , м <sup>3</sup> /моль	$\Delta F$ , Дж/моль	$\Delta U$ , Дж/моль	$\Delta S$ , Дж/(моль · К)
278 К					
Древесный уголь	1,01	5,90	-20 000	-17 540	9,06
Пермский БАУ	3,69	3,21	-18 650	-12 380	22,55
АУЛ	4,37	2,46	-18 040	-7570	37,66
Уголь активный УБФ	5,26	1,91	-17 453	-5790	41,95
293 К					
Древесный уголь	0,56	4,00	-20 190	-17 540	9,04
Пермский БАУ	3,13	2,44	-18 990	-12 380	22,56
АУЛ	3,52	2,08	-19 600	-7570	37,65
Уголь активный УБФ	4,68	1,68	-18 080	-5790	41,95

Т а б л и ц а 5

### Адсорбция спиртов на пермском угле при температуре 293 К

#### Adsorption of alcohols on Permian coal at 293 K

Спирт	$a_\infty \cdot 10^3$ , моль/г	$k \cdot 10^{-3}$ , м <sup>3</sup> /моль	$\Delta F$ , Дж/моль	$\Delta U$ , Дж/моль	$\Delta S$ , Дж/(моль · К)
Метанол	25,6	0,206	-12970	–	–
Этанол	20,0	0,330	-14120	-9970	14,16
Пропанол	16,0	0,473	-15000	-10710	14,65
Бутанол	7,48	0,700	-15950	-11440	15,40
Пентанол	3,13	2,440	-18990	-12170	22,56
Изопропанол	26,0	0,218	-13110	-10730	14,57
Изобутанол	10,1	0,670	-15840	-10200	19,25
Изопентанол	4,5	2,150	-18680	–	–

Значение предельной адсорбции для пропанола и бутанола на АУЛ более чем в 2 раза выше по сравнению с Пермским БАУ, что свидетельствует о необходимости и экономической целесообразности внедрения активации ДУ во вращающейся печи со вставкой.

## Выводы

Сравнение значений  $a_{\infty}$  при двух значениях температуры позволяет сделать вывод: с увеличением температуры адсорбция уменьшается, — что не противоречит общепринятым представлениям.

Термодинамические расчеты показали, что процесс адсорбции спиртов на углях различных марок протекает самопроизвольно ( $\Delta F < 0$ ), теплота адсорбции ( $\Delta U$ ) в этом случае тоже меньше нуля, т. е. адсорбция носит экзотермический характер. При этом следует отметить, что значения термодинамических потенциалов ( $\Delta F$ ,  $\Delta U$ ,  $\Delta S$ ), рассчитанных для адсорбции бутилового спирта на активных углях, хорошо согласуются с аналогичными величинами, полученными для адсорбции этого спирта на ртутном электроде.


В гомологическом ряду спиртов при увеличении углеводородного радикала на группу  $-\text{CH}_2-$  адсорбционная емкость снижается (см. табл. 5), значения констант адсорбционного равновесия возрастают, причем для изомеров соответствующие величины выше, чем для нормальных спиртов.

## Список литературы

- [1] Мухин В.М., Тарасов А.В., Клушин В.Н. Активные угли России. М.: Металлургия, 2000. 352 с.
- [2] Григорьев Л.Н., Веренцова Л.Г., Шанова О.А., Родионова А.А. Адсорбция левомицетина из разбавленных водных растворов на активных углях // Инновации в здоровье нации: сборник материалов III Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Санкт-Петербург, 10–11 ноября 2015 г. Санкт-Петербург: Изд-во Санкт-Петербургской государственной химико-фармацевтической академии, 2015. С. 209–211.
- [3] Григорьев Л.Н., Веренцова Л.Г., Родионова А.А. Кинетика адсорбции тетрациклина гидрохлорида на промышленных активных углях // Инновации в здоровье нации: сборник материалов IV Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Санкт-Петербург, 09–10 ноября 2016 г. Санкт-Петербург: Изд-во Санкт-Петербургской государственной химико-фармацевтической академии, 2016. С. 287–290.
- [4] Шанова О.А., Веренцова Л.Г., Григорьев Л.Н. Адсорбция тетрациклина гидрохлорида из водных растворов на активных углях // Инновации в здоровье нации: V Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Санкт-Петербург, 08–09 ноября 2017 г. Санкт-Петербург: Изд-во Санкт-Петербургской государственной химико-фармацевтической академии, 2017. С. 452–455.
- [5] Дроздова Н.А., Юрьев Ю.Л. Изучение сорбционных свойств активного угля в статических условиях // Вестник Казанского технологического университета, 2013. Т. 16. № 19. С. 83–84.
- [6] Рябухова Т.О., Арзамасцева А.Б., Окишева Н.А., Коновалова С.Н. Адсорбция спиртов из бинарных растворов на активных углях // Журнал физической химии, 2000. Т. 74. № 2. С. 345–347.
- [7] Achaw O.W, Afrane G. The evolution of the pore structure of coconut shells during the preparation of coconut shell-based activated carbons // Microporous and Mesoporous Materials, 2008, v. 112, iss. 1–3, pp. 284–290. DOI: 10.1016/j.micromeso.2007.10.001
- [8] Ivanets M.G., Savitskaya T.A., Nevar T.N., Grinshpan D.D. Adsorbitive and structural characteristics of carbon sorbents // Inorganic materials, 2011, v. 47, no 10, pp. 1061–1065. DOI: 10.1134/S0020168511000098
- [9] Juan Alcañiz-Monge, Angel Linares-Solano, and Brian Rand J. Water Adsorption on Activated Carbons: Study of Water Adsorption in Micro- and Mesopores // Phys. Chem. B, 2001, v. 105, no. 33, pp. 7998–8006. <https://doi.org/10.1021/jp010674b>
- [10] Silvestre-Albero A., Silvestre-Albero J., Sepúlveda-Escribano A., Rodríguez-Reinoso F. Ethanol removal using activated carbon: Effect of porous structure and surface chemistry // Microporous and Mesoporous Materials, 2009, v. 120, iss. 1–2, pp. 62–68. DOI: 10.1016/j.micromeso.2008.10.012
- [11] Li L., Quinlivan P.A., Knappe D.R.U. Effects of activated carbon surface chemistry and pore structure on the adsorption of organic contaminants from aqueous solution // Carbon, 2002, v. 40, iss. 12, pp. 2085–2100.
- [12] Солодухина С.В., Гайдукова А.М. Исследование процесса очистки воды от ПАВ сорбцией на углях с применением электрофлотационного метода // Успехи в химии и химической технологии, 2021. № 6 (241). Т. 35. С. 141–143.
- [13] Шайхиев И.Г., Шайхиева К.И., Сверхгузова С.В., Винограденко Ю.А. Удаление поллютантов из сточных вод измельченной скорлупой абрикосов // Химия растительного сырья, 2021. № 3. С. 39–54. DOI: 10.14258/jcprgm.2021038405
- [14] Варнавская А.Д., Фидченко М.М., Алехина М.Б. Адсорбционная очистка воды от неионогенных ПАВ на углеродно-минеральных адсорбентах // Успехи в химии и химической технологии, 2021. № 6. С. 25–26.
- [15] Ахадов А.А., Муродов М.Н., Хайитов Р.Р., Орипова Л.Н., Тошкузиев Т.М. Определение структурно-сорбционных свойств активированного угля, полученного из скорлупы косточек урюка // Science and Education, 2021, v. 2, pp. 52–57.
- [16] Со Вин Мьинг, Нистратов А.В., Клушин В.Н. Структурно-адсорбционные показатели активных углей, полученных на базе шелухи риса, выращенного в Мьянме // Успехи в химической технологии, 2022. Т. XXXVI. № 12. С. 112–114.
- [17] Джаббарова Н.Э., Курбанова Л.Н., Гасанова М.Б. Исследование возможности переработки скорлупы лесного ореха в активные угли // Проблемы отраслевой науки и образования, 2024. № 3. С. 1–4.
- [18] Рудковский А.В., Еремينا А.О., Таран О.П. Брикетированные углеродные сорбенты на основе коры пихты сибирской и древесного пека // Вестник Томского государственного университета. Химия, 2021. № 22. С. 24–37.
- [19] Юрьев Ю.Л., Панова Т.М. Основные направления производства и переработки древесного угля // Химия и химическая технология переработки растительного сырья: Междунар. науч.-технич. конф., посвященная 100-летию со дня рождения В.М. Резникова. Минск, 10–12 октября 2018 г. Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2018. С. 20–22.

- [20] Юрьев Ю.Л., Гиндулин И.К., Дроздова Н.А. Варианты переработки низкосортной древесины на углеродные материалы // ИзВУЗ Лесной журнал, 2017. № 5 (359). С. 139–149.
- [21] Юрьев Ю.Л. Тенденции развития технологии пиролиза древесины // Леса России и хозяйство в них, 2016. № 3 (58). С. 58–63.
- [22] Raul E.R., Thakur M.A.B., Chaudhari A.R. A review on activated carbon preparation from natural and eco-friendly raw materials // AIP Conference Proceedings, 2021, v. 2417, p. 020011. <https://doi.org/10.1063/5.0072755>
- [23] Wienhaus O., Blossfeld O., Born M., Zimmer J. Neue Erkenntnisse bei der Erzeugung von Holz- und Aktivkohlen aus Kieferschlagabraum // Zellst. und Pap., 1985, v. 34, no. 1, pp. 32–36.
- [24] Lussier M.G., Shull J.C., Miller D.J. Activated Carbon from Cherry Stones // Carbon, 1994, v. 32, no. 8, pp. 1493–1498.
- [25] Жумаева Д.Ж., Эшметов И.Д., Тилабов Ж.Ф. История технологии приготовления водки и изучение ее очистки с различными адсорбентами // Наука молодых – наука будущего: III Междунар. науч.-практич. конф., Петрозаводск, 02 февраля 2023 г. Петрозаводск: Междунар. центр научного партнерства «Новая Наука», 2023. С. 250–256.
- [26] Поляков В.А., Абрамова И.М., Морозова С.С., Устинова Е.В. Перспективные активные угли в технологии водок // Производство спирта и ликеро-водочных изделий, 2015. № 2. С. 17–20.
- [27] Wienhaus O., Klose E., Born M., Hennig F., Blossfeld O., Seidel H., Riedel D., Fischer F., Zimmer J., Heidrich M., Löttsch P. Process for the Manufacture of Active Carbon. Patent EP, dec. 13, no. 0216229.
- [28] Панюта С.А., Юрьев Ю.Л., Стахровская Т.Е., Шишко И.И. Способ активации карбонизированных материалов. Патент № 2051097 С1, Российская Федерация, МПК С01В 31/10, С23С 8/00: № 92008212/02.
- [29] Дроздова Н.А., Юрьев Ю.Л. Активация березового и осинового угля // Вестник Казанского технологического университета, 2012. Т. 15. № 13. С. 147–148.
- [30] Юрьев Ю.Л., Орлов В.П., Панюта С.А., Штеба Т.В. Проблемы аппаратного оформления процессов переработки измельченной древесины в активные угли // ИзВУЗ Лесной журнал, 2000. № 5–6. С. 52–56.
- [31] Тимошук И.В. К вопросу подготовки воды для пищевой промышленности // Техника и технология пищевых производств, 2010. № 3 (18). С. 111–116
- [32] Мухин В.М. Углеродные адсорбенты как функциональные материалы для решения экологических проблем // Труды Кольского научного центра РАН, 2015. С. 572–575.
- [33] Никитина С.Ю., Рудаков О.Б., Кудухова И.Г. Сорбционные и ионообменные методы очистки пищевого этилового спирта и полупродуктов брагоректификации от микропримесей (обзор) // Сорбционные и хроматографические процессы, 2010. Т. 10. № 3. С. 389–400.
- [34] Еремина А.О., Головина В.В., Чесноков Н.В., Соболев А.А. Адсорбция летучих алифатических кислот из водных растворов на активных углях // Журнал Сибирского федерального университета. Химия, 2014. № 7. С. 582–589.
- [35] Ермакова Т.А., Акатьев В.В., Дрючков Е.С., Фомичев В.Т. Адсорбция на поверхности твердого тела. Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2021. 32 с.

## Сведения об авторах

**Юрьев Юрий Леонидович**  — д-р техн. наук, профессор кафедры химической технологии древесины, биотехнологии и наноматериалов, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», [yurievuyul@m.usfeu.ru](mailto:yurievuyul@m.usfeu.ru)

**Свиридов Алексей Владиславович** — канд. техн. наук, доцент кафедры химической технологии древесины, биотехнологии и наноматериалов, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», [sviridovav@m.usfeu.ru](mailto:sviridovav@m.usfeu.ru)

**Дроздова Наталья Александровна** — канд. техн. наук, доцент кафедры химической технологии древесины, биотехнологии и наноматериалов, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», [drozdozana@m.usfeu.ru](mailto:drozdozana@m.usfeu.ru)

Поступила в редакцию 28.06.2023.

Одобрено после рецензирования 18.09.2023.

Принята к публикации 05.04.2024.



## FUSEL FRACTION ALCOHOLS ADSORPTION STUDY ON DIFFERENT GRADES OF ACTIVE CHARCOALS

Y.L. Yur'ev<sup>✉</sup>, A.V. Sviridov, N.A. Drozdova

Ural State Forestry University, 37, Sibirsky tract st., 620100, Ekaterinburg, Russia

yurievyl@m.usfeu.ru

A study of the adsorption activity of four samples of initial and activated charcoal was carried out in relation to the purification from fusel group alcohols formed in the alcoholic beverage industry. One of the sorbents was active carbon obtained by activating birch charcoal in a rotary kiln with a zigzag insert. The increased interest in it is due to the fact that activation using this technology provides an increased yield and stable quality of the resulting active carbon. The values of the adsorption capacity of charcoal of different origin during the adsorption of alcohols of the fusel group were determined. The thermodynamic potentials of the sorption process are calculated. In the homologous series of alcohols, with an increase in the hydrocarbon radical by the  $-CH_2-$  group, the adsorption capacity decreases, the values of the adsorption equilibrium constants increase, and for isomers the corresponding values are higher than for normal alcohols. The effectiveness of the use of active carbon obtained from industrial birch charcoal by its activation in a rotary kiln with a zigzag insert is shown.

**Keywords:** activated charcoal, vodka production, alcohols adsorption, thermodynamic potential

**Suggested citation:** Yur'ev Yu.L., Sviridov A.V., Drozdova N.A. *Issledovanie adsorbtsii spirtov sivushnoy fraktsii na aktivnykh uglyakh razlichnykh marok* [Fusel fraction alcohols adsorption study on different grades of active charcoals]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 3, pp. 115–123.

DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-115-123


### References

- [1] Mukhin V.M., Tarasov A.V., Klushin V.N. *Aktivnye ugli Rossii* [Active coals of Russia]. Metallurgiya [Publishing House of Metallurgy]. Moscow, 2000, 352 p.
- [2] Grigor'ev L.N., Verentsova L.G., Shanova O.A., Rodionova A.A. *Adsorbtsiya levomitsetina iz razbavlenykh vodnykh rastvorov na aktivnykh uglyakh* [Adsorption of levomycetin from dilute aqueous solutions on activated carbons]. *Innovatsii v zdorov'e natsii: sbornik materialov III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Innovations in the health of the nation. collection of materials of the III All-Russian scientific-practical conference with international participation]. Sankt-Peterburg, 10–11 November 2015. Sankt-Peterburg: St. Petersburg State Chemical Pharmaceutical Academy, 2015, pp. 209–211.
- [3] Grigor'ev L.N., Verentsova L.G., Rodionova A.A. *Kinetika adsorbtsii tetratsiklina gidrokhlorida na promyshlennykh aktivnykh uglyakh* [Kinetics of adsorption of tetracycline hydrochloride on industrial activated carbons]. *Innovatsii v zdorov'e natsii: sbornik materialov IV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Collection of materials of the IV All-Russian scientific-practical conference with international participation «Innovations in the health of the nation»], Sankt-Peterburg, 09–10 November 2016. Sankt-Peterburg: St. Petersburg State Chemical Pharmaceutical Academy, 2016, pp. 287–290.
- [4] Shanova O.A., Verentsova L.G., Grigor'ev L.N. *Adsorbtsiya tetratsiklina gidrokhlorida iz vodnykh rastvorov na aktivnykh uglyakh* [Adsorption of tetracycline hydrochloride from aqueous solutions on activated carbons]. *Innovatsii v zdorov'e natsii: sbornik materialov V Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Innovations in the health of the nation. Collection of materials of the V All-Russian scientific-practical conference with international participation], Sankt-Peterburg, 08–09 November 2017. Sankt-Peterburg: St. Petersburg State Chemical Pharmaceutical Academy, 2017, pp. 452–455.
- [5] Drozdova N.A., Yur'ev Yu.L. *Izuchenie sorbtsionnykh svoystv aktivnogo uglya v staticheskikh usloviyakh* [Study of the sorption properties of activated carbon under static conditions]. *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University], 2013, v. 16, no. 19, pp. 83–84.
- [6] Ryabukhova T.O., Arzamastseva A.B., Okisheva N.A., Konovalova S.N. *Adsorbtsiya spirtov iz binarnykh rastvorov na aktivnykh uglyakh* [Adsorption of alcohols from binary solutions on activated carbons]. *Zhurnal fizicheskoy khimii* [Journal of Physical Chemistry], 2000, v. 74, no. 2, pp. 345–347.
- [7] Achaw O.W, Afrane G. The evolution of the pore structure of coconut shells during the preparation of coconut shell-based activated carbons // *Microporous and Mesoporous Materials*, 2008, v. 112, iss. 1–3, pp. 284–290. DOI: 10.1016/j.micromeso.2007.10.001
- [8] Ivanets M.G., Savitskaya T.A., Nevar T.N., Grinshpan D.D. Adsorbitive and structural characteristics of carbon sorbents. *Inorganic materials*, 2011, v. 47, no 10, pp. 1061–1065. DOI: 10.1134/S0020168511100098
- [9] Juan Alcañiz-Monge, Angel Linares-Solano, and Brian Rand J. Water Adsorption on Activated Carbons: Study of Water Adsorption in Micro- and Mesopores. *Phys. Chem. B*, 2001, v. 105, no. 33, pp. 7998–8006. <https://doi.org/10.1021/jp010674b>
- [10] Silvestre-Albero A., Silvestre-Albero J., Sepúlveda-Escribano A., Rodríguez-Reinoso F. Ethanol removal using activated carbon: Effect of porous structure and surface chemistry. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2009, v. 120, iss. 1–2, pp. 62–68. DOI: 10.1016/j.micromeso.2008.10.012
- [11] Li L., Quinlivan P.A., Knappe D.R.U. Effects of activated carbon surface chemistry and pore structure on the adsorption of organic contaminants from aqueous solution. *Carbon*, 2002, v. 40, iss. 12, pp. 2085–2100.

- [12] Solodukhina S.V., Gaydukova A.M. *Issledovanie protsessa ochistki vody ot PAV sorbtsiy na uglyakh s primeneniem elektroflotatsionnogo metoda* [Study of the process of water purification from surfactants by sorption on coals using the electroflotation method]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Advances in chemistry and chemical technology], 2021, no. 12 (247), t. 35, pp. 144–146.
- [13] Shaykhiev I.G., Shaykhieva K.I., Sverkhguzova S.V., Vinogradenko Yu.A. *Udalenie pollyutantov iz stochnykh vod izmel'chennoy skorlupoy abrikosov* [Removal of pollutants from wastewater with crushed apricot shells]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials], 2021, no. 3, pp. 39–54. DOI: 10.14258/jcprm.2021038405
- [14] Varnavskaya A.D., Fidchenko M.M., Alekhina M.B. *Adsorbtsionnaya ochistka vody ot neionogennykh PAV na uglerodno-mineral'nykh adsorbentakh* [Adsorption purification of water from non-ionic surfactants on carbon-mineral adsorbents]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Advances in chemistry and chemical technology], 2021, no. 6, pp. 25–26.
- [15] Akhadov A.A., Murodov M.N., Khayitov R.R., Oripova L.N., Toshkuziev T.M. *Opreделение структурно-сорбционные свойства активированного угля, полученного из скорлупы косточек урюка* [Determination of the structural-sorption properties of activated carbon obtained from the shell of apricot seeds]. *Science and Education*, 2021, v. 2, pp. 52–57.
- [16] Saw Win Myint, Nistratov A.V., Klushin V.N. *Strukturno-adsorbtsionnye pokazateli aktivnykh ugley, poluchennykh na baze shelukhi risa, vyrashchennogo v M'yanme* [Structural and adsorption parameters of active carbons obtained on the basis of rice husk grown in Myanmar]. *Uspekhi v khimicheskoy tekhnologii* [Advances in chemical technology], 2022, v. XXXVI, no. 12, pp. 112–114.
- [17] Dzhabbarova N.E., Kurbanova L.N., Gasanova M.B. *Issledovanie vozmozhnosti pererabotki skorlupy lesnogo orekha v aktivnye ugli* [Investigation of the possibility of processing hazelnut shells into activated carbons]. *Problemy otraslevoy nauki i obrazovaniya* [Problems of branch science and education], 2024, no. 3, pp. 1–4.
- [18] Rudkovskiy A.V., Eremina A.O., Taran O.P. *Briketirovannye uglerodnye sorbenty na osnove kory pikhty sibirskoy i drevesnogo peka* [Briquetted carbon sorbents based on Siberian fir bark and wood pitch]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Tomsk State University. Chemistry], 2021, no. 22, pp. 24–37.
- [19] Yur'ev Yu.L., Panova T.M. *Osnovnye napravleniya proizvodstva i pererabotki drevesnogo uglya* [The main directions of production and processing of charcoal]. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya pererabotki rastitel'nogo syr'ya: materialy dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu so dnya rozhdeniya V.M. Reznikova* [Chemistry and chemical technology for processing vegetable raw materials. Materials of the reports of the International Scientific and Technical Conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of V.M. Reznikov]. Minsk: Belarusian State Technological University, 2018, pp. 20–22.
- [20] Yur'ev Yu.L., Gindulin I.K., Drozdova N.A. *Varianty pererabotki nizkosortnoy drevesiny na uglerodnye materialy* [Options for processing low-grade wood into carbon materials. News of higher educational institutions]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2017, no. 5 (359), pp. 139–149.
- [21] Yur'ev Yu.L. *Tendentsii razvitiya tekhnologii piroliza drevesiny* [Trends in the development of wood pyrolysis technology]. *Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh* [Forests of Russia and economy in them], 2016, no. 3 (58), pp. 58–63.
- [22] Raul E.R., Thakur M.A.B., Chaudhari A.R. A review on activated carbon preparation from natural and eco-friendly raw materials. *AIP Conference Proceedings*, 2021, v. 2417, p. 020011. <https://doi.org/10.1063/5.0072755>
- [23] Wienhaus O., Blossfeld O., Born M., Zimmer J. Neue Erkenntnisse bei der Erzeugung von Holz- und Aktivkohlen aus Kieferschlagabraum. *Zellst. und Pap.*, 1985, v. 34, no. 1, pp. 32–36.
- [24] Lussier M.G., Shull J.C., Miller D.J. Activated Carbon from Cherry Stones. *Carbon*, 1994, v. 32, no. 8, pp. 1493–1498. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/00086223/32>
- [25] Zhumaeva D.Zh., Eshmetov I.D., Tilabov Zh.F. *Istoriya tekhnologii prigotovleniya vodki i izuchenie ee ochistki s razlichnymi adsorbentami* [The history of vodka preparation technology and the study of its purification with various adsorbents]. *Nauka molodykh — nauka budushchego: sbornik statey III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [The science of the young is the science of the future. collection of articles of the III International Scientific and Practical Conference], Petrozavodsk, 02 February 2023. Petrozavodsk: Mezhdunarodnyy tsentr nauchnogo partnerstva «Novaya Nauka», 2023, pp. 250–256.
- [26] Polyakov V.A., Abramova I.M., Morozova S.S., Ustinova E.V. *Perspektivnye aktivnye uglya v tekhnologii vodok* [Promising active carbons in vodka technology]. *Proizvodstvo spirita i likerovodochnykh izdeliy* [Production of alcohol and alcoholic beverages], 2015, no. 2, pp. 17–20.
- [27] Wienhaus O., Klose E., Born M., Hennig F., Blossfeld O., Seidel H., Riedel D., Fischer F., Zimmer J., Heidrich M., Löttsch P. Process for the Manufacture of Active Carbon. Patent EP, 1989, no. 0216229 A2.
- [28] Panyuta S.A., Yur'ev Yu.L., Stakhrovskaya T.E., Shishko I.I. *Sposob aktivatsii karbonizirovannykh materialov* [Method for activating carbonized materials]. Patent № 2051097 C1 RF, MPK C01B 31/10, C23C 8/00: № 92008212/02.
- [29] Drozdova N.A., Yur'ev Yu.L. *Aktivatsiya berezovogo i osinovogo uglya* [Activation of birch and aspen coal]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University], 2012, v. 15, no. 13, pp. 147–148.
- [30] Yur'ev Yu.L., Orlov V.P., Panyuta S.A., Shteba T.V. *Problemy apparatnogo oformleniya protsessov pererabotki izmel'chennoy drevesiny v aktivnye ugli* [Problems of hardware design of the processes of processing crushed wood into active coals]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2000, no. 5–6, pp. 52–56.
- [31] Timoshchuk I.V. *K voprosu podgotovki vody dlya pishchevoy promyshlennosti* [On the issue of water preparation for the food industry]. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv* [Technique and technology of food production], 2010, no. 3 (18), pp. 111–116.
- [32] Mukhin V.M. *Uglerodnye adsorbenty kak funktsional'nye materialy dlya resheniya ekologicheskikh problem* [Carbon adsorbents as functional materials for solving environmental problems]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2015, pp. 572–575.

- [33] Nikitina S.Yu., Rudakov O.B., Kudukhova I.G. *Sorbtsionnye i ionoobmennye metody ochistki pishchevogo etilovogo spirta i poluproduktov bragorektifikatsii ot mikroprimesei (obzor)* [Sorption and ion-exchange methods of purification of food ethyl alcohol and semi-products of bragorectification from microimpurities (review)]. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy* [Sorption and chromatographic processes], 2010, v. 10, no. 3, pp. 389–400.
- [34] Eremina A.O., Golovina V.V., Chesnokov N.V., Sobolev A.A. *Adsorbtsiya letuchikh alifaticeskikh kislot iz vodnykh rastvorov na aktivnykh uglyakh*. [Adsorption of volatile aliphatic acids from aqueous solutions on activated carbons]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Khimiya* [J. of the Siberian Federal University. Chemistry], 2014, no. 7, pp. 582–589.
- [35] Ermakova T.A., Akat'ev V.V., Dryuchkov E.S., Fomichev V.T. *Adsorbtsiya na poverkhnosti tverdogo tela* [Adsorption on the surface of a solid body]. Volgograd: VolGU Publishing House, 2021, 32 p.

## Authors' information

**Yur'ev Yuriy Leonidovich**  — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Department of Chemical Technology of Wood, Biotechnology and Nanomaterials, Ural State Forest Engineering University, yurievuyul@m.usfeu.ru

**Sviridov Aleksey Vladislavovich** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Chemical Technology of Wood, Biotechnology and Nanomaterials, Ural State Forest Engineering University, sviridovav@m.usfeu.ru

**Drozdova Natal'ya Aleksandrovna** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Chemical Technology of Wood, Biotechnology and Nanomaterials, Ural State Forest Engineering University, drozdovana@m.usfeu.ru

Received 28.06.2023.

Approved after review 18.09.2023.

Accepted for publication 05.04.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest

## СИНТЕЗ И СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННЫХ АМИНОФОРМАЛЬДЕГИДНЫХ СМОЛ

М.Ю. Екимова<sup>1✉</sup>, В.Е. Цветков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-испытательный центр 4-го Государственного центрального межвидового полигона Министерства обороны Российской Федерации, Россия, 416550, Астраханская обл., г. Знаменск, ул. Королева, д. 1

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

mashula111@yandex.ru

Представлен метод синтеза пропиточных модифицированных аминокформальдегидных смол, отличительной особенностью которого является получение смол бесщелочным катализом, за счет введения модификатора-катализатора на основе солей полифункциональных кислот, позволяющей улучшить физико-механические свойства смол, а также сократить количество дорогостоящего меламина. Подробно и поэтапно описан ход синтеза аминокформальдегидных смол с разным мольным соотношением меламина и карбамида к формальдегиду, приведены рецептуры смол. Приведены графические зависимости свойств исследуемых смол, наглядно показывающие, что введение модификатора-катализатора позволяет провести синтез при постоянном значении pH и приводит к снижению содержания свободного формальдегида, сохраняя реакционную способность. Охарактеризованы такие свойства как вязкость, пенетрационная способность, поверхностное натяжение полученных модифицированных аминокформальдегидных смол. Сделан вывод об улучшении основных технологических свойств и увеличении срока хранения с помощью модифицирования аминокформальдегидных смол.

**Ключевые слова:** аминокформальдегидные смолы, модифицирование, бесщелочной катализ, меламина

**Ссылка для цитирования:** Екимова М.Ю., Цветков В.Е. Синтез и свойства модифицированных аминокформальдегидных смол // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 3. С. 124–132.

DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-124-132

Аминокформальдегидные смолы, обладающие такими положительными качествами, как высокая прочность, тепло-, водо-, износо- и светостойкость, имеют огромный спектр применения в деревообрабатывающей промышленности. Преимуществами изделий на их основе являются большая прочность и теплостойкость, устойчивость к горению, высокие декоративные качества и способность окрашиваться во всевозможные цвета [1–4].

### Цель работы

Помимо положительных свойств аминокформальдегидные смолы имеют такие недостатки, как низкая молекулярная масса, низкая стабильность, повышенный расход меламина при производстве, высокое содержание свободного формальдегида в смоле и в облицованной плите. Поэтому модифицирование аминокформальдегидных смол актуальная и технически перспективная задача [5–10].

Модифицирующий агент должен удовлетворять следующим требованиям: участвовать в процессе структурирования олигомера; повышать термогидролитическую устойчивость отвержденной смолы; быть нетоксичным; снижать хрупкость отвержденной аминокформальдегидной

смолы, одновременно не уменьшая ее твердость [11–15].

### Материалы и методы

Разработан метод синтеза пропиточных модифицированных аминокформальдегидных смол, отличительная особенность которого заключается в получении смол бесщелочным катализом, что позволяет улучшить физико-механические свойства смол, сократить потребление дорогостоящего меламина [16–18].

Проведены исследования по модификации аминокформальдегидных смол солями полифункциональных органических кислот. В качестве модификатора также был использован диэтиленгликоль [4, 17, 19, 20, 21]. Основными предпосылками для выбора в качестве модифицирующих веществ диэтиленгликоля и солей полифункциональных органических кислот послужили нижеследующие положения.

1. Введение между звеньями карбамида и меламина в макромолекуле олигомера молекул с длинной гибкой цепочкой в значительной степени увеличивает эластичность материала. К низкомолекулярным пластификаторам этого типа относится диэтиленгликоль.

2. Изменение pH формалина, нейтрализованного некоторыми солями полифункциональных

органических кислот, не происходит при его нагревании до 40 °С.

3. При проведении синтеза в среде с постоянным значением pH образуются метилольные соединения карбамида и меламина более устойчивы, что обуславливает высокую стабильность получаемых смол [21, 22].

Продукты поликонденсации при последующей переработке переходят в твердое неплавкое состояние. Большое значение здесь имеет оптимальный выбор условий синтеза и катализаторов отверждения.

С физической стороны процесс отверждения по состоянию смолы принято условно подразделять на две стадии. Первая стадия (золь — гель) заканчивается с потерей текучести. На этой стадии выделяется основное количество воды, снижается количество растворимых в воде фракций полимера, наблюдается снижение метилольных групп, возникают дополнительные водородные связи. Смола приобретает редкосетчатую структуру. На второй стадии (гель — твердое тело) происходит переход олигомера в неплавкое и нерастворимое состояние, завершается процесс образования сетчатой структуры, увеличивается плотность упаковки полимера [23–25].

Регулируя процесс структурообразования, можно изменить конечные свойства аминокформальдегидных смол, повлиять на процесс отверждения путем рационального подбора отверждающей системы. Подбор эффективной отверждающей системы позволит полнее провести процесс структурирования смолы, повысить физико-механические показатели покрытий, уменьшить количество свободного формальдегида, улучшить перерабатываемость [26–28].

## Результаты и обсуждение

Разработанный метод синтеза аминокформальдегидных смол, который производился при разном мольном соотношении меламина и карбамида к формальдегиду в пределах 1:1,8 ... 1:2,2. При этом количество модификатора-катализатора (модификатор-катализатор НЛ) варьировалось от 0,1 до 0,5 %. Рецептура аминокформальдегидных смол с разным мольным соотношением карбамида и меламина к формальдегиду и различным содержанием модификатора-катализатора приведена в табл. 1.

**Ход синтеза.** В емкость для подготовки конденсационного раствора загружается формалин и модификатор-катализатор, включается мешалка, затем загружается диэтиленгликоль, дистиллированная вода, меламин и включается обогрев. Нагрев продолжается до достижения температуры в реакторе до 92...95 °С. При этой температуре смесь выдерживается 30 мин. Затем через каждые 5 минут проверяется смешиваемость с водой. После достижения смешиваемости 1:1000 смесь охлаждается до температуры 85...88 °С. Добавляется карбамид и при температуре 85...88 °С выдерживается до смешиваемости с водой 1:2,0 ... 3,0. Смесь охлаждается до 20...25 °С, доводится pH до 9,5...10 и сливается в емкость для хранения [15, 22, 29].

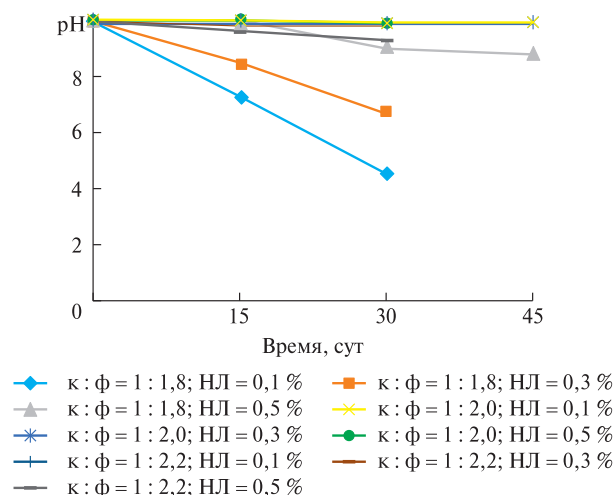
Процесс синтеза аминокформальдегидных смол идентичен для всех рецептов. Следует отметить, что у смол с мольным содержанием карбамида и меламина к формальдегиду (м+к:ф) = 1:1,8, этап от растворения меламина до наступления смешиваемости с водой 1:1000 значительно меньше, чем у смол с мольным соотношением карбамида и меламина к формальдегиду 1:2,0 и 1:2,2.

Т а б л и ц а 1

### Рецептура аминокформальдегидных смол в расчете на 1 т

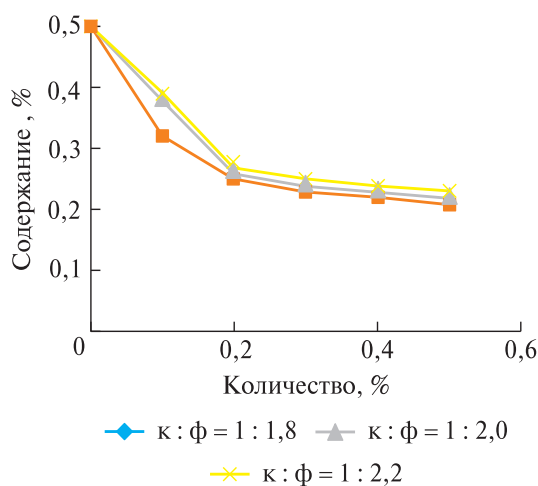
#### Formulation of aminoformaldehyde resins per 1 ton

Аминокформальдегидная смола		Наименование сырья						Едкий натр, 33%-й р-р, мас. ч.
		Меламин, мас. ч.	Формалин 37%-й р-р, мас. ч.	Карбамид, мас. ч.	Модификатор НЛ, мас. ч.	Диэтиленгликоль, мас. ч.	Дистиллированная вода, мас. ч.	
к+м:ф	НЛ, %							
1:1,8	0,1	200	520	120	1	10	152	До достижения необходимого значения pH после синтеза
1:1,8	0,3		520	120	3		148	
1:1,8	0,5		520	120	5		144	
1:2,0	0,1		600	120	1		70	
1:2,0	0,3		600	120	3		67	
1:2,0	0,5		600	120	5		65	
1:2,2	0,1		520	80	1		192	
1:2,2	0,3		520	80	3		188	
1:2,2	0,5		520	80	5		184	



**Рис. 1.** Зависимость мольного соотношения карбамида и меламина к формальдегиду и количества модификатора-катализатора НЛ от изменения аминокформальдегидной смолы во время хранения

**Fig. 1.** Dependence of the molar ratio of urea and melamine to formaldehyde and the amount of modifier-catalyst NL on the change of aminoformaldehyde resin during storage

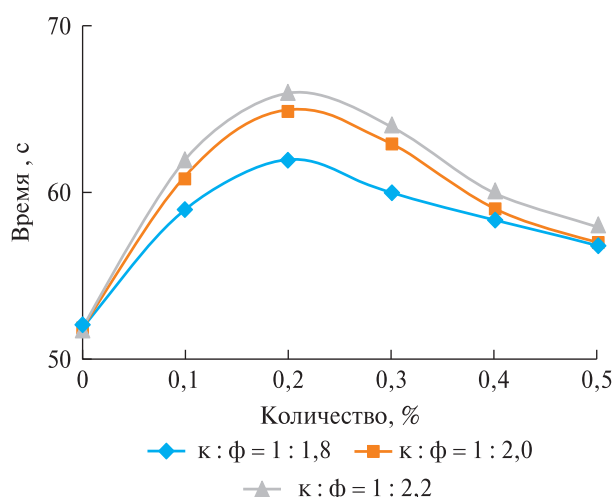


**Рис. 2.** Зависимость мольного соотношения карбамида и меламина к формальдегиду и количества модификатора-катализатора НЛ от содержания свободного формальдегида аминокформальдегидной смолы

**Fig. 2.** Dependence of the molar ratio of urea and melamine to formaldehyde and the amount of modifier-catalyst NL on the free formaldehyde content of aminoformaldehyde resin

В связи с тем что свойства свежеприготовленной аминокформальдегидной смолы в первые сутки хранения заметно изменяются, ее анализ целесообразнее производить через 24 ч с момента окончания синтеза [21, 22].

На рис. 1 представлены сравнительные зависимости, характеризующие влияние мольного соотношения карбамида и меламина к формальдегиду и количества модификатора-катализатора НЛ на изменение концентрации водородных ионов в



**Рис. 3.** Зависимость мольного соотношения карбамида и меламина к формальдегиду и количества модификатора-катализатора НЛ от изменения времени желатинизации аминокформальдегидной смолы

**Fig. 3.** Dependence of the molar ratio of urea and melamine to formaldehyde and the amount of modifier-catalyst NL on the change of gelatinisation time of aminoformaldehyde resin

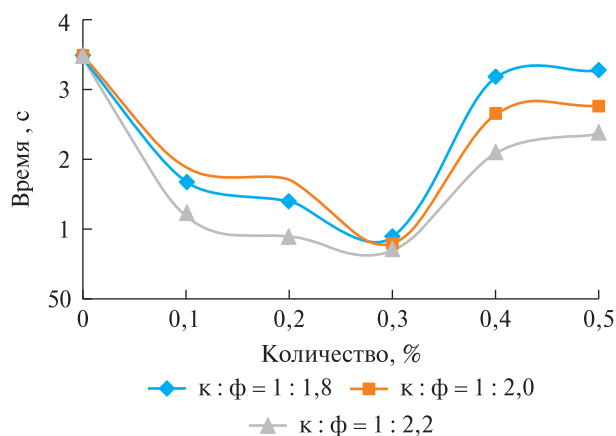
процессе хранения аминокформальдегидных смол. Полученные графические зависимости доказывают, что введение модификатора-катализатора НЛ на стадии синтеза позволяет стабилизировать изменение рН олигомера в процессе хранения.

Построены зависимости содержания свободного формальдегида от времени желатинизации аминокформальдегидных смол, изготовленных при разном мольном соотношении карбамида и меламина к формальдегиду от количества модификатора-катализатора НЛ. При определении времени желатинизации была использована стандартная методика определения времени желатинизации с отвердителем  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , рН смолы 9,8 [10, 30, 31] (рис. 2, 3).

Анализ свойств исследуемых аминокформальдегидных смол показал, что введение модификатора-катализатора НЛ позволяет провести синтез при постоянном значении рН, который приводит к снижению содержания свободного формальдегида, однако при этом сохраняется реакционная способность.

Опираясь на полученные зависимости, можно сделать вывод, что увеличение количества модификатора-катализатора НЛ свыше 0,5 % нецелесообразно, так как это не дает существенного снижения содержания свободного формальдегида и времени желатинизации.

Получены представлены данные о влиянии модификатора-катализатора НЛ на пенетрационную способность и поверхностное натяжение аминокформальдегидных смол, изготовленных при разном мольном соотношении карбамида и меламина к формальдегиду (рис. 4 и 5).



**Рис. 4.** Зависимость мольного соотношения карбамида и меламина к формальдегиду и количества модификатора-катализатора НЛ от пенетрационных свойств аминформальдегидной смолы

**Fig. 4.** Dependence of molar ratio of urea and melamine to formaldehyde and amount of modifier-catalyst NL on penetration properties of aminoformaldehyde resin

Влияние модификатора-катализатора НЛ на пенетрационную способность и поверхностное натяжение позволяет судить о способности аминформальдегидных смол смачивать и растекаться по бумажному полотну.

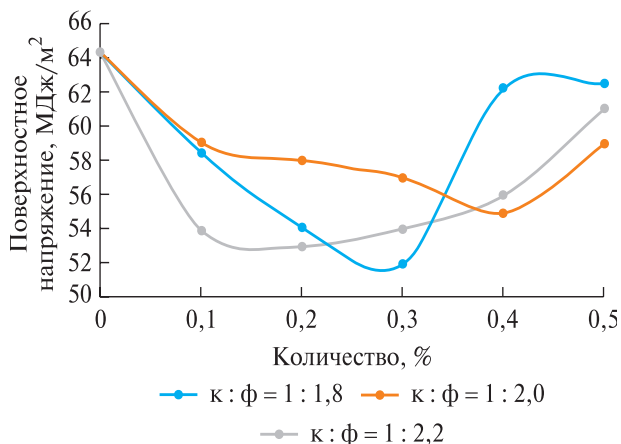
Пенетрационная способность аминформальдегидной смолы определялась на образцах бумаги размером 50×50 мм. Использовалась бумага фирмы Maza весом 80 г/м<sup>2</sup>. Поверхностное натяжение определяли по методу отрыва кольца [10, 21, 22].

Анализ рис. 4 и 5 показал, что модификатор-катализатор НЛ, вводимый в количестве от 0,1 до 0,5 %, повышает пенетрационную способность смолы, одновременно понижая ее поверхностное натяжение. Мольное соотношение карбамида и меламина к формальдегиду также оказывает влияние на поверхностное натяжение, что выражается в уменьшении поверхностного натяжения у аминформальдегидных смол с меньшим соотношением [10, 31, 32].

Из представленных на рис. 4 и 5 зависимостей видно, что увеличение количества модификатора-катализатора НЛ практически не влияет на время пенетрации аминформальдегидной смолы, но приводит к увеличению значения поверхностного натяжения, вероятно, связанное с тем, что увеличение количества модификатора-катализатора НЛ ведет к увеличению молекулярной массы, и, как следствие, увеличивается вязкость.

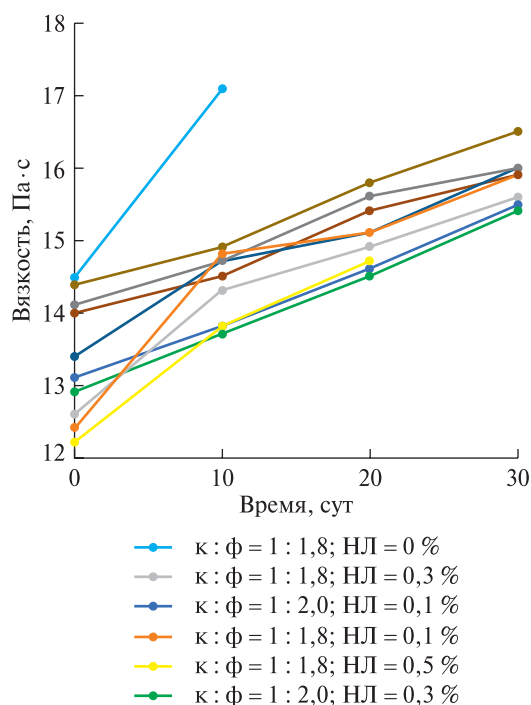
Эти выводы подтверждает рис. 6, на котором представлены зависимости изменения вязкости во времени.

Исследовано влияние количества меламина на синтез и свойства аминформальдегидных смол.



**Рис. 5.** Зависимость мольного соотношения карбамида и меламина к формальдегиду и количества модификатора-катализатора НЛ от поверхностного натяжения аминформальдегидной смолы

**Fig. 5.** Dependence of the molar ratio of urea and melamine to formaldehyde and the amount of modifier-catalyst NL on the surface tension of aminoformaldehyde resin



**Рис. 6.** Зависимость мольного соотношения карбамида и меламина к формальдегиду и количества модификатора-катализатора НЛ от вязкости аминформальдегидной смолы

**Fig. 6.** Dependence of the molar ratio of urea and melamine to formaldehyde and the amount of modifier-catalyst NL on the viscosity of aminoformaldehyde resin

Модифицирование аминформальдегидных смол модификатором-катализатором НЛ позволяет варьировать количеством меламина в пределах 20...30 % реакционной массы, сохраняя при этом физико-механические свойства смол.

Т а б л и ц а 2

**Свойства аминокрмальдегидных смол с разным количеством меламина****Properties of aminoformaldehyde resins with different amounts of melamine**

Свойства смол	Марка смолы			
	МФО-20	МФО-25	МФО-30	Базовый вариант
Содержание сухого остатка при температуре 105 °С, %	59	58	58	58 ± 1
Водородный показатель, ед. рН	9,9	9,8	9,9	9,0
Вязкость условная по ВЗ-4 при Т=20 °С, с	13,8	13,5	14,0	16,5
Смешиваемость смолы с водой, мл/мл	1:2,5	1:2,5	1:2,5	1:2
Содержание свободного формальдегида, %	0,25	0,3	0,2	0,5
Время пенетрации, с	1,5	1,8	1,6	4,8
Жизнеспособность смолы при температуре 5...23 °С, сут.	24	26	30	6...8

Т а б л и ц а 3

**Физико-химические показатели полученных бумажно-смоляных пленок****Physicochemical parameters of the obtained paper-resin films**

Пленка	Содержание летучих, %	Содержание смолы, %
Образец 1	4,49	57,36
Образец 2	3,86	54,07

Т а б л и ц а 4

**Физико-механические свойства древесно-стружечной плиты облицованной бумажно-смоляными пленками****Physico-mechanical properties of chip board faced with paper-resin films**

Наименование метода контроля	Время воздействия	Норма	Образец 1	Образец 2
Гидротермическая стойкость покрытия	1 ч	Допускаются незначительная потеря блеска, проявление структуры плиты-основы	Выдержано	Выдержано
Стойкость покрытия к истиранию по ГОСТ 27820, оборотов, не менее	–	Группа: «А» — не менее 65 «Б» — не нормируется «У» — не менее 100	97	73
Кислотный тест	10 мин	–	Норма	Норма

Т а б л и ц а 5

**Стойкость поверхности к пятнообразованию****Surface resistance to staining**

Наименование метода контроля	Время воздействия	Норма	Оценка, баллы	
			Образец 1	Образец 2
Вода дистиллированная	24 ч	Группа «А» и «У»: изменение внешнего вида покрытия не допускается. Группа «Б»: допускается незначительное изменение внешнего вида	1	1
Кофе (12 г/100 мл)			1	1
Спирт (96%-й)			1	1
Растительное масло			1	1
Бензин			1	2
Уксус (10%-й)			1	1
Хлорамин Б			1	1
Кофе (4 г/100 мл)			1	1
Чай (5 г/100 мл)			1	1
Лимонная кислота (10%-я)			1	2
Ацетон	10 мин		1	1

*Примечание.* 1 балл — отсутствие видимых изменений; 2 балла — едва заметное изменение блеска и цвета.



Проведена серия экспериментов синтеза аминокформальдегидных смол с различным содержанием меламина марок МФО-20, МФО-25, МФО-30. В качестве базового варианта представлена аминокформальдегидная смола марки МД с содержанием меламина 35 % (табл. 2). Анализ свойств исследуемых аминокформальдегидных смол показал, что введение модификатора-катализатора НЛ в количестве 1 % позволяет провести синтез с разным количеством меламина, но при одинаковом мольном соотношении, с помощью введения дополнительного карбамида и при постоянном значении рН.

Таким образом, можно сделать вывод, что введение модификатора-катализатора НЛ позволяет уменьшить количество меламина в аминокформальдегидной смоле, не ухудшая при этом ее основных физико-механических свойств.

Изготовлены бумажно-смоляные пленки с применением аминокформальдегидных смол марки МД (смола, синтезируемая на заводе, бралась в качестве базового варианта для сравнения) производства ООО «Метадинея», аминокформальдегидная смола марки МФО-20, декоративной бумаги производства компании «Schattdecor AG», массой 65 г/м.

#### Рецептура № 1 (образец 1)

1. Смола МД, кг.....	0,5
2. Отвердитель КС-30, кг.....	0,0015
3. Добавка ЛД, кг.....	0,0015
Время помутнения при температуре 100 °С, мин.....	4,02

#### Режимы пропитки

Температура в сушильной камере, °С.....	160
Время пропитки, мин.....	5

#### Рецептура № 2 (образец 2)

1. Смола МФО-20, кг.....	0,5
2. Отвердитель С-30У, кг.....	0,0035
3. Добавка ЛД, кг.....	0,0015
Время помутнения при температуре 100 °С, мин.....	4,05

#### Режимы пропитки

Температура в сушильной камере, °С.....	160
Время пропитки, мин.....	5

Образцы пленки были проанализированы по основным показателям качества (табл. 3).

Облицовывание древесно-стружечных плит (ДСтП) бумажно-смоляными пленками, изготовленными с применением смол марок МФ, МФО-20, проводилось на лабораторном прессе, предназначенном для контроля основных физико-механических свойств (табл. 4, 5). Использовали ДСтП толщиной 16 мм (производства компании «МК «Шатура») [31–36].

#### Режим облицовывания

Температура плит пресса, °С.....	195
Давление, МПа.....	47
Время прессования, с.....	30

## Выводы


Модифицирование аминокформальдегидных смол позволяет стабилизировать реакционную смесь на стадии с разным мольным соотношением меламина и карбамида к формальдегиду, а также приводит к улучшению основных технологических свойств и увеличению срока хранения аминокформальдегидных смол. Облицованные ДСтП, полученные на основе синтезируемых аминокформальдегидных смол, удовлетворяют европейским стандартам EN как нетоксичные ДСтП.

## Список литературы

- [1] Волынский В.Н. Технология древесных плит и композиционных материалов. СПб.: Лань, 2010. 336 с.
- [2] Нестеренко Е.А. Система автоматизированного управления процессом прессования стружечных брикетов в производстве древесностружечных плит // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика, 2017. Т. 5. № 4 (30). С. 66–68.
- [3] Tsvetkov V.E., Zueva M.Y. Synthesis and properties of modified melamine formaldehyde impregnating oligomers // Polymer Science, Series D, 2011, t. 4, no. 3, pp. 164–166.
- [4] Yanyang C., Malysheva G.V. Optimization of the curing modes of three-layer honeycomb panels // J. of physics: conference series. Advances in Composites Science and Technologies 2020, ACST 2020, t. 1990, 2021, p. 012074.
- [5] Амирасланова М.Н. Пути практического применения аминокформальдегидных смол // Пластические массы, 2018. № 1–2. С. 44–48.
- [6] Романов Н.М. Современное состояние исследований меламинаминокформальдегидных смол // Пластические массы, 2004. № 2. С. 3–11.
- [7] Цветков В.Е., Зуева М.Ю. Способ изготовления пропиточных олигомеров. Пат. RU 2535226 от 09.10.2014.
- [8] Криворотова А.И., Усольцев О.А. Применение модифицированного связующего для изготовления низкотоксичных древесностружечных плит // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика, 2015. Т. 3. № 2–2 (13–2). С. 427–430.
- [9] Ekimova M.Y., Tsvetkov V.E., Machneva O.P. Aminoformaldehyde oligomers modified with salts of polyfunctional acids // Polymer Science, Series D, 2021, t. 14, no. 1, pp. 13–16.
- [10] Зуева М.Ю. Ламинирование древесностружечных плит текстурными бумагами, пропитанными меламинакарбамидоформальдегидными олигомерами: дис. ... канд. техн. наук. Москва, МГУЛ, 2012.
- [11] Machneva O.P., Tsvetkov V.E., Ekimova M.Y. Polyatomic alcohols as urea-formaldehyde resin modifiers // Polymer Science, Series D, 2019, t. 12, no. 2, pp. 124–127.
- [12] Соколова Е.Г., Варанкина Г.С., Русаков Д.С. Карбамидомеламинаминокформальдегидная смола для получения водостойкой фанеры // Клеи. Герметики. Технологии, 2022. № 2. С. 39–43.
- [13] Тимошина Ю.А., Вознесенский Э.Ф., Островская А.В., Латфуллин И.И. Применение модифицированных аминосмол и ННТП-обработки для повышения адгезионной прочности композиционных материалов на основе полиамидных волокон // Дизайн. Материалы. Технология, 2019. № 2 (54). С. 48–50.

- [14] Цветков В.Е., Цветкова Н.Н., Разуваева М.В., Мачнева О.П., Зуева М.Ю., Мачнева Н.А., Мачнев А.П., Колчев В.И. Способ изготовления карбамидоформальдегидного олигомера. Пат. RU 2527786 С1, 10.09.2014. Заявка № 2013119163/05 от 25.04.2013.
- [15] ГОСТ 23234–78. Плиты древесностружечные. Метод определения удельного сопротивления нормальному отрыву наружного слоя. М.: Изд-во стандартов, 1988. 3 с.
- [16] Lyakhov E.Y., Zorin V.A. The Influence of Technological Modes on the Quality of Coatings Made of Powder Polymer-Composite Materials // *Polymer. Sci. Ser. D*, 2023, v. 16, pp. 89–93.
- [17] Sokolova E.G., Rusakov D.S., Chubinsky A.N., Varankina G.S., Ugryumov S.A. A study of the properties of melamine–carbamide–formaldehyde resins modified with lignosulphonates // *Polymer Science, Series D*, 2021, t. 14, no. 4, pp. 508–512.
- [18] Цветков В.Е., Зуева М.Ю. Способ изготовления пропиточных олигомеров. Пат. RU 2446193 С1, 27.03.2012. Заявка № 2010139821/05 от 29.09.2010.
- [19] Sokolova E.G., Rusakov D.S., Chubinskiy A.N., Varankina G.S., Ugryumov S.A. Evaluation of the operational characteristics of modified synthetic resins and plywood on their basis // *Polymer Science, Series D*, 2021, t. 14, no. 2, pp. 164–168.
- [20] Азаров В.И., Цветков В.Е. Технология связующих и полимерных материалов. М.: Лесная промышленность, 1985. 216 с.
- [21] Пасько Ю.В. Учебно-методическое пособие технология и применение полимеров в деревообработке. М.: МГУЛ, 2015. 36 с.
- [22] Екимова М.Ю., Цветков В.Е., Мачнева О.П. Аминоформальдегидные олигомеры, модифицированные солями полифункциональных кислот // *Клеи. Герметики. Технологии*, 2020. № 6. С. 37–40.
- [23] Цветков В.Е., Зуева М.Ю., Мачнева О.П., Разуваева М.В., Екимова И.А., Екимов Н.Ю., Балюков В.В., Фахретдинов Х.А., Карпова Т.Н. Способ изготовления карбамидоформальдегидного олигомера. Пат. RU 2534550 С1, 27.11.2014. Заявка № 2013119174/05 от 25.04.2013.
- [24] Цветков В.Е., Зуева М.Ю., Мачнева О.П., Разуваева М.В., Екимова И.А., Екимов Н.Ю., Балюков В.В., Фахретдинов Х.А. Способ изготовления пропиточных олигомеров. Пат. RU 2535226 С1, 10.12.2014. Заявка № 2013119171/05 от 25.04.2013.
- [25] ГОСТ 10633–78. Плиты древесностружечные. Методы испытания. Взамен ГОСТ 10633–73; Введ. 01.01.80 до 01.01.90. М.: Изд-во стандартов, 1988. 5 с.
- [26] Екимова М.Ю. Аминоформальдегидные смолы в производстве облицованных древесно-стружечных плит. Уфа: Аэтерна, 2023. 128 с.
- [27] Цветков В.Е. Учебно-методическое пособие технология и применение полимеров в деревообработке. М.: МГУЛ, 2015. 36 с.
- [28] ГОСТ Р 52078–2003. Плиты древесностружечные, облицованные пленками на основе термореактивных полимеров. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2003. Введ. 01.01.2004. 18 с.
- [29] ГОСТ 10634–88. Плиты древесностружечные. Методы испытания. Взамен ГОСТ 10634–78. Введ. 01.01.90 до 01.01.95. М.: Изд-во стандартов, 1989. 5 с.
- [30] ГОСТ 10635–88. Плиты древесностружечные. Методы определения предела прочности и модуля упругости при изгибе. Взамен ГОСТ 10635–78; Введ. 01.01.90 до 01.01.95. М.: Изд-во стандартов, 1989. 5 с.
- [31] ГОСТ 10636–90. Плиты древесностружечные. Метод определения предела прочности при растяжении перпендикулярно пласти плиты. Взамен ГОСТ 10636–78. Введ. 01.01.91 до 01.01.96. М.: Изд-во стандартов, 1990. 6 с.
- [32] Сацура В.М., Баженов В.А., Карасев Е.И., Махарадзе Н.И. Нагревательная плита для изготовления древесностружечных плит. А.С. SU 683909 А1, 05.09.1979. Заявка № 2596064 от 30.03.1978.
- [33] Tsvetkov V.E., Machneva O.P., Ekimova M.Y. Obtaining lined environmentally friendly wood-based panels // *J. of Physics: Conference Series. Ser. Advances in Composites Science and Technologies 2020, ACST 2020*, v. 2021, p. 012073.
- [34] Мачнева О.П., Цветков В.Е., Екимова М.Ю. Многоатомные спирты как модификаторы карбамидоформальдегидных смол // *Клеи. Герметики. Технологии*, 2018. № 12. С. 15–18.
- [35] Кочева М.Н., Цыгарова М.В. Исследование факторов, влияющих на качество поверхности древесностружечных плит по дефектам в ООО Промышленный комбинат древесных плит // *Актуальные проблемы развития лесного комплекса: Матер. Междунар. науч.-техн. конф. Министерство образования и науки РФ, Правительство Вологодской области, Вологодский государственный университет, Департамент лесного комплекса Вологодской области*, 2015. С. 101–103.
- [36] Tsvetkov V.E., Nikitin A.A., Semochkin Y.A., Tsvetkova N.N., Machneva O.P. Properties of composites based on melamine–formaldehyde binding agents // *Polymer Science, Series D*, 2022, t. 15, no. 1, pp. 49–53.

## Сведения об авторах

**Екимова Мария Юрьевна**  — канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Научно-испытательного центра 4-го Государственного центрального межвидового полигона Министерства обороны Российской Федерации, mashula111@yandex.ru

**Цветков Вячеслав Ефимович** — д-р техн. наук, академик РАЕН, профессор ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал)

Поступила в редакцию 17.05.2023.

Одобрено после рецензирования 28.06.2023.

Принята к публикации 22.03.2024.

# SYNTHESIS AND PROPERTIES OF MODIFIED AMINOFORMALDEHYDE RESINS

M.Y. Ekimova<sup>1</sup>✉, V.E. Tsvetkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Research and Testing Center 4 of the State Central Interspecific Landfill of the Ministry of Defense of the Russian Federation, 1, Korolev st., 416550, Znamensk, Astrakhan reg., Russia

<sup>2</sup>BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

mashula111@yandex.ru

The article presents a method for the synthesis of impregnated modified aminoformaldehyde resins, a distinctive feature of which is the production of resins by alkaline-free catalysis, due to the introduction of a catalyst modifier based on salts of polyfunctional acids, which allows improving the physico-mechanical properties of resins, as well as to reduce the amount of expensive melamine. The synthesis of aminoformaldehyde resins with different molar ratios of melamine and urea to formaldehyde is described in detail by stages, the formulations of resins are given. The presented graphical dependences of the properties of the studied resins clearly show that the introduction of a catalyst modifier allows synthesis at a constant pH value, which leads to a decrease in the content of free formaldehyde, but at the same time the reactivity is preserved. The data on such properties as viscosity, penetration ability, surface tension of the modified aminoformaldehyde resins obtained are also presented. Modification of aminoformaldehyde resins leads to an improvement in the basic technological properties and an increase in their shelf life.

**Keywords:** aminoformaldehyde resins, modification, alkali-free catalysis, melamine

**Suggested citation:** Ekimova M.Yu., Tsvetkov V.E. *Sintez i svoystva modifitsirovannykh aminoformal'degidnykh smol* [Synthesis and properties of modified aminoformaldehyde resins]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 3, pp. 124–132. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-124-132

## References

- [1] Volynskiy V.N. *Tekhnologiya drevesnykh plit i kompozitsionnykh materialov* [Technology of wood boards and composite materials]. St. Petersburg: Lan', 2010, 336 p.
- [2] Nesterenko E.A. *Sistema avtomatizirovannogo upravleniya protsessom pressovaniya struzhechnykh briketov v proizvodstve drevesnostruzhechnykh plit* [Automated control system for the process of pressing chip briquettes in the production of particle boards]. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice], 2017, v. 5, no. 4 (30), pp. 66–68.
- [3] Tsvetkov V.E., Zueva M.Y. Synthesis and properties of modified melamine formaldehyde impregnating oligomers. *Polymer Science, Series D*, 2011, t. 4, no. 3, pp. 164–166.
- [4] Yanyang C., Malysheva G.V. Optimization of the curing modes of three-layer honeycomb panels. *J. of physics: conference series. Advances in Composites Science and Technologies 2020, ACST 2020*, t. 1990, 2021, p. 012074.
- [5] Amiraslanova M.N. *Puti prakticheskogo primeneniya aminoformal'degidnykh smol* [Ways of practical application of aminoformaldehyde resins]. *Plasticheskie massy* [Plastic masses], 2018, no. 1–2, pp. 44–48.
- [6] Romanov N.M. *Sovremennoe sostoyanie issledovaniy melaminoformal'degidnykh smol* [Current state of research on melamine-formaldehyde resins]. *Plasticheskie massy* [Plastic masses], 2004, no. 2, pp. 3–11.
- [7] Tsvetkov V.E., Zueva M.Yu. *Sposob izgotovleniya propitochnykh oligomerov* [Method for producing impregnating oligomers]. Pat. RU 2535226 dated 10/09/2014.
- [8] Krivorotova A.I., Usol'tsev O.A. *Primenenie modifitsirovannogo svyazuyushchego dlya izgotovleniya nizkotoksichnykh drevesnostruzhechnykh plit* [Application of a modified binder for the production of low-toxic particle boards]. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice], 2015, v. 3, no. 2–2 (13–2), pp. 427–430.
- [9] Ekimova M.Y., Tsvetkov V.E., Machneva O.P. Aminoformaldehyde oligomers modified with salts of polyfunctional acids. *Polymer Science, Series D*, 2021, t. 14, no. 1, pp. 13–16.
- [10] Zueva M.Yu. *Laminirovanie drevesnostruzhechnykh plit teksturnymi bumagami, propitannymi melaminokarbamidoformal'degidnymi oligomerami* [Lamination of particle boards with textured papers impregnated with melamine-urea-formaldehyde oligomers]. *Dis.Cand. Sci. (Tech.)*. Moscow, MSUL, 2012.
- [11] Machneva O.P., Tsvetkov V.E., Ekimova M.Y. Polyatomic alcohols as urea-formaldehyde resin modifiers. *Polymer Science, Series D*, 2019, t. 12, no. 2, pp. 124–127.
- [12] Sokolova E.G., Varankina G.S., Rusakov D.S. *Karbamidomelaminoformal'degidnaya smola dlya polucheniya vodostoykoy fanery* [Urea-melamine-formaldehyde resin for producing waterproof plywood]. *Klei. Germetiki. Tekhnologii* [Adhesives. Sealants. Technologies], 2022, no. 2, pp. 39–43.
- [13] Timoshina Yu.A., Voznesenskiy E.F., Ostrovskaya A.V., Latfullin I.I. *Primenenie modifitsirovannykh aminosmol i NNTP-obrabotki dlya povysheniya adgezionnoy prochnosti kompozitsionnykh materialov na osnove poliamidnykh volokon* [Application of modified amino resins and NNTP treatment to increase the adhesive strength of composite materials based on polyamide fibers]. *Dizayn. Materialy. Tekhnologiya* [Design. Materials. Technology], 2019, no. 2 (54), pp. 48–50.
- [14] Tsvetkov V.E., Tsvetkova N.N., Razuvaeva M.V., Machneva O.P., Zueva M.Yu., Machneva N.A., Machnev A.P., Kolchev V.I. *Sposob izgotovleniya karbamidoformal'degidnogo oligomera* [Method for producing urea-formaldehyde oligomer]. Pat. RU 2527786 C1, 09/10/2014. Application No. 2013119163/05 dated 04/25/2013.
- [15] GOST 23234–78 *Plity drevesnostruzhechnye. Metod opredeleniya udel'nogo soprotivleniya normal'nomu otrывu naruzhnogo sloya* [Particle boards. Method for determining the specific resistance to normal tearing of the outer layer]. Moscow: Publishing house of standards, 1988, 3 p.

- [16] Lyakhov E.Y., Zorin V.A. The Influence of Technological Modes on the Quality of Coatings Made of Powder Polymer-Composite Materials. *Polymer. Sci. Ser. D*, 2023, v. 16, pp. 89–93.
- [17] Sokolova E.G., Rusakov D.S., Chubinsky A.N., Varankina G.S., Ugryumov S.A. A study of the properties of melamine–carbamide–formaldehyde resins modified with lignosulphonates. *Polymer Science, Series D*, 2021, t. 14, no. 4, pp. 508–512.
- [18] Tsvetkov V.E., Zueva M.Yu. *Sposob izgotovleniya propitochnykh oligomerov* [Method for producing impregnating oligomers]. Pat. RU 2446193 C1, 03/27/2012. Application No. 2010139821/05 dated 09.29.2010.
- [19] Sokolova E.G., Rusakov D.S., Chubinskii A.N., Varankina G.S., Ugryumov S.A. Evaluation of the operational characteristics of modified synthetic resins and plywood on their basis. *Polymer Science, Series D*, 2021, t. 14, no. 2, pp. 164–168.
- [20] Azarov V.I., Tsvetkov V.E. *Tekhnologiya svyazuyushchikh i polimernykh materialov* [Technology of binders and polymer materials]. Moscow: Lesnaya prom, 1985, 216 p.
- [21] Pas'ko Yu.V. *Uchebno-metodicheskoe posobie tekhnologiya i primeneniye polimerov v derevoobrabotke* [Educational and methodological manual technology and application of polymers in woodworking]. Moscow: MGUL, 2015, 36 p.
- [22] Ekimova M.Yu., Tsvetkov V.E., Machneva O.P. *Aminoformal'degidnye oligomery, modifitsirovannyye solyami polifunktsional'nykh kislot* [Amino-formaldehyde oligomers modified with salts of polyfunctional acids]. *Klei. Germetiki. Tekhnologii* [Adhesives. Sealants. Technologies], 2020, no. 6, pp. 37–40.
- [23] Tsvetkov V.E., Zueva M.Yu., Machneva O.P., Razuvaeva M.V., Ekimova I.A., Ekimov N.Yu., Balyukov V.V., Fakhretidinov Kh.A., Karpova T.N. *Sposob izgotovleniya karbamidoformal'degidnogo oligomera* [Method for producing urea-formaldehyde oligomer]. Pat. RU 2534550 C1, 11/27/2014. Application No. 2013119174/05 dated 04/25/2013.
- [24] Tsvetkov V.E., Zueva M.Yu., Machneva O.P., Razuvaeva M.V., Ekimova I.A., Ekimov N.Yu., Balyukov V.V., Fakhretidinov Kh.A. *Sposob izgotovleniya propitochnykh oligomerov* [Method for producing impregnating oligomers]. Pat. RU 2535226 C1, 12/10/2014. Application No. 2013119171/05 dated 04/25/2013.
- [25] GOST 10633–78 *Plity drevesnostruzhechnye. Metody ispytaniya* [Particle boards. Test methods. Instead of GOST 10633–73]. Enter. 01/01/80 to 01/01/90. Moscow: Publishing house of standards, 1988, 5 p.
- [26] Ekimova M.Yu. *Aminoformal'degidnye smoly v proizvodstve oblitsovannykh drevesno-struzhechnykh plit* [Amino-formaldehyde resins in the production of veneered particle boards]. Ufa: Aeterna, 2023, 128 p.
- [27] Tsvetkov V.E. *Uchebno-metodicheskoe posobie tekhnologiya i primeneniye polimerov v derevoobrabotke* [Educational and methodological manual technology and application of polymers in woodworking]. Moscow: MGUL, 2015, 36 p.
- [28] GOST R 52078–2003 *Plity drevesnostruzhechnye, oblitsovannyye plenkami na osnove termoreaktivnykh polimerov* [Particle boards lined with films based on thermosetting polymers. Technical conditions]. Moscow: Standards Publishing House, 2003, 18 p.
- [29] GOST 10634–88 *Plity drevesnostruzhechnye. Metody ispytaniya* [Particle boards. Test methods]. Instead of GOST 10634–78. Enter. 01/01/90 to 01/01/95. Moscow: Publishing house of standards, 1989, 5 p.
- [30] GOST 10635–88 *Plity drevesnostruzhechnye. Metody opredeleniya predela prochnosti i modulya uprugosti pri izgibe* [Particle boards. Methods for determining the tensile strength and elastic modulus in bending]. Instead of GOST 10635–78; Enter. 01/01/90 to 01/01/95. Moscow: Publishing house of standards, 1989, 5 p.
- [31] GOST 10636–90 *Plity drevesnostruzhechnye. Metod opredeleniya predela prochnosti pri rastyazhenii perpendikulyarno plasti plity* [Particle boards. Method for determining the tensile strength perpendicular to the plate face]. Instead of GOST 10636–78. Enter. 01/01/91 to 01/01/96. Moscow: Standards Publishing House, 1990, 6 p.
- [32] Satsura V.M., Bazhenov V.A., Karasev E.I., Makharadze N.I. *Nagrevatel'naya plita dlya izgotovleniya drevesnostruzhechnykh plit* [Heating plate for the production of particle boards]. A.S. SU 683909 A1, 09/05/1979. Application No. 2596064 dated March 30, 1978.
- [33] Tsvetkov V.E., Machneva O.P., Ekimova M.Y. Obtaining lined environmentally friendly wood-based panels. *J. of Physics: Conference Series. Cep. Advances in Composites Science and Technologies 2020, ACST 2020*, v. 2021, p. 012073.
- [34] Machneva O.P., Tsvetkov V.E., Ekimova M.Yu. *Mnogoatomnye spirty kak modifikatory karbamidoformal'degidnykh smol* [Polyhydric alcohols as modifiers of urea-formaldehyde resins]. *Klei. Germetiki. Tekhnologii* [Adhesives. Sealants. Technologies], 2018, no. 12, pp. 15–18.
- [35] Kocheva M.N., Tsygarova M.V. *Issledovanie faktorov, vliyayushchikh na kachestvo poverkhnosti drevesnostruzhechnykh plit po defektam v OOO Promyshlennyy kombinat drevesnykh plit* [Study of factors influencing the quality of the surface of particle boards based on defects in LLC Industrial Plant of Wood Boards]. Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa: mater. Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Ministerstvo obrazovaniya i nauki RF, Pravitel'stvo Vologodskoy oblasti, Vologodskiy gosudarstvennyy universitet, Departament lesnogo kompleksa Vologodskoy oblasti [Current problems of the development of the forestry complex: material. International scientific and technical conference. Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Government of the Vologda Region, Vologda State University, Department of Forestry of the Vologda Region], 2015, pp. 101–103.
- [36] Tsvetkov V.E., Nikitin A.A., Semochkin Y.A., Tsvetkova N.N., Machneva O.P. Properties of composites based on melamine–formaldehyde binding agents. *Polymer Science, Series D*, 2022, t. 15, no. 1, pp. 49–53.

## Authors' information

**Ekimova Mariya Yur'evna**✉ — Cand. Sci. (Tech.), Senior Researcher at the Research and Testing Center of the 4th State Central Interspecific Landfill of the Ministry of Defense of the Russian Federation, mashula111@yandex.ru

**Tsvetkov Vyacheslav Efimovich** — Dr. Sci. (Tech.), Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor of the BMSTU (Mytishchi branch)

Received 17.05.2023.

Approved after review 28.06.2023.

Accepted for publication 22.03.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
 Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
 Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article  
 The authors declare that there is no conflict of interest

## ОБРАБОТКА И ПРОГНОЗ ДАННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОГО РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА

О.М. Полещук✉, Е.Г. Комаров, Н.Г. Поярков

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Россия, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

polshchuk@mgul.ac.ru

Представлены показатели качества нечетких регрессионных моделей, предназначенных для исследования зависимостей между качественными характеристиками образовательного процесса и для прогноза их значений, а также модель распознавания нечетких значений выходных характеристик регрессий. Приведен алгоритм выбора нечеткой регрессионной модели из линейной и нелинейной моделей на основе показателей их качества. Проведен анализ степеней влияния входных характеристик на выходную характеристику. Построена нечеткая регрессионная модель для прогноза успешности защиты диссертации при поступлении соискателя в аспирантуру и для исследования зависимостей между входными характеристиками соискателя и выходной характеристикой. Альтернативный подход к построению регрессионных моделей на основе нечисловых данных образовательного процесса позволяет не накладывать некорректные условия на исходные данные, считая их значениями случайных величин, и не использовать некорректные арифметические операции для элементов порядковых шкал.

**Ключевые слова:** образовательный процесс, нечеткая информация, нечеткая регрессионная модель, лингвистическая переменная

**Ссылка для цитирования:** Полещук О.М., Комаров Е.Г., Поярков Н.Г. Обработка и прогноз данных образовательного процесса на основе нечеткого регрессионного анализа // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 3. С. 133–140. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-133-140

Многолетние исследования показали, что для обработки данных образовательного процесса, их анализа и прогноза недостаточно применения классических математических методов, поскольку они учитывают только неопределенность случайного характера и не учитывают нечеткость, которая появляется вследствие активного влияния человеческого фактора на процессы оценивания и управления [1–7].

Этап формализации полученной информации при моделировании процессов сферы образования имеет существенное значение и позволяет в дальнейшем применять адекватный математический аппарат для ее анализа. Если полученные данные объективно не являются значениями случайных величин, то очевидно, что исследователи будут искать альтернативные методы их формализации и обработки.

Соответственно, продолжая применять для анализа и прогноза характеристик образовательного процесса методы классического регрессионного анализа, мы априори закладываем ошибки, которые только накапливаются, начиная от этапа формализации и заканчивая этапом распознавания выходных данных.

Для того чтобы избежать накопления ошибок, исследователи на этапе формализации стали использовать нечеткие множества и лингвистические переменные, тем самым моделируя мыслительную деятельность лиц, выполняющих оценку характеристик, и учитывая субъективную составляющую в полученных данных [8–19].

Использование лингвистических переменных исключило некорректность операций с элементами порядковых шкал, которые традиционно использовались для оценки качественных (нечисловых) характеристик образовательного процесса. Поскольку большинство оцениваемых характеристик является качественным, то значение лингвистических переменных на этапе формализации достаточно велико. Альтернативный подход к формализации данных образовательного процесса обусловил развитие нечеткого регрессионного анализа и расширил его практическое использование не только в образовании, но и в других областях деятельности человека [20–28].

Разработка линейных и нелинейных нечетких регрессионных моделей не устранила пробелы, возникающие при выборе моделей, оценке их качества, распознавании выходной информации и практическом применении нечетких регрессионных моделей при решении задач образовательного процесса.

## Цель работы

Цель работы — разработка показателей качества нечетких регрессионных моделей, алгоритма выбора вида регрессионной модели и модели распознавания выходных нечетких данных.

## Основные понятия и определения

Нечетким числом  $\tilde{A}$  называется множество пар вида  $\{(x, \mu_A(x)) : x \in X\}$ , при этом значение функции принадлежности  $\mu_A(x)$  называется степенью принадлежности  $x$  к  $\tilde{A}$ ,  $R$  — подмножество действительной прямой,  $\mu_A(x) : R \rightarrow [0, 1]$  [29].

Непрерывным нечетким числом называется нечеткое число с непрерывной функцией принадлежности. Дискретным нечетким числом называется нечеткое число с дискретной функцией принадлежности.

Лингвистической переменной называется множество  $\{X, T(X), U, V, S\}$ , где  $X$  — название переменной;  $T(X) = \{X_l, l = 1, m\}$  — терм-множество переменной  $X$  или множество термов или названий лингвистических значений переменной  $X$ ;  $V$  — синтаксическое правило, порождающее названия значений лингвистической переменной  $X$ ;  $S$  — семантическое правило, которое ставит в соответствие каждому терму из множества  $T(X)$  нечеткое подмножество универсального множества  $U$  [1].

В работе [30] дано определение агрегирующего отрезка  $[c_1, c_2]$  для нечеткого числа  $\tilde{A} = (a_1, a_2, a_L, a_R)$ :

$$c_1 = \int_0^1 \frac{2a_1 - (1-\alpha)a_L}{2} 2\alpha d\alpha = a_1 - \frac{1}{6}a_L,$$

$$c_2 = \int_0^1 \frac{2a_1 - (1-\alpha)a_R}{2} 2\alpha d\alpha = a_1 - \frac{1}{6}a_R.$$

В работе [10] определено расстояние  $\rho(\tilde{A}, \tilde{B})$  между нечеткими числами  $\tilde{A} = (a_1, a_2, a_L, a_R)$ ,  $\tilde{B} = (b_1, b_2, b_L, b_R)$  на основе их агрегирующих отрезков  $[c_1, c_2]$ ,  $[d_1, d_2]$

$$\rho(\tilde{A}, \tilde{B}) = \sqrt{(c_1 - d_1)^2 + (c_2 - d_2)^2}.$$

Наиболее известными и широко применяемыми нечеткими регрессионными моделями являются линейная и нелинейная регрессионные модели.

Линейная нечеткая регрессионная модель для нечетких множеств имеет следующий вид [31]

$$\tilde{Y} = \tilde{a}_0 + \tilde{a}_1 \tilde{X}_1 + \dots + \tilde{a}_n \tilde{X}_n.$$

Входными и выходными данными модели являются нечеткие числа. Предполагается, что неизвестные коэффициенты регрессионной модели являются треугольными нечеткими числами, которые определяются тремя параметрами. Первый параметр — абсцисса вершины треугольника,

второй и третий параметры соответственно длины левого и правого крыльев треугольника.

Нелинейная нечеткая регрессионная модель для нечетких множеств имеет следующий вид [27]

$$\begin{aligned} \tilde{Y} = & \tilde{a}_0 + \tilde{a}_1 \tilde{X}_1^2 + \dots + \tilde{a}_m \tilde{X}_m^2 + \\ & + \tilde{a}_{m+1} \tilde{X}_1 \tilde{X}_2 + \dots + \tilde{a}_{mm} \tilde{X}_{m-1} \tilde{X}_m + \\ & + \tilde{a}_{m(m+1)} \tilde{X}_1 + \dots + \tilde{a}_{m(m+1)} \tilde{X}_m. \end{aligned}$$

Предполагается, что неизвестные коэффициенты нелинейной регрессионной модели являются треугольными нечеткими числами.

## Постановка задачи и ее решение

При прогнозе значений нечисловых характеристик образовательного процесса на основе нечеткого регрессионного анализа существенное значение имеет качество построенной модели. В классическом регрессионном анализе числовыми показателями качества регрессионной модели служат коэффициент детерминации  $R^2$  и стандартная ошибка  $S$  [32]

$$R^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (y_{jm} - \bar{y})^2}{\sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2},$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-m-1} \sum_{j=1}^n (y_j - y_{jm})^2},$$

где  $y_j, j = \overline{1, n}$  — исходные выходные данные;

$y_{jm}, j = \overline{1, n}$  — модельные выходные данные,

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j.$$

Для нечетких регрессионных моделей определим аналоги коэффициента детерминации и стандартной ошибки, используя агрегирующие отрезки нечетких данных [33, 34].

Обозначим через  $[y_{1j}, y_{2j}], j = \overline{1, n}$  агрегирующие отрезки исходных выходных нечетких чисел  $\tilde{Y}_j, j = \overline{1, n}$ , через  $[y_{1mj}, y_{2mj}], j = \overline{1, n}$  агрегирующие отрезки модельных выходных нечетких чисел  $\tilde{Y}_{jm}, j = \overline{1, n}$ , через  $[y_1, y_2]$  агрегирующий отрезок среднего исходного значения  $\tilde{Y}$ , через  $\rho(\tilde{Y}_j, \tilde{Y}_{jm}) = \sqrt{(y_{1j} - y_{1mj})^2 + (y_{2j} - y_{2mj})^2}$  расстояние между исходными и модельными выходными нечеткими числами, через  $\rho(\tilde{Y}_i, \tilde{Y}) = \sqrt{(y_{1i} - y_1)^2 + (y_{2i} - y_2)^2}$  расстояние между исходным выходным нечетким числом и средним исходным выходным нечетким числом, через  $\rho(\tilde{Y}_{jm}, \tilde{Y}) = \sqrt{(y_{1mj} - y_1)^2 + (y_{2mj} - y_2)^2}$

расстояние между модельным выходным и средним исходным выходным нечеткими числами. Тогда аналогами коэффициента детерминации и стандартной ошибки соответственно назовем следующие величины

$$\hat{R}^2 = \frac{\sum_{j=1}^n \rho^2(\tilde{Y}_{jm}, \tilde{Y})}{\sum_{j=1}^n \rho^2(\tilde{Y}_j, \tilde{Y})},$$

$$\hat{S} = \sqrt{\frac{1}{n-m-1} \sum_{j=1}^n \rho^2(\tilde{Y}_j, \tilde{Y}_{jm})}.$$

Определенные показатели качества нечетких регрессионных моделей позволяют выбирать между линейной и нелинейной моделью в пользу той, у которой показатели лучше.

Пусть  $Y$  — выходная качественная характеристика, формализованная в виде лингвистической переменной  $\tilde{Y}$  со значениями  $\tilde{Y}_l = (a_{l1}, a_{l2}, a_{lL}, a_{lR})$ ,  $l = 1, p$ , соответствующими уровням  $Y_l$ ,  $l = 1, p$  шкалы, используемой для ее оценки,  $\tilde{X}_i$ ,  $i = 1, m$  — формализованные с помощью лингвистических переменных входные характеристики.

При получении выходного нечеткого числа  $\tilde{Y}_m = (y_1, y_2, y_L, y_R)$  регрессионной модели возникает проблема его распознавания [35].

Поскольку выходная характеристика является качественной (нечисловой), то необходимо выходную информацию идентифицировать с одним из лингвистических значений  $Y_l$ ,  $l = 1, p$ , формализованных с помощью нечетких чисел  $\tilde{Y}_l = (a_{l1}, a_{l2}, a_{lL}, a_{lR})$ ,  $l = 1, p$ . Таким образом, нечеткое число  $\tilde{Y}_m = (y_1, y_2, y_L, y_R)$  необходимо идентифицировать с одним из нечетких чисел  $\tilde{Y}_l = (a_{l1}, a_{l2}, a_{lL}, a_{lR})$ ,  $l = 1, p$ . Для этого найдем агрегирующие отрезки  $[y_{1m}, y_{2m}]$ ,  $[y_{1l}, y_{2l}]$ ,  $l = 1, p$  нечетких чисел  $\tilde{Y}_m$ ,  $\tilde{Y}_l$ ,  $l = 1, p$  и расстояния

$$\rho(\tilde{Y}_m, \tilde{Y}_l) = \sqrt{(y_{1m} - y_{1l})^2 + (y_{2m} - y_{2l})^2}, l = 1, p.$$

Если  $\rho(\tilde{Y}_m, \tilde{Y}_k) = \min \rho(\tilde{Y}_m, \tilde{Y}_l)$ ,  $l = 1, p$ , то выходное значение регрессионной модели  $\tilde{Y}_m$  идентифицируется со значением  $Y_k$  характеристики  $Y$ .

## Примеры

Рассмотрим применение нечетких регрессионных моделей для исследования влияния аудиторного и внеаудиторного видов контроля знаний на итоговую оценку по учебной дисциплине.

В качестве примера было исследовано влияние аудиторного и внеаудиторного видов контроля знаний на итоговую оценку по математике. Как аудиторный контроль знаний рассмотрено выполнение контрольной работы по теме «Пределы и дифференциальное исчисление». Как внеаудиторный контроль знаний рассмотрено

самостоятельное выполнение расчетно-графической работы по этой же теме. Формализация исходных данных была выполнена на основе лингвистических переменных, значениями которых являются нечеткие переменные. Оценки знаний студентов, во-первых, объективно не являются значениями случайных величин, а, во-вторых, все арифметические операции с оценками, измеренными в порядковой шкале, некорректны.

Итоговые оценки знаний по математике, измеренные по шкале «неудовлетворительно», «удовлетворительно», «хорошо», «отлично», формализованы на основе лингвистической переменной. Аналогично формализованы оценки за контрольную и расчетно-графическую работы.

В качестве значений входных переменных нечеткой регрессионной модели  $\tilde{X}_1, \tilde{X}_2$  рассмотрены формализованные оценки за контрольную и расчетно-графическую работы по математике. Как значения выходной переменной  $\tilde{Y}$  рассмотрены формализованные итоговые оценки по математике.

Построены две нечеткие регрессионные модели:

$$\tilde{Y} = (-0,11, 0,06, 0,05) + (1,21, 0,02, 0,01)\tilde{X}_1 + (0,05, 0,004, 0), \tilde{X}_2;$$

$$\tilde{Y} = (-0,29, 0,03, 0,07) + (1,08, 0,04, 0,03)\tilde{X}_1^2 + (0,03, 0,02, 0,02), \tilde{X}_2^2 + (-0,63, 0,05, 0,01)\tilde{X}_1\tilde{X}_2 + (0,9, 0,01, 0)\tilde{X}_1 + (0,07, 0, 0,002)\tilde{X}_2.$$

Для каждой модели найдены аналоги коэффициента детерминации и стандартной ошибки. Для линейной модели —  $\hat{R}^2 = 0,636$ ,  $\hat{S} = 0,183$ , для нелинейной модели —  $\hat{R}^2 = 0,429$ ,  $\hat{S} = 0,217$ .

Для дальнейшего анализа была выбрана нечеткая линейная модель, имеющая лучшие показатели качества.

Поскольку все коэффициенты регрессионной модели являются нечеткими числами, то для сравнительного анализа коэффициенты при входных переменных были дефаззифицированы по методу центра тяжести [10]

$$a_i = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} x \mu_i(x) dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} \mu_i(x) dx}, i = 1, 2,$$

где  $\mu_i(x)$ ,  $i = 1, 2$  — функции принадлежности нечетких коэффициентов  $\tilde{a}_i$ ,  $i = 1, 2$  регрессионной модели.

Полученные результаты  $a_1 = 1,196$ ,  $a_2 = 0,049$  свидетельствуют о существенном влиянии аудиторного контроля знаний студентов на итоговую оценку по математике, подтверждают существенную объективность аудиторного контроля знаний, поскольку, находясь под контролем преподавателя, студенты не пользуются дополнительными источниками, не списывают решения друг у друга, не находят похожие или в точности такие же задачи в интернете, после чего бездумно копируют их.

Рассмотрим применение нечетких регрессионных моделей для прогноза успешности защиты диссертации аспирантом.

Итоговой аттестацией аспиранта согласно приказу Минобрнауки России № 951 от 20.10.2021 (с изм. от 06.05.2022) является оценка диссертации на предмет ее соответствия критериям, установленным согласно Федеральному закону Российской Федерации от 23 августа 1996 г. № 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике». Переход обучения в аспирантуре из образовательного формата в научный обеспечил переход с ФГОС (федеральные государственные образовательные стандарты) на ФГТ (федеральные государственные требования). Это изменение направлено на повышение качества подготовки аспирантов, поскольку фактом успешного завершения их обучения является не сдача образовательных дисциплин и получения удостоверения, а защита диссертации или практическая готовность диссертации к защите.

В связи с этими изменениями большое значение имеет оценка научно-исследовательской деятельности поступающего в аспирантуру и прогноз защиты диссертации в положенные сроки.

Для построения регрессионной модели в целях прогноза успешности защиты диссертации аспирантом необходимо определить систему входных характеристик, которая зависит от научной специальности и формируется на начальном этапе анализа. Сложность этого анализа состоит в исследовании разнородных характеристик, подавляющее большинство которых являются качественными (нечисловыми). Поскольку, как было сказано ранее, для значений качественных характеристик некорректны все арифметические операции, то формализация их значений осуществляется на основе лингвистических переменных. Для выявления системы входных характеристик, влияющих на успешность защиты диссертации, применяется модель, разработанная в работе [18].

Предположим, что в систему входных характеристик включены характеристики  $X_i$ ,  $i = 1, m$ , которыми, как правило, являются: успеваемость

по основным дисциплинам, рейтинговая оценка в рамках этих дисциплин, успешность студенческой научно-исследовательской работы, логичность мышления, дисциплинированность, исполнительность, лидерство. Каждая из характеристик  $X_i$ ,  $i = 1, m$  формализуется с помощью лингвистической переменной, термы которой соответствуют уровням  $X_{il}$ ,  $l = 1, m_l$ ,  $i = 1, m$  шкалы, используемой для ее оценки. Таким образом, входным характеристикам  $X_i$ ,  $i = 1, m$  поставлены в соответствие лингвистические переменные  $\tilde{X}_i$ ,  $i = 1, m$ , значениями которых являются нечеткие множества  $\tilde{X}_{il}$ ,  $l = 1, m_l$ ,  $i = 1, m$ . Для примера были выбраны три входные характеристики  $X_i$ ,  $i = 1, 3$ :  $X_1$  — «Рейтинговая оценка по основным дисциплинам»,  $X_2$  — «Успешность студенческой научно-исследовательской работы»,  $X_3$  — «Логичность мышления». Для оценки характеристик  $X_i$ ,  $i = 1, 3$  использовались шкалы соответственно с уровнями  $X_{11}$  = «Удовлетворительно»,  $X_{12}$  = «Хорошо»,  $X_{13}$  = «Отлично»,  $X_{21}$  = «Не успешно»,  $X_{22}$  = «Достаточно успешно»,  $X_{23}$  = «Успешно»,  $X_{31}$  = «Низкая»,  $X_{32}$  = «Средняя»,  $X_{33}$  = «Высокая»,  $X_{34}$  = «Очень высокая». Все шкалы формализованы с помощью лингвистических переменных  $\tilde{X}_i$ ,  $i = 1, 3$ , а уровни с помощью нечетких множеств  $\tilde{X}_{1l}$ ,  $l = 1, 3$ ,  $\tilde{X}_{2l}$ ,  $l = 1, 3$ ,  $\tilde{X}_{3l}$ ,  $l = 1, 4$ .

Выходная характеристика  $Y$  измеряется в шкале с уровнями  $Y_k$ ,  $k = 1, 3$ :  $Y_1$  = «Не успешно» (диссертация не представлена),  $Y_2$  = «Достаточно успешно» (диссертация завершена на 75 %),  $Y_3$  = «Успешно» (диссертация готова к защите). Уровни шкалы  $Y_k$ ,  $k = 1, 3$  формализованы с помощью значений  $Y_k$ ,  $k = 1, 3$  лингвистической переменной

$$\tilde{Y}_1 = (0, 0, 3, 0, 0, 2), \tilde{Y}_2 = (0, 5, 0, 8, 0, 2, 0, 1), \\ \tilde{Y}_3 = (0, 9, 1, 0, 1, 0).$$

Для линейной и нелинейной моделей найдены аналоги коэффициента детерминации и стандартной ошибки. Для линейной модели —  $\hat{R}^2 = 0,782$ ,  $\hat{S} = 0,129$ , для нелинейной модели —  $\hat{R}^2 = 0,365$ ,  $\hat{S} = 0,253$ , поэтому для анализа была выбрана линейная модель

$$\tilde{Y} = (-1,34, 0,15, 0,07) + (0,83, 0,04, 0,08) \tilde{X}_1 + \\ + (1,36, 0,02, 0,05) \tilde{X}_2 + (0,91, 0,17, 0,09) \tilde{X}_3.$$

Как видно из модели, наибольший коэффициент имеет характеристика успешности студенческой научно-исследовательской работы, поэтому при отборе кандидатов в аспирантуру следует обращать на эту характеристику пристальное внимание, как на оказывающую существенное влияние на успешность защиты диссертации аспирантом.



Для того чтобы спрогнозировать успешность защиты диссертации, необходимо выходное модельное число идентифицировать с одним из лингвистических значений  $Y_k$ ,  $k = 1, 3$ :  $Y_1 = \langle \text{«Не успешно»}$ ,  $Y_2 = \langle \text{«Достаточно успешно»}$ ,  $Y_3 = \langle \text{«Успешно»}$ . Пусть выходным значением является нечеткое число  $\tilde{Y}_m = (0,6, 0,75, 0,1, 0,1)$ .

Найдены агрегирующие отрезки  $[y_{1k}, y_{2k}]$ ,  $k = 1, 3$  для нечетких чисел  $\tilde{Y}_1 = (0, 0,3, 0,02)$ ,  $\tilde{Y}_2 = (0,5, 0,8, 0,2, 0,1)$ ,  $\tilde{Y}_3 = (0,9, 1,0, 1,0)$  и агрегирующий отрезок  $[y_{1m}, y_{2m}]$  для нечеткого числа  $\tilde{Y}_m = (0,6, 0,75, 0,1, 0,1)$ :  $[y_{11}, y_{21}] = [0, 0,33]$ ,  $[y_{12}, y_{22}] = [0,47, 0,82]$ ,  $[y_{13}, y_{23}] = [0,88, 1]$ ,  $[y_{1m}, y_{2m}] = [0,58, 0,77]$ .

Найдены квадраты расстояний

$$\rho^2(\tilde{Y}_m, \tilde{Y}_k) = \sqrt{(y_{1m} - y_{1k})^2 + (y_{2m} - y_{2k})^2},$$

$$k = \overline{1, 3}: \rho^2(\tilde{Y}_m, \tilde{Y}_1) = 0,53,$$

$$\rho^2(\tilde{Y}_m, \tilde{Y}_2) = 0,015, \rho^2(\tilde{Y}_m, \tilde{Y}_3) = 0,14.$$

Прогнозом успешности защиты диссертации является «Достаточно успешно» (диссертация завершена на 75 %).

## Выводы

Определены показатели качества нечетких регрессионных моделей, позволяющие осуществлять выбор лучшей модели для анализа качественных характеристик образовательного процесса и прогноза их значений.

Разработана модель идентификации выходного нечеткого значения модели с одним из уровней лингвистической шкалы, используемой для оценки выходной характеристики.

Значения входных и выходных характеристик нечетких регрессионных моделей являются значениями лингвистических переменных.

На примере показан алгоритм выбора нечеткой регрессионной модели из двух на основе показателей их качества. Проанализированы степени влияния входных характеристик на выходную характеристику.

Построена линейная нечеткая регрессионная модель для прогноза успешности защиты соискателем диссертации и для исследования зависимостей между входными характеристиками соискателя и выходной характеристикой.


Развитие нечеткого регрессионного анализа и его применение для обработки информации образовательного процесса позволяет учитывать нечеткость исходных данных, не накладывая на них некорректные условия, считая значениями случайных величин, корректно оперировать с ними, тем самым избегая накопления ошибок и снижая риски принятия ошибочных управляющих решений по результатам итоговых данных.

## Список литературы

- [1] Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 165 с.
- [2] Voskoglou M.G. Fuzzy Logic as a Tool for Assessing Students' Knowledge and Skills // *Education Science*, 2013, v. 3(2), pp. 208–221.
- [3] Lin C.T., Lee C.S. Neural Network based Fuzzy Logic Control and Decision System // *IEEE Transactions on Comput*, 1991, v. 40, no. 12, pp. 1320–1336.
- [4] Mendes R. R., Voznika F. D., Freitas, A. A., Nievola J. C. Discovering fuzzy classification rules with genetic programming and co-evolution // *Proceedings of the 5th European Conference on Principles of Data Mining and Knowledge Discovery*, Freiburg, Germany, September 3–5, 2001, pp. 314–325.
- [5] Poleshchuk O., Komarov E. The determination of students' fuzzy rating points and qualification levels // *1st International Fuzzy Systems Symposium — FUZZYSS'2009*, 1–2 October, 2009, Ankara, Turkey, 2009, pp. 218–224.
- [6] Ilahi R., Widiaty I., Gafar A. Abdullah Fuzzy system application in education // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2018, v. 434 (1), p. 012308.
- [7] Darwish A., Poleshchuk O. Fuzzy Models for Educational Data Mining // *J. of Telecommunications*, 2012, v. 15, no. 2, pp. 8–22.
- [8] Ruspini E.H. A new approach to clustering // *Information and Control*, 1969, v. 15, pp. 22–32.
- [9] Tamura S., Higuchi S., Tanaka K. Pattern classification based on fuzzy relations // *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics SMC1*, 1971, no.1, pp. 61–66. DOI:10.1109/TSMC.1971.5408605
- [10] Zadeh L.A. Similarity relations and fuzzy orderings // *Information Sciences*, 1971, v. 3, pp. 177–200.
- [11] Hwang C.L., Lin N.J. Group decision making under multiple criteria. Berlin: Springer, 1987. 400 p.
- [12] Dunn J.C. A fuzzy relative of the ISODATA process and its use in detecting compact well-separated clusters // *J. of Cybernetics*, 1973, v. 3, pp. 32–57.
- [13] Ruspini E.H. Recent developments in fuzzy clustering // *Fuzzy Set and Possibility Theory*. N.Y.: Pergamon Press, 1982, pp. 133–146.
- [14] Ryjov A.P. The Concept of a Full Orthogonal Semantic Scope and the Measuring of Semantic Uncertainty // *Fifth International Conference Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems*, Iran, 4–7 December, 1994, pp. 33–34.
- [15] Bezdek J.C. Selected applications in classifier design // *Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms*, 1981, v. 2, pp. 203–239.
- [16] Dubois D., Prade H. Ranking Fuzzy Numbers in Setting of Possibility Theory // *Information Science*, 1983, v. 30, pp. 183–224.
- [17] Borisov A.N., Krumberg O.A., Fedorov I.P. Decision making on the basis of fuzzy models: Examples of use. Riga: Zinatne, 1990. 184 p.
- [18] Ryjov A. Fuzzy Linguistic Scales: Definition, Properties and Applications. *Soft Computing in Measurement and Information Acquisition. Studies in Fuzziness and Soft Computing*, 2003, v. 127, pp. 2–12.
- [19] Полещук О.М. Кластерный анализ экспертной информации на основе Z-чисел // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2022. Т. 26. № 1. С. 143–148. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-1-143-148
- [20] Sabic D.A., Pedrycz W. Evaluation on fuzzy linear regression models // *Fuzzy Sets and Systems*, 1991, v. 39, pp. 51–63.

- [21] Tanaka H., Ishibuchi H., Yoshikawa S. Exponential possibility regression analysis // *Fuzzy Sets and Systems*, 1995, v. 69, pp. 305–318.
- [22] Chang Y.-H.O. Hybrid fuzzy least-squares regression analysis and its reliability measures // *Fuzzy Sets and Systems*, 2001, v. 119, pp. 225–246.
- [23] Domrachev V.G., Poleshuk O.M. A regression model for fuzzy initial data // *Automation and Remote Control*, 2003, v. 64, no. 11, pp. 1715–1724.
- [24] Yager R.R., Filev D.P. On the issue of defuzzification and selection based on a fuzzy set // *Fuzzy Sets and Systems*, 1993, v. 55, pp. 255–272.
- [25] Алтунин А.Е., Семухин М.В. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях. Тюмень.: Изд-во Тюменского государственного университета, 2002. 268 с.
- [26] Liu F., Mendel J.M. Encoding words into interval Type-2 fuzzy sets using an interval approach // *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, 2008, v. 16, no. 6, pp. 187–201.
- [27] Runkler T.A., Katz C. Fuzzy clustering by particle swarm optimization // *Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Oslo, 1–4 November, 2006. Berlin, 2006, pp. 34–41.
- [28] Phyo O., Chaw E. Comparative Study of Fuzzy PSO (FPSO) Clustering Algorithm and Fuzzy C-Means (FCM) Clustering Algorithm // *National J. of Parallel and Soft Computing*, 2019, v. 1, no. 1, pp. 62–67.
- [29] Zadeh L.A. Fuzzy logic and approximate reasoning // *Synthese*, 1975, v. 80, pp. 407–428.
- [30] Aliev R., Guirimov B.: Z-number clustering based on general Type-II fuzzy sets // *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2018, v. 896, pp. 270–278.
- [31] Jamal M., Khalif K., Mohamad S. The implementation of Z-numbers in fuzzy clustering algorithm for wellness of chronic kidney disease patients // *J. of Physics: Conference Series*, 2018, v. 1366, pp. 201–209.
- [32] Zadeh L.A. A note on Z-numbers // *Inf. Sci.*, 2011, v. 14(181), pp. 2923–2932. DOI: 10.1016/j.ins.2011.02.022
- [33] Комаров Е.Г., Полещук О.М., Поярков Н.Г. Изучение взаимосвязей между качественными признаками при нечеткой исходной информации // *Обозрение прикладной и промышленной математики*, 2005. Т. 12. Вып. 4. С. 992–993.
- [34] Darwish A., Poleshchuk O., Komarov E. A new fuzzy linear regression model for a special case of interval type-2 fuzzy sets // *Applied Mathematics & Information Sciences*, 2016, v. 10, no. 3, pp. 1209–1214.
- [35] Poleshchuk O.M. Formalization, Prediction and Recognition of Expert Evaluations of Telemetric Data of Artificial Satellites Based on Type-II Fuzzy Sets // *Machine Learning and Data Mining in Aerospace Technology. Studies in Computational Intelligence*, 2020, v. 836, pp. 39–64.

## Сведения об авторах

**Полещук Ольга Митрофановна**  — д-р. техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Высшая математика и физика», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), poleshchuk@mgul.ac.ru

**Комаров Евгений Геннадиевич** — д-р. техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Информационно-измерительные системы и технологии приборостроения», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), komarov@mgul.ac.ru

**Поярков Николай Геннадьевич** — канд. техн. наук, доцент, декан Космического факультета, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), royarkov@mgul.ac.ru

Поступила в редакцию 13.11.2023.

Одобрено после рецензирования 22.03.2024.

Принята к публикации 27.03.2024.

# PROCESSING AND PREDICTION OF EDUCATIONAL PROCESS DATA BASED ON FUZZY REGRESSION ANALYSIS

O.M. Poleshchuk✉, E.G. Komarov, N.G. Poyarkov

BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

poleshchuk@mgul.ac.ru

Quality indicators of fuzzy regression models designed to study the dependencies between the qualitative characteristics of the educational process and to predict their values, as well as a model for recognizing fuzzy values of the output characteristics of regressions are presented. An algorithm for selecting a fuzzy regression model from linear and nonlinear models based on their quality indicators is given. An analysis of the degree of influence of input characteristics on the output characteristic is carried out. A fuzzy regression model has been constructed to predict the success of the dissertation defense when the applicant enters the PhD program and to study the dependencies between the applicant's input characteristics and the output characteristic. An alternative approach to the construction of regression models based on non-numerical data of the educational process allows not to impose incorrect conditions on the initial data, considering them to be the values of random variables, and not to use incorrect arithmetic operations for the elements of ordinal scales.

**Keywords:** educational process, fuzzy information, fuzzy regression model, linguistic variable.

**Suggested citation:** Poleshchuk O.M., Komarov E.G., Poyarkov N.G. *Obrabotka i prognoz dannykh obrazovatel'nogo protsessa na osnove nechetkogo regressionnogo analiza* [Processing and prediction of educational process data based on fuzzy regression analysis]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 3, pp. 133–140. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-133-140

## References

- [1] Zade L.A. *Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ego primeneniye k prinyatiyu priblizitel'nykh resheniy* [The concept of a linguistic variable and its application to approximate decision making]. Moscow: Mir, 1976, 165 p.
- [2] Voskoglou M.G. Fuzzy Logic as a Tool for Assessing Students' Knowledge and Skills. *Education Science*, 2013, v. 3(2), pp. 208–221.
- [3] Lin C.T., Lee C.S. Neural Network based Fuzzy Logic Control and Decision System. *IEEE Transactions on Comput*, 1991, v. 40, no. 12, pp. 1320–1336.
- [4] Mendes R. R., Voznika F. D., Freitas, A. A., Nievola J. C. Discovering fuzzy classification rules with genetic programming and co-evolution. *Proceedings of the 5th European Conference on Principles of Data Mining and Knowledge Discovery*, 2001, pp. 314–325.
- [5] Poleshchuk O., Komarov E. The determination of students' fuzzy rating points and qualification levels. *1st International Fuzzy Systems Symposium — FUZZYSS'2009*, 1–2 October, 2009, Ankara, Turkey, 2009, pp. 218–224.
- [6] Ilahi R., Widiaty I., Gafar A. Abdullah Fuzzy system application in education. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2018, v. 434 (1), p. 012308.
- [7] Darwish A., Poleshchuk O. Fuzzy Models for Educational Data Mining. *J. of Telecommunications*, 2012, v. 15, no. 2, pp. 8–22.
- [8] Ruspini E.H. A new approach to clustering. *Information and Control*, 1969, v. 15, pp. 22–32.
- [9] Tamura S., Higuchi S., Tanaka K. Pattern classification based on fuzzy relations. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics SMC1*, 1971, no.1, pp. 61–66. DOI:10.1109/TSMC.1971.5408605
- [10] Zadeh L.A. Similarity relations and fuzzy orderings. *Information Sciences*, 1971, v. 3, pp. 177–200.
- [11] Hwang C.L., Lin N.J. *Group decision making under multiple criteria*. Berlin: Springer, 1987. 400 p.
- [12] Dunn J.C. A fuzzy relative of the ISODATA process and its use in detecting compact well-separated clusters. *J. of Cybernetics*, 1973, v. 3, pp. 32–57.
- [13] Ruspini E.H. *Recent developments in fuzzy clustering*. Fuzzy Set and Possibility Theory. N.Y.: Pergamon Press, 1982, pp. 133–146.
- [14] Ryjov A.P. The Concept of a Full Orthogonal Semantic Scope and the Measuring of Semantic Uncertainty. *Fifth International Conference Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems*, Iran, 4–7 December, 1994, pp. 33–34.
- [15] Bezdek J.C. Selected applications in classifier design. *Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms*, 1981, v. 2, pp. 203–239.
- [16] Dubois D., Prade H. Ranking Fuzzy Numbers in Setting of Possibility Theory. *Information Science*, 1983, v. 30, pp. 183–224.
- [17] Borisov A.N., Krumberg O.A., Fedorov I.P. *Decision making on the basis of fuzzy models: Examples of use*. Riga: Zinatne, 1990. 184 p.
- [18] Ryjov A. Fuzzy Linguistic Scales: Definition, Properties and Applications. In: Reznik L., Kreinovich V. (eds) *Soft Computing in Measurement and Information Acquisition*. *Studies in Fuzziness and Soft Computing*, 2003, v. 127.
- [19] Poleshchuk O.M. *Klasternyy analiz ekspertnoy informatsii na osnove Z-chisel* [Cluster analysis of expert information based on Z-numbers]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 1, pp. 143–148. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-1-143-148
- [20] Sabic D.A., Pedrycz W. Evaluation on fuzzy linear regression models. *Fuzzy Sets and Systems*, 1991, v. 39, pp. 51–63.
- [21] Tanaka H., Ishibuchi H., Yoshikawa S. Exponential possibility regression analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, 1995, v. 69, pp. 305–318.

- [22] Chang Y.-H.O. Hybrid fuzzy least-squares regression analysis and its reliability measures. *Fuzzy Sets and Systems*, 2001, v. 119, pp. 225–246.
- [23] Domrachev V.G., Poleshuk O.M. A regression model for fuzzy initial data. *Automation and Remote Control*, 2003, v. 64, no. 11, pp. 1715–1724.
- [24] Yager R. R., Filev D. P. On the issue of defuzzification and selection based on a fuzzy set. *Fuzzy Sets Syst.*, 1993, v. 55, pp. 255–272.
- [25] Altunin A.E., Semukhin M.V. *Modeli i algoritmy prinyatiya resheniy v nechetkikh usloviyakh* [Models and algorithms for decision making in fuzzy conditions]. Tyumen: Izd-vo Tyumenskogo gos. un-ta [Tyumen State Publishing House Univ.], 2002, 268 p.
- [26] Liu F., Mendel J.M. Encoding words into interval Type-2 fuzzy sets using an interval approach. *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, 2008, v. 16, no. 6, pp. 187–201.
- [27] Runkler T.A., Katz C. Fuzzy clustering by particle swarm optimization. *Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Oslo, 1-4 November, 2006. Berlin, 2006, pp. 34-41.
- [28] Phyo O., Chaw E. Comparative Study of Fuzzy PSO (FPSO) Clustering Algorithm and Fuzzy C-Means (FCM) Clustering Algorithm. *National J. of Parallel and Soft Computing*, 2019, v. 1, no. 1, pp. 62–67.
- [29] Zadeh L.A. Fuzzy logic and approximate reasoning. *Synthese*, 1975, v. 80, pp. 407–428.
- [30] Aliev R., Guirimov B.: Z-number clustering based on general Type-II fuzzy sets. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2018, v. 896, pp. 270-278.
- [31] Jamal M., Khalif K., Mohamad S. The implementation of Z-numbers in fuzzy clustering algorithm for wellness of chronic kidney disease patients. *J. of Physics: Conference Series*, 2018, v. 1366, pp. 201-209.
- [32] Zadeh L.A. A note on Z-numbers. *Inf. Sci.*, 2011, v. 14(181), pp. 2923–2932. DOI: 10.1016/j.ins.2011.02.022
- [33] Komarov E.G., Poleshchuk O.M., Poyarkov N.G. *Izuchenie vzaimosvyazey mezhdu kachestvennymi priznakami pri nechetkoy iskhodnoy informatsii. Obozrenie prikladnoy i promyshlennoy matematiki* [Studying the relationships between qualitative features with fuzzy initial information]. [Review of Applied and Industrial Mathematics], 2005, v. 12, iss. 4, pp. 992–993.
- [34] Darwish A., Poleshchuk O., Komarov E. A new fuzzy linear regression model for a special case of interval type-2 fuzzy sets. *Applied Mathematics & Information Sciences*, 2016, v. 10, no. 3, pp. 1209–1214.
- [35] Poleshchuk O.M. Formalization, Prediction and Recognition of Expert Evaluations of Telemetric Data of Artificial Satellites Based on Type-II Fuzzy Sets. *Machine Learning and Data Mining in Aerospace Technology. Studies in Computational Intelligence*, 2020, v. 836, pp. 39–64.

## Authors' information

**Poleshchuk Ol'ga Mitrofanovna**✉ — Dr. Sci. (Tech.), Professor, Head of Higher Mathematics and Physics Department of the BMSTU (Mytishchi branch), poleshchuk@mgul.ac.ru

**Komarov Evgeniy Gennad'evich** — Dr. Sci. (Tech.), Professor, Head of the Department of Information and Measuring Systems and Instrumentation Technologies of the BMSTU (Mytishchi branch), komarov@mgul.ac.ru

**Poyarkov Nikolay Gennad'evich** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Dean of the Space Faculty of the BMSTU (Mytishchi branch), poyarkov@mgul.ac.ru

Received 13.11.2023.

Approved after review 22.03.2024.

Accepted for publication 27.03.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article  
The authors declare that there is no conflict of interest