

ЛЕСНОЙ ВЕСТНИК / FORESTRY BULLETIN

Научно-информационный журнал

№ 4 ' 2025 Том 29

Главный редактор

Санаев Виктор Георгиевич, д-р техн. наук, профессор,
Мытищинский филиал (МФ) МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Редакционный совет

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. Королёва, 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. Баня 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,

МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Иванкин Андрей Николаевич, д-р хим. наук, профессор,

академик МАНВШ, МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Кирюхин Дмитрий Павлович, д-р хим. наук, ИПХФ РАН,

Черноголовка

Класен Николай Владимирович, канд. физ.-мат. наук,

ИФТТ РАН, Черноголовка

Ковачев Атанас, д-р архитектуры, профессор, член-корр.

Болгарской АН, профессор Международной Академии

Архитектуры, Иностранный 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, МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Комаров Евгений Геннадиевич, д-р техн. наук, профессор,

МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Котиев Георгий Олегович, д-р техн. наук, профессор,

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Кох Нильс Элерс, д-р агрономии в области лесной политики,

профессор, Президент IUFORO, Центр лесного и ландшафтного

планирования университета, Копенгаген, Дания

Кротт Макс, профессор, специализация «Лесная политика»,

Георг-Аугуст-Университет, Геттинген, Германия

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,

МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Малашин Алексей Анатольевич, д-р физ.-мат. наук, профессор,

МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Мартынюк 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. Йозенсуу, 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

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,

МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Полуэктов Николай Павлович, д-р техн. наук, профессор,

МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Родин Сергей Анатольевич, д-р с.-х. наук, профессор, академик

РАН, ВНИИЛМ, Москва

Теодоронский Владимир Сергеевич, д-р с.-х. наук, профессор,

академик РАЕН, МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

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,

МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Шимкович Дмитрий Григорьевич, д-р техн. наук, профессор,

ООО «Кудесник», Москва

Щепашенко Дмитрий Геннадьевич, д-р биол. наук, доцент,

старший научный сотрудник Международного института

прикладного системного анализа (IIASA), Австрия

Научно-консультативный совет

Козлов Александр Ильич, канд. техн. наук, ученый секретарь

Совета ОАО «НПО ИТ», Королёв

Корольков Анатолий Владимирович, д-р физ.-мат. наук,

профессор, МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Липаткин Владимир Александрович, канд. биол. наук,

профессор, МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Обливин Александр Николаевич, д-р техн. наук, профессор,

академик РАЕН, МАНВШ, заслуженный деятель науки

и техники РФ, МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Рыкунин Станислав Николаевич, д-р техн. наук, профессор,

МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Стрекалов Александр Федорович, канд. техн. наук,

АО «Корпорация Тактическое военное вооружение», Королёв

Титов Анатолий Матвеевич, канд. техн. наук, зам. начальника

отделения, ученый секретарь Совета ЦУП ЦНИИМАШ, Королёв

Щекалев Роман Викторович, д-р с.-х. наук, СПбГЛТУ, Санкт-

Петербург

Ответственный секретарь Расева Елена Александровна

Редактор Л.В. Сивай

Перевод М.А. Карпухиной

Электронная версия Ю.А. Рязской

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 воспроизведе-

ны полностью или частично с письменного разрешения издательства

Выходит с 1997 года

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

Дата выхода в свет 23.06.2025

Тираж 600 экз.

Заказ №

Объем 22,75 п. л.

Цена свободная

LESNOY VESTNIK / FORESTRY BULLETIN

Scientific Information journal
No. 4 ' 2025 Vol. 29

Editor-in-chief

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

Editorial council

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 Gennadiyevich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU
(Mytishchi branch), Moscow
Kotiev George Olegovich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU
(Mytishchi branch), Moscow
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
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
Martynyuk 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)
Pasztor, 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
Schepashchenko Dmitry Gennadiyevich, 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
Teodoronskiy Vladimir Sergeevich, Professor, Dr. Sci. (Agric.),
academician of the Russian Academy of Natural Sciences, BMSTU
(Mytishchi branch), Moscow
Trichkov Neno Ivanov, professor, Dr., Vice-Rector for Research,
Forestry University, Sofia, Bulgaria
Zalesov Sergey Veniaminovich, Professor, Dr. Sci. (Agric.), USFEU,
Ekaterinburg
Zaprudnov Vyacheslav Il'ich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU
(Mytishchi branch), Moscow

Scientific advisory council

Kozlov Aleksandr Il'ich, Ph. D. (Tech.), Scientific Secretary
of the Board of «NPO IT», Korolev
Korol'kov Anatoliy Vladimirovich, Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.),
BMSTU (Mytishchi branch), Moscow
Lipatkin Vladimir Aleksandrovich, Professor, Ph. D. (Biol.), BMSTU
(Mytishchi branch), Moscow
Oblivin Aleksandr Nikolaevich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Acade-
mician of the Russian Academy of Natural Sciences and MANVSh,
Honored worker of science and equipment of the Russian Federation,
BMSTU, Moscow
Rykunin Stanislav Nikolaevich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU
(Mytishchi branch), Moscow
Strekalov Aleksandr Fedorovich, Ph. D. (Tech.), JSC «Tactical Missiles
Corporation», Korolev
Shchekalev Roman Viktorovich, Dr. Sci. (Agric.), Saint Petersburg
State Forest Technical University, St. Petersburg
Titov Anatoliy Matveevich, Ph. D. (Tech.), Deputy Chief of Department,
Scientific Secretary of the Board of MCC TSNIMASH, Korolev

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@bmstu.ru
It is sent for the press 23.06.2025
Circulation 600 copies
Order №
Volume 22,75 p. p.
Price free

СОДЕРЖАНИЕ

БИОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА

Осипенко А.Е., Осипенко Р.А., Залесов С.В. Производственный опыт создания культур сосны обыкновенной (<i>Pinus sylvestris</i> L.) сеянцами с закрытой корневой системой в условиях степной зоны Алтайского края	5
Танцырев Н.В., Иванова Н.С., Андреев Г.В., Петрова И.В. Сосна сибирская кедровая (<i>Pinus sibirica</i> Du Tour) в современных исследованиях России: литературный обзор	19
Орехова Т.П., Малышева С.К., Горохова С.В. Особенности развития сеянцев кандидатов в плюсовые деревья дуба монгольского (<i>Quercus mongolica</i> Fish. ex Ledeb.) на юге Приморского края	39
Тимофеева В.В., Синькевич С.М. Особенности рекреационной трансформации флоры, живого напочвенного покрова и динамики прироста городских ельников	52
Левин С.В. О проявлении изменчивости морфологического признака состояния коры кедра сибирского (<i>Pinus sibirica</i> du Tour.) при его интродукции в условиях лесостепи в пределах Воронежской области	64
Сергеева Ю.А., Долмonego С.О., Родин С.А., Загоринский А.А. Экспериментальное применение яйцеедов рода <i>Trichogramma</i> против звездчатого пилильщика-ткача <i>Acantholyda posticalis</i>	79
Федотов Г.Н., Тарасенко Д.А., Горепекин И.В., Батырев Ю.П. Изменение вязкости паст в зависимости от содержания в них воды и исходной влажности почвенных образцов	94

ДЕРЕВООБРАБОТКА И ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

Иванкин А.Н., Зарубина А.Н., Кулезнев А.С. Древесно-полимерные композиты на основе поликонденсационных сополиимидов	104
Евдокимов Ю.М., Дилектова Т.П., Прохоров В.Ю. Назад в будущее или возвращаясь к деревянным небоскрегам	114
Сафин Р.Г., Валеев К.В., Тимербаев Н.Ф., Петров В.И., Гильфанов К.Х. Исследование процесса экстракции эфирных масел из хвои и коры сосны	126

ЛЕСОИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО

Боровлев Ю.А., Козлов Д.Г., Скрыпников А.В., Сергеев А.С., Яровенко А.А. Контроль параметров процесса уплотнения грунтов земляного полотна лесовозных автомобильных дорог	139
Кручинин И.Н., Никитин В.В., Бурмистрова О.Н., Щербаков Е.Н., Ахтямов Э.Р., Овсейчик Д.В. Повышение транспортно-эксплуатационных показателей лесотранспортной инфраструктуры в зимний период	156
Карпачев С.П., Запруднов В.И., Посыпанов С.В. Моделирование технологии контроля и регулирования древесины отпада в лесу	170

CONTENTS

BIOLOGICAL AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF FORESTRY

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

Experience in planting Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) using containerized root-balled seedlings in Altai region steppe zone 5

Tantsyrev N.V., Ivanova N.S., Andreev G.V., Petrova I.V.

Siberian stone pine (*Pinus sibirica* Du Tour) in latest research in Russia: literature survey 19

Orekhova T.P., Malysheva S.K., Gorokhova S.V.

Seedlings development of Mongolian oak (*Quercus mongolica* Fish. ex Ledeb.) plus trees in south of Primorsky Territory 39

Timofeeva V.V., Sin'kevich S.M.

Features of flora, ground cover recreational transformation and wood increment of urban spruce forests 52

Levin S.V.

Morphological character variability of Siberian stone pine (*Pinus sibirica* Du Tour.) bark condition during its introduction in forest-steppe conditions within Voronezh region 64

Sergeeva Yu.A., Dolmonego S.O., Rodin S.A., Zagorinskiy A.A.

Experimental application of egg parasitoids *Trichogramma* genus against pine web-spinning sawfly *Acantholyda posticalis* 79

Fedotov G.N., Tarasenko D.A., Gorepekin I.V., Batyrev Yu.P.

Change in paste viscosity depending on water content and initial moisture content of soil samples 94

WOODWORKING AND CHEMICAL WOOD PROCESSING

Ivankin A.N., Zarubina A.N., Kuleznev A.S.

Wood-polymer composites based on polycondensation copolyimides 104

Evdokimov Yu.M., Dialektova T.P., Prokhorov V.Yu.

Back to the future or returning to wooden skyscrapers 114

Safin R.G., Valeev K.V., Timerbaev N.F.,

Petrov V.I., Gil'fanov K.Kh.

Study of essential oils extraction from pine needles and bark 126

FOREST ENGINEERING

Borovlev Yu.A., Kozlov D.G., Skrypnikov A.V.,

Sergeev A.S., Yarovenko A.A.

Parameters control of roadbed soil compaction process on truck haul roads 139

Kruchinin I.N., Nikitin V.V., Burmistrova O.N.,

Shcherbakov E.N., Akhtyamov E.R., Ovseychik D.V.

Improving transport and operational performance of forestry transport infrastructure in winter 156

Karpachev S.P., Zaprudnov V.I., Posypanov S.V.

Forest litter control and regulation modelling technology 170

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ОПЫТ СОЗДАНИЯ КУЛЬТУР СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (*PINUS SYLVESTRIS* L.) СЕЯНЦАМИ С ЗАКРЫТОЙ КОРНЕВОЙ СИСТЕМОЙ В УСЛОВИЯХ СТЕПНОЙ ЗОНЫ АЛТАЙСКОГО КРАЯ

А.Е. Осипенко[✉], Р.А. Осипенко, С.В. Залесов

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

osipenkoae@m.usfeu.ru

Представлены результаты изучения приживаемости и роста несомкнувшихся культур сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), созданных посадочным материалом с закрытой и открытой корневыми системами. Установлено, что в условиях типа леса сухой бор пологих всхолмлений приживаемость лесных культур, созданных различным посадочным материалом, статистически не различается. Зафиксировано, что в условиях района исследований лесные культуры многократно дополняются, а это приводит к переносу сроков отнесения несомкнувшихся лесных культур к землям, на которых расположены леса. Построены графики хода роста деревьев искусственного и естественного происхождения, произрастающих на исследуемых участках. Указано, что до восьмилетнего возраста лесные культуры отстают по высоте от деревьев естественного происхождения, однако в более старшем возрасте опережают их по данному показателю. Выявлено, что на семи из одиннадцати участков несомкнувшихся лесных культур самосев сосны отсутствует, на трех участках его количество не превышает 45 шт./га, и только на участке, примыкающем к стенам леса, количество самосева составляет 1,5 тыс. шт./га. Определены средние диаметры крон и текущие приросты по высоте деревьев сосны различного происхождения. Рекомендуется увеличить густоту посадки лесных культур до 5–6 тыс. шт./га, так как густота посадки от 2,0 до 4,4 тыс. шт./га не позволяет обеспечить через шесть лет после посадки густоту деревьев сосны обыкновенной более 2,5 тыс. шт./га, а также отказаться от использования сеянцев с закрытой корневой системой в степной зоне Алтайского края в пользу сеянцев с открытой корневой системой.

Ключевые слова: лесные культуры, *Pinus sylvestris*, сеянец с закрытой корневой системой, приживаемость, рост, ленточный бор, степная зона

Ссылка для цитирования: Осипенко А.Е., Осипенко Р.А., Залесов С.В. Производственный опыт создания культур сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) сеянцами с закрытой корневой системой в условиях степной зоны Алтайского края // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 4. С. 5–18. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-5-18

Лесные культуры с закрытой корневой системой (ЗКС) для лесопользователей Алтайского края все еще остаются относительно новым явлением. Первые производственные посадки сеянцев, выращенных в кассетах, в степной зоне региона начали осуществляться в 2013 г в Озеро-Кузнецовском лесничестве. С 2017 г. данная практика распространилась на Ключевское лесничество, а с 2019 г. — на Раки-товское. В настоящее время лесные культуры, созданные сеянцами с ЗКС, достигли или приближаются к возрасту отнесения их к землям, на которых расположены леса, поэтому необходим анализ производственного опыта создания таких лесных культур. Объективная

оценка полученных результатов позволит усовершенствовать технологию создания лесных культур и скорректировать подходы к искусственному лесовосстановлению в условиях степной зоны Алтайского края [1–3].

Проблема применения посадочного материала с ЗКС в условиях степи и лесостепи пока не решена до конца, поэтому многие научные работы посвящены этой теме [4–7]. Актуальность ее обеспечивают также изменения климата, происходящие в сторону увеличения частоты и интенсивности длительных засух, аномальной жары и других экстремальных погодных явлений [8–12].

Результаты проведенных нами и других аналогичных исследований могут использоваться при разработке региональных рекомендаций в сфере воспроизводства лесов, которые, на наш



Рис. 1. Несомкнувшиеся культуры сосны, созданные сеянцами с закрытой корневой системой (участок 2)

Fig. 1. Open forest plantations created by containerized root-balled seedling (plot 2)

взгляд, необходимы для организации рационального и устойчивого лесного хозяйства, особенно, если речь идет про такой уникальный природный объект, как ленточные боры, отличающиеся от других лесных массивов весьма специфическими природно-климатическими и зонально-типологическими условиями, а также особенностями лесовосстановительных процессов [13–17].

Цель работы

Цель работы — оценка приживаемости и роста культур сосны обыкновенной, созданных посадочным материалом с открытой и закрытой корневыми системами в условиях степной зоны Алтайского края.

Материалы и методы

Сбор полевых данных осуществлялся в июле 2024 г. на территории Шелковниковского, Чекуновского и Озеро-Кузнецовского участковых лесничеств Ракизовского лесничества Алтайского края (Рубцовский и Угловский муниципальные районы). В соответствии с приказом Минприроды России от 18.08.2014 г. № 367 (ред. от 02.08.2023) «Об утверждении Перечня лесорастительных зон Российской Федерации и Перечня лесных районов Российской Федерации», район исследований относится к Алтае-Новосибирскому району лесостепей и ленточных боров лесостепной зоны. Однако

с научной точки зрения юго-западная часть Алтайского края расположена в степной зоне [12, 18–20].

Объектом исследования послужили культуры сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), созданные на гари 1997 г. Всего было обследовано 11 участков. До пожара на исследуемых участках произрастали сосновые насаждения III–IV классов бонитета. Тип леса исследуемых участков — сухой бор пологих всхолмлений. Почва участков — дерново-подзолистая, песчаная [20, 21]. Мезорельеф района исследований представлен пологими холмами, буграми и гривами, чередующимися с ложбинами и западинами.

Исследуемые лесные культуры были созданы в период с 2019 по 2022 гг., однако на участках 1, 2, 5, 6 попытки создания лесных культур предпринимались и ранее, но оказались неудачными (участки не были отнесены к землям, на которых расположены леса). По этой причине на указанных участках имеются деревья искусственного происхождения более старшего возраста. На рис. 1 представлены несомкнувшиеся культуры сосны, созданные посадочным материалом с ЗКС, на участке 2, где уже дважды (в 2007 и 2016 гг.) создавались культуры сеянцами с открытой корневой системой (ОКС).

Несомкнувшиеся культуры сосны, созданные посадочным материалом с открытой корневой системой, показаны на рис. 2.



Рис. 2. Несомкнувшиеся культуры сосны, созданные сеянцами с открытой корневой системой (участок 9)

Fig. 2. Open forest plantations created by planting material with a bare root system (plot 9)

На участках 1–7 были посажены сеянцы с ЗКС, а на участках 8–11 — с ОКС. На участке 6 высадили однолетние сеянцы, на остальных — двухлетние. Сеянцы с ЗКС выращены в Алтайском лесном селекционно-семеноводческом центре, сеянцы с ОКС — в алтайских питомниках ООО «Лебяжье Лес» (участок 8), ООО «Лесное» (участок 10) и ООО «Лес Сервис» (участки 9, 11). Культуры, создававшиеся до 2016 г. (на участках 1, 2, 5, 6), были созданы двухлетними сеянцами, выращенными на питомнике в с. Ракиты, который не функционирует с 2017 г. Технологии выращивания сеянцев с ОКС и ЗКС описаны в монографии [16]. В данном исследовании посадочный материал был выращен из семян, собранных в Алтайском крае (12 лесосеменной район), селекционная категория «нормальные».

Участки культур, созданных сеянцами с ЗКС и ОКС, подбирались максимально похожими по времени и технологии создания. Удалось найти четыре группы таких участков: 1, 2 и 8; 3 и 9; 4, 5, 6 и 10; 7 и 11. Участки культур, созданные сеянцами с ОКС (8–11), выступают как контрольная группа, поскольку данный вид посадочного материала использовался в районе исследований на протяжении более 100 лет и технологии создания культур таким посадочным материалом уже отработаны [22].

Информация о местонахождении, сезоне и годе посадки, расстоянии между растениями и

густоте посадки исследуемых лесных культур приведена в табл. 1. Все исследуемые лесные культуры создавались рядовым способом. Ряды на большинстве участков (№ 1–6, 8, 9) имеют направление с северо-запада на юго-восток, на участке 7 ряды направлены с запада на восток, на участке 10 — с юго-запада на северо-восток, на участке 11 — с севера на юг. Деревья высаживали в дно борозд глубиной до 35 см, созданных плугом ПКЛ-70, агрегированным с трактором МТЗ-82. Для посадки сеянцев с ЗКС использовалась лесопосадочная труба Pottiputki, а для посадки сеянцев с ОКС — меч Колесова.

В соответствии с проектами лесовосстановления на участках 1–6 создавались лесные культуры густотой 2,5 тыс. шт./га (шаг посадки 1,0 м, ширина междурядья 4,0 м), на участке 7 проектная густота лесных культур составляла 2,0 тыс. шт./га (1,25×3,25 м), на участках 8 и 9 лесные культуры имели проектную густоту 4,1 тыс. шт./га (0,74×3,44 м), на участках 10 и 11 — 4,5 тыс. шт./га (0,75×2,96 м). Не на всех участках проектные показатели были выдержаны. Отклонения от проектных значений густоты лесных культур наблюдаются как в большую, так и в меньшую сторону.

Сеянцы с ЗКС в Ракитовском лесничестве высаживаются преимущественно осенью, а с ОКС — весной, поэтому не всегда есть возможность найти участки одинакового года и сезона

Т а б л и ц а 1

Местонахождение и описание исследуемых участков
Location and description of the trial plots

Номер участка	Координаты GPS, с.ш./в.д.	Участковое лесничество	Номер квартала	Номер выдела	Сезон и год посадки	Средний шаг посадки, м	Междурядья, м	Густота посадки, тыс. шт./га
Несомкнувшиеся лесные культуры, созданные сеянцами с закрытой корневой системой								
1	51°24.551' 80°22.040'	Озеро-Кузнецовское	181	3 (ч)	Осень 2019 г.	0,83	5,4	2,2
					Весна 2005 г.	0,86	7,6	1,5
2	51°22.644' 80°20.329'		178	3 (ч)	Осень 2019 г.	0,91	5,4	2,0
					Весна 2016 г.	0,91	9,17	1,2
					Весна 2007 г.	1,09	9,8	0,9
3	51°24.649' 80°22.133'		182	5	Весна 2020 г.	0,84	3,6	3,3
4	51°23.101' 80°19.045'		94	6 (ч)	Осень 2021 г.	0,94	4,4	2,4
5	51°24.074' 80°18.610'		53	6 (ч)	Осень 2021 г.	0,90	3,8	2,9
					Весна 2015 г.	0,90	3,8	2,9
6	51°22.253' 80°23.020'	Чекуновское	18	8 (ч)	Осень 2021 г.	0,90	5,1	2,2
					Весна 2008 г.	0,87	5,7	2,0
7	51°25.862' 80°26.770'	Шелковниковское	17	6 (ч)	Весна 2022 г.	1,54	2,3	2,8
Несомкнувшиеся лесные культуры, созданные сеянцами с открытой корневой системой (контрольные участки)								
8	51°26.242' 80°23.176'	Озеро-Кузнецовское	143	17 (ч)	Осень 2019 г.	0,96	3,4	3,0
9	51°26.431' 80°23.187'		143	17 (ч)	Весна 2020 г.	0,74	3,1	4,4
10	51°22.150' 080°23.256'	Чекуновское	18	17	Весна 2021 г.	0,73	4,4	3,1
11	51°25.825' 80°26.804'	Шелковниковское	17	6 (ч)	Весна 2022 г.	0,95	3,9	2,7
Примечание: (ч) — часть выдела; выделены культуры, ранее созданные на исследуемых участках сеянцами с открытой корневой системой, но не переведенные в земли, на которых расположены леса.								

посадки, но с различным видом посадочного материала.

Агротехнические уходы за лесными культурами осуществлялись культиватором КЛБ-1,7. На всех обследованных участках выполнялось дополнение лесных культур, причем на многих участках неоднократно. В связи с этим возраст деревьев, отнесенных к одному элементу несомкнувшихся лесных культур, на участках мог варьировать в пределах до 5 лет. Под термином «элемент несомкнувшихся лесных культур» мы понимаем совокупность деревьев одной

породы, имеющих одинаковое происхождение, одинаково развивающихся в однородных условиях местопроизрастания.

Основным методом исследования являлся метод пробных площадей (ПП). Пробные площади имели прямоугольную форму и охватывали участок не менее 0,25 га. Длинные стороны ПП проходили по центру междурядий, по углам ПП устанавливались вешки (колья высотой 1,5 м). На ПП осуществлялся учет всех живых деревьев сосны обыкновенной с делением их на элементы несомкнувшихся лесных культур по

происхождению (искусственное, естественное), виду посадочного материала (сеянцы с ОКС или ЗКС) и году посадки. Породный состав несомкнувшихся лесных культур устанавливался пропорционально густоте их элементов. У элементов несомкнувшихся лесных культур с минимальной высотой деревьев более 1,3 м измерялся диаметр ствола на высоте 1,3 м от основания ствола, у элементов с минимальной высотой деревьев менее 1,3 м измерялся диаметр у основания ствола и на высоте 1,3 м (при условии, если обмеряемое дерево было выше данной высоты). Диаметры измерялись электронным штангенциркулем Electronic Digital Caliper с точностью измерений $\pm 0,2$ мм. Высота растения, диаметр его кроны (в двух направлениях) и величина текущих приростов по высоте измерялись не менее чем у 30 деревьев каждого элемента несомкнувшихся лесных культур рулеткой измерительной с точностью $\pm 0,4$ мм на 1 м длины. Учет деревьев других пород не осуществлялся в связи с тем, что в условиях исследуемого типа леса только подрост сосны обыкновенной способен сформировать древостой [14, 15].

Оценка различий между выборками по уровню приживаемости культур осуществлялась с помощью *U*-критерия Манна — Уитни. Для сравнения дисперсий приживаемости культур сосны, созданных различным посадочным материалом, применялся критерий Фишера (*F*-тест). Анализ данных и все расчеты осуществлялись в программе MS Excel 2013.

Под приживаемостью лесных культур в рамках настоящей работы мы понимаем выраженное в процентах отношение числа посадочных мест с сохранившимися растениями к общему числу посадочных мест, учтенных на ПП. Данное определение соответствует актуальным Правилам лесовосстановления (приказ Минприроды России от 29.12.2021 № 1024).

Результаты и обсуждение

За период с 2019 по 2022 гг. на территории Ракитовского лесничества сеянцами с ЗКС было создано 282 га лесных культур (24 выдела). Сеянцы с ОКС были высажены на площади 273 га (51 выдел). Большая часть (97,2 %) культур, созданных сеянцами с ЗКС, была посажена в рамках государственного задания.

В соответствии с актуальными Правилами лесовосстановления, утвержденными приказом Минприроды России от 29.12.2021 № 1024, для отнесения к землям, на которых расположены леса, исследуемые лесные культуры должны иметь густоту не менее 2,5 тыс. шт./га,

среднюю высоту — не менее 0,9 м, возраст — не менее 6 лет. Основные результаты исследования приведены в табл. 2.

Средний биологический возраст деревьев в пределах одного элемента несомкнувшихся лесных культур на 1–2 года меньше, чем максимальный возраст соответствующего элемента, поскольку на всех исследуемых участках выполнялось дополнение лесных культур посадочным материалом меньшего возраста, чем возраст прижившихся растений. По нашей оценке, на долю дополненных сеянцев в различных элементах несомкнувшихся лесных культур приходится от 27 до 93 % количества живых растений. Данное обстоятельство повлияло на среднюю высоту деревьев, их диаметр ствола и крон, так как дополненные сеянцы помимо меньшего возраста имеют меньшие размеры, чем деревья, высаженные первоначально.

Средняя высота культур 2019–2022 гг. значительно ниже, чем требуют Правила лесовосстановления, что объясняется малой давностью их создания — всего 3–5 лет, тогда как требуется 6 лет, а также значительной долей дополненных сеянцев. Если бы исследуемые лесные культуры не требовали дополнения или оно осуществлялось бы в меньших объемах, или посадочным материалом того же возраста, что и культивируемые растения, то средняя высота деревьев была бы выше.

Средняя густота обследованных культур с учетом деревьев естественного происхождения и списанных культур старшего возраста варьирует в пределах от 0,3 до 3,4 тыс. шт./га, при среднем значении 1,5 тыс. шт./га. Средняя текущая густота культур, созданных сеянцами с ЗКС, составляет 1,2 тыс. шт./га, с ОКС — 2,1 тыс. шт./га. Максимальное из зафиксированных значений густоты культур сосны обыкновенной наблюдается на участке 10, однако обусловлено оно исключительно самосевом, густота которого нетипично высока (1,5 тыс. шт./га) вследствие близости к стенам леса и наличия на участке деревьев 51-летнего возраста. Данный факт свидетельствует о том, что в условиях района исследований в период с 2019 по 2022 гг. густота посадки 2,0...4,4 тыс. шт./га не обеспечила требуемое количество растений на 1 га.

На семи из одиннадцати участков самосев сосны отсутствовал, еще на трех участках его количество не превышало 45 шт./га. Таким образом, можно заключить, что без искусственного лесовосстановления облесение данных участков не произошло бы, несмотря на то, что с момента пожара прошло 27 лет.

В соответствии с полученными данными для отнесения участков 1–6, 8, 9, 11 к землям,

Т а б л и ц а 2

Таксационная характеристика несомкнувшихся лесных культур

Taxation characteristics of open forest plantations

Номер участка	Состав несомкнувшихся лесных культур	Давность создания, лет	Элемент	Средние значения				Текущая густота, шт./га	Приживаемость, %	Доля дополненных семян, %
				Возраст биологический, лет	Высота, м	Диаметр ствола таксационный, см	Диаметр основания ствола, см			
Несомкнувшиеся лесные культуры, созданные сеянцами с закрытой корневой системой										
1	8С2С	5	8С	6	0,41	–	1,09	736	33,5	30
		20	2С	22	4,04	6,4	–	132	8,8	–
2	5С4С1С	5	5С	6	0,34	–	0,91	800	40,0	60
		9	4С	10	1,22	1,2	3,47	659	54,9	70
		18	1С	20	3,81	5,5	–	243	25,9	–
3	10С	5	10С	5	0,37	–	1,10	1709	51,8	27
4	10С	3	10С	4	0,17	–	0,44	1707	71,1	66
5	10С+С	3	10С	4	0,18	–	0,50	1370	47,2	58
		10	+С	10	1,34	1,1	4,94	42	1,4	59
6	6С4С+С	4	6С	4	0,20	–	0,47	572	26,0	50
		17	4С	19	3,54	4,9	–	462	23,1	63
		–	+С	9	1,10	–	3,17	45	–	–
7	9С1С	3	9С	3	0,13	–	0,35	247	8,8	93
		–	1С	14	2,86	4,4	8,33	16	–	–
Несомкнувшиеся лесные культуры, созданные сеянцами с открытой корневой системой										
8	10С	5	10С	5	0,29	–	0,82	1133	37,0	85
9	10С	5	10С	6	0,59	–	1,70	2324	52,8	72
10	5С5Сед. С	4	5С	5	0,28	–	0,68	1825	58,9	80
		–	5С	10	1,32	0,8	3,29	1524	–	–
		–	ед. С	51	16,2	25,0	–	73	–	–
11	10С+С	3	10С	4	0,35	–	1,09	1444	53,5	70
		–	+С	20	6,75	13,0	–	7	–	–
Примечание. Диаметр таксационный определялся только у деревьев, достигших высоты 1,3 м.										

Примечание. Диаметр таксационный определялся только у деревьев, достигших высоты 1,3 м.

на которых расположены леса, необходимо выполнить очередное дополнение лесных культур. Лесные культуры на участке 7 придется списать и создать здесь новые лесные культуры. Достаточная для отнесения к землям, на которых расположены леса, густота деревьев сосны наблюдается только на участке 10.

В связи с изложенным выше на участках, где не ожидается появление самосева сосны, в частности на крупноплощадных гарях, можно рекомендовать увеличить густоту посадки лесных культур до 5–6 тыс. шт./га. При такой густоте посадки и приживаемости лесных культур 42...50 % деревьев основной древесной породы будет достаточно для отнесения несомкнувшихся лесных культур к землям, на которых расположены леса. Реализация данного предложения позволит сократить количество мероприятий по дополнению лесных культур.

Средняя приживаемость культур сосны, созданных сеянцами с ЗКС, по нашим данным, составляет 39,8 %, а с ОКС — 50,6 %. Расчетное значение U -критерия Манна — Уитни составило 21. Критическое значение $U = 4$ при $\alpha = 0,05$ [23]. Расчетное значение F -критерия для тех же выборок составило 4,44 при критическом значении $F = 8,94$ ($\alpha = 0,05$, односторонний тест) и $p = 0,12$. Нулевая гипотеза не была отклонена в обоих тестах, что указывает на отсутствие статистически значимых различий в средней приживаемости культур, созданных с использованием сеянцев с ЗКС и ОКС в период с 2019 по 2022 гг., а также в дисперсиях исследуемых выборок. Однако данный вывод следует считать предварительным, поскольку объемы выборок довольно малы. Вероятно, при увеличении объема данных результаты могут измениться. Похожие результаты были получены и в других

Т а б л и ц а 3

Текущие приросты по высоте деревьев сосны, см

Current height increments of pine trees, cm

Номер участка	Возраст биологический, лет										
	1+2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Деревья искусственного происхождения, выращенные из семян с закрытой корневой системой											
1	4,8	6,2	6,2	8,7	14,8	24,8	—	—	—	—	—
2	5,7	4,7	5,0	6,5	8,0	14,0	—	—	—	—	—
3	5,9	5,9	10,1	14,8	16,4	22,5	—	—	—	—	—
4	8,2	5,0	5,3	8,3	—	—	—	—	—	—	—
5	8,7	5,2	5,4	9,9	—	—	—	—	—	—	—
6	6,7	5,1	6,1	7,5	—	—	—	—	—	—	—
7	7,8	11,1	14,5	—	—	—	—	—	—	—	—
Среднее значение	6,8	6,2	7,5	9,3	13,1	20,4	—	—	—	—	—
Деревья искусственного происхождения, выращенные из семян с открытой корневой системой											
8	4,7	6,2	8,7	13,5	17,4	25,4	—	—	—	—	—
9	5,3	9,8	11,0	16,7	22,7	33,0	—	—	—	—	—
10	5,9	7,4	9,0	9,3	16,2	—	—	—	—	—	—
11	4,4	8,5	15,3	23,7	—	—	—	—	—	—	—
2	4,5	5,1	7,1	13,1	12,0	13,6	16,0	18,8	23,3	36,8	—
5	7,9	9,5	11,0	14,4	10,3	12,8	17,0	33,4	40,3	34,0	30,1
Среднее значение	5,5	7,8	10,4	15,1	15,7	21,2	16,5	26,1	31,8	35,4	30,1
Деревья естественного происхождения											
7	9,4	13,4	11,6	9,8	14,8	15,4	18,4	26,2	30,0	29,2	27,0
10	6,1	7,4	9,3	11,0	13,3	15,2	16,3	18,1	19,5	20,8	24,6
Среднее значение	7,8	10,4	10,5	10,4	14,1	15,3	17,4	22,2	24,8	25,0	25,8

исследованиях [24–26]. Возможные причины низкой приживаемости семян с ЗКС описаны в работах, посвященных данной теме [27–33].

Сравнить приживаемость семян, посаженных весной и осенью, по нашим данным, нельзя, поскольку приживаемость на момент учета в значительной мере зависела от мероприятий по дополнению, которые могли проводиться не в тот же сезон года, в который изначально создавались лесные культуры.

Помимо наших полевых данных мы проанализировали ведомственные материалы (книга лесных культур) о приживаемости в первый год роста лесных культур, созданных в Ракитовском лесничестве за период с 2019 по 2022 гг. Средняя приживаемость семян с ЗКС составила 50,6 %, с ОКС — 58,4 %. Для оценки различий использовались U -критерий Манна — Уитни и F -критерий. Расчетное значение U -критерия составило 474,5 при критическом значении $U = 466$ ($\alpha = 0,05$). Расчетное значение F -критерия — 1,14, критическое значение для одностороннего теста — $F = 1,75$, $p = 0,337$.

Таким образом, оба критерия не выявили статистически значимых различий в приживаемости лесных культур, созданных с использованием различного посадочного материала, в первый год роста лесных культур, созданных различным посадочным материалом.

Табл. 3 охватывает приросты по высоте за период до 12 лет, поскольку именно для этого возрастного интервала имеются сопоставимые данные по деревьям различного происхождения. Несмотря на то, что деревья естественного происхождения имеют больший возраст, в табл. 3 представлены приросты только за первые 12 лет их роста. Данные табл. 3 свидетельствуют о том, что текущие приросты по высоте деревьев, выросших из семян с ЗКС и ОКС, достаточно близки по значениям приростам деревьев естественного происхождения. Наибольшая разница в приросте по высоте между сеянцами с ОКС и ЗКС (в пользу семян с ОКС) зафиксирована в возрасте деревьев 5 лет — 5,8 см. Наибольшая разница приростов по высоте искусственных деревьев по сравнению

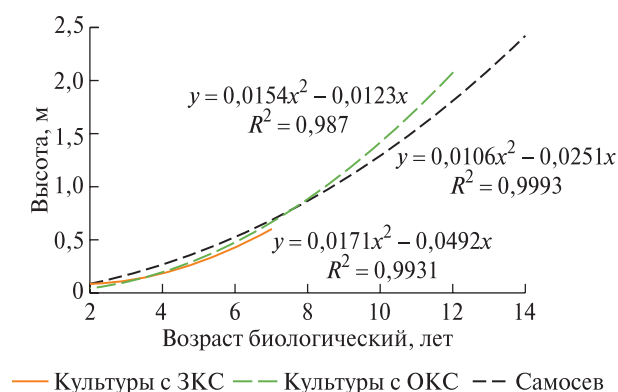


Рис. 3. Ход роста по высоте культур и самосева сосны обыкновенной

Fig. 3. Scots pine crops height growth and self-seeding

с естественными наблюдается в 7-летнем возрасте — 5,1 и 5,9 см для ЗКС и ОКС соответственно.

Текущие приросты за 1-й и 2-й год нельзя рассматривать как величину посадочного материала, так как сеянцы в районе исследований высаживаются обычно с заглублением корневой шейки на 2–5 см. К тому же борозды, в которые посажены деревья, постепенно заносятся песком. В связи с этим определить величину текущих приростов за первые 2 года спустя несколько лет после посадки довольно затруднительно.

Динамика роста по высоте исследуемых элементов несомкнувшихся лесных культур представлена на рис. 3. В первые 2–3 года после посадки наблюдается отставание в росте культивируемых растений от деревьев сосны естественного происхождения. Последнее можно объяснить послепосадочным стрессом растений, высаживаемых на лесокультурную площадь [34]. Культуры сосны, созданные посадочным материалом с ОКС, догоняют и начинают опережать в росте самосев сосны в возрасте 8 лет. Лесные культуры, созданные сеянцами с ЗКС, на момент исследований отстают в росте по высоте, однако не исключено, что в дальнейшем данная тенденция изменится.

На основании данных, представленных на рис. 3, можно утверждать, что в условиях исследуемого типа леса и района исследований культуры сосны достигают высоты, требуемой для отнесения к землям, на которых расположены леса, при среднем биологическом возрасте растений 8 лет. Таким образом, двухлетние сеянцы сосны с ОКС достигают данной высоты через 6 лет после посадки. Однако в случае осуществления повсеместных и регулярных дополнений лесных культур посадочным материалом более младшего возраста, по срав-

нению с сеянцами, посаженными первоначально, сроки перевода несомкнувшихся лесных культур в покрытые лесом земли будут неизбежно сдвигаться. Медленный рост деревьев сосны обусловлен засушливыми условиями района исследований [20, 35].

Средний размер кроны на обследованных участках несомкнувшихся лесных культур варьирует в пределах от 10,2 до 47,8 см (табл. 4). Наименьший диаметр кроны (3...8 см) имеют сеянцы одно- и двухлетнего возраста, посаженные в 2024 и 2023 гг. в рамках мероприятий по дополнению лесных культур. Такие сеянцы на момент исследований еще не успели сформировать первую мутовку. Зачастую они, переживая послепосадочный стресс, сбрасывали длинную хвою, сформированную на питомнике, и на очередном годичном побеге отращивали короткую хвою, длиной 1,5...4,0 см. Наибольший средний диаметр крон, как и следовало ожидать, имеют деревья более старшего возраста.

Замеры диаметров крон осуществлялись в двух направлениях. Это было сделано в целях фиксации, в каком возрасте кроны в рядах культур начинают смыкаться и менять соотношение диаметра кроны вдоль и поперек рядов. Однако исследуемые лесные культуры еще не достигли данного этапа роста. Как видно из данных табл. 4, кроны всех культивируемых деревьев равномерно развиты в двух перпендикулярных направлениях. Единственный элемент несомкнувшихся лесных культур, в котором средние значения диаметра крон в двух перпендикулярных направлениях не равны — это деревья возрастом 14 лет естественного происхождения на участке 7. Кроны этих деревьев вытянуты с севера на юг и перпендикулярно направлению рядов. Однако в связи с их редкой густотой и размещением вне рядов направление рядов на форму крон повлиять не могло. Таким образом, можно сделать вывод о том, что к возрасту 14 лет крона одиноко растущих деревьев сосны в районе исследований вытягивается в направлении с севера на юг для лучшей инсоляции.

На основании данных о среднем диаметре крон деревьев сосны на исследуемых участках было определено проективное покрытие крон. Наибольшее значение данного показателя наблюдается на участке 9 (4,00 %), наименьшее — на участке 7 (0,02 %). Можно констатировать, что проективное покрытие крон на всех исследуемых участках пока мало и этот фактор не имеет большого влияния на окружающую растительность. Однако в дальнейшем следует ожидать, что в более густых лесных культурах, созданных сеянцами с ОКС, лесная среда будет сформирована быстрее.

Т а б л и ц а 4

Диаметр крон деревьев сосны на участках лесных культур

Diameter of pine tree crowns on forest plantation plots

Номер участка	Средний биологический возраст, лет	Диаметр кроны, см				Проективное покрытие крон, %
		Минимальный	Максимальный	Средний		
				вдоль ряда	поперек ряда	
Деревья искусственного происхождения, выращенные из семян с закрытой корневой системой						
1	6	19	63	37,8 ± 2,3	36,2 ± 2,3	0,79
2	6	14	53	29,5 ± 1,7	30,5 ± 1,6	0,57
3	5	4	73	33,6 ± 3,0	34,7 ± 3,0	1,56
4	4	6	41	15,3 ± 0,9	15,4 ± 0,9	0,32
5	4	5	43	16,6 ± 1,2	16,2 ± 1,1	0,29
6	4	7	33	17,4 ± 1,0	17,5 ± 1,2	0,14
7	3	3	33	10,9 ± 1,3	10,2 ± 1,1	0,02
Деревья искусственного происхождения, выращенные из семян с открытой корневой системой						
8	5	3	77	25,5 ± 2,5	25,1 ± 2,4	0,57
9	6	20	76	47,8 ± 2,5	45,9 ± 2,5	4,00
10	5	3	59	20,7 ± 2,1	21,6 ± 2,5	0,64
11	4	8	46	26,2 ± 1,9	25,7 ± 1,8	0,76
2	10	29	159	72,3 ± 5,4	73,9 ± 5,7	2,76
5	10	52	162	89,7 ± 9,7	86,2 ± 8,6	0,25
Деревья естественного происхождения						
7	14	96	220	142,6 ± 6,8	181,4 ± 18,3	0,33
10	10	15	173	73,3 ± 7,5	73,0 ± 7,5	6,40

Кроме того, на участке 3 было зафиксировано значительное количество растений с аномальной морфологией — 41 % всех живых растений. Аномалиями мы считали многовершинность, форму кроны в виде перевернутого зонтика, наличие пучков чрезмерно крупной хвои (ширина 2,7 мм, длина 10,1 см). Для сравнения: на участках 4, 5, 8 доля растений с аномалиями составила 26, 24 и 15 % соответственно. Также на многих участках отмечалось наличие двух приростов за один вегетационный период. Проблема аномальной морфологии деревьев сосны в лесных культурах, созданных сеянцами с ОКС и ЗКС, может быть предметом дальнейшей изучения.

Для крупноплощадных гарей района исследований предпочтительным способом лесовосстановления должен оставаться искусственный, поскольку самосев сосны не накапливается в достаточном количестве вдали от стен леса и деревьев-обсеменителей, обеспечивающих налет семян и подходящий микроклимат.

С учетом отсутствия выявленных преимуществ у лесных культур, созданных с использованием сеянцев с закрытой корневой системой (по показателям приживаемости, густоты, хода роста и длительности лесокультурного периода), в условиях степной зоны Алтайского края

более целесообразным представляется применение посадочного материала с открытой корневой системой, обладающего при этом и меньшей себестоимостью.

Выводы

1. В условиях степной зоны Алтайского края приживаемость культур сосны обыкновенной, созданных с применением сеянцев с ЗКС и ОКС, статистически не различается при уровне значимости 0,05, несмотря на различие в средних значениях (39,8 и 50,6 % соответственно).

2. Установлено, что многократное дополнение несомкнувшихся лесных культур более молодыми растениями снижает средние значения таксационных показателей и откладывает отнесение таких участков к землям, на которых расположены леса.

3. На большинстве участков выявлена недостаточная густота лесных культур (менее 2,5 тыс. шт./га), что обосновывает необходимость увеличения проектной густоты посадки до 5–6 тыс. шт./га на крупноплощадных гарях.

4. К восьмилетнему возрасту культуры, созданные сеянцами с ОКС, начинают опережать в росте самосев сосны. На ранних этапах роста зафиксировано их отставание, обусловленное послепосадочным стрессом.

5. Средние размеры крон деревьев искусственного происхождения в возрасте 3–6 лет варьируют от 10,2 до 47,8 см, при этом смыкание крон в рядах культур не отмечено.

6. На основании совокупной оценки приживаемости, роста и густоты лесных культур в условиях степной зоны Алтайского края более перспективным признано использование сеянцев с ОКС вместо ЗКС.

7. Подтверждено, что естественное возобновление сосны в условиях ленточных боров эффективно лишь вблизи к источникам обсеменения. На крупноплощадных гарях района исследований предпочтительным остается искусственный способ лесовосстановления.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-76-00009, <https://rscf.ru/project/24-76-00009/>

Список литературы

- [1] Campo A.D., Segura-Orenga G., Bautista I., Ceacero C.J., González-Sanchis M., Molina A.J., Hermoso J. Assessing reforestation failure at the project scale: The margin for technical improvement under harsh conditions. A case study in a Mediterranean Dryland // *Science of The Total Environment*, 2021, v. 796, p. 148952. DOI 10.1016/j.scitotenv.2021.148952
- [2] Perez-Silos I., Alvarez-Martinez J.M., Barquin J. Large-scale afforestation for ecosystem service provisioning: learning from the past to improve the future // *Landscape Ecology*, 2021, v. 36, pp. 3329–3343. DOI 10.1007/s10980-021-01306-7
- [3] Preece N.D., Oosterzee P., Lawes M.J. Reforestation success can be enhanced by improving tree planting methods // *J. of Environmental Management*, 2023, v. 336, p. 117645. DOI 10.1016/j.jenvman.2023.117645
- [4] Montagnoli A., Lasserre B., Terzaghi M., Byambadorj S.-O., Nyam-Osor B., Scippa G.S., Chiatante D. Fertilization reduces root architecture plasticity in *Ulmus pumila* used for afforesting Mongolian semi-arid steppe // *Frontiers in Plant Science*, 2022, v. 13, p. 878299. DOI 10.3389/fpls.2022.878299
- [5] Казаков В.И., Проказин Н.Е., Мартынюк А.А., Лобанова Е.Н., Казаков И.В., Дручинин Д.Ю. Создание культур сосны сеянцами с открытой и закрытой корневой системой на горельнике в лесостепной зоне // *Лесохозяйственная информация*, 2023. № 4. С. 53–60.
- [6] Трегубов О.В., Лактионов А.П., Мизин Ю.А., Цепляев А.Н., Корнеев А.Б., Похваленко В.А., Вариводина И.Н., Трегубова А.О. Приживаемость и сохранность лесных культур сосны обыкновенной, высаженной с закрытой корневой системой в условиях лесостепной зоны европейской части Российской Федерации // *Астраханский вестник экологического образования*, 2023. № 3 (75). С. 152–161.
- [7] Dimitrova A., Balzano A., Tsedensodnom E., Byambadorj S.-O., Nyam-Osor B., Scippa G.S., Merela M., Chiatante D., Montagnoli A. The adaptability of *Ulmus pumila* and the sensitivity of *Populus sibirica* to semi-arid steppe is reflected in the stem and root vascular cambium and anatomical wood traits // *Frontiers in Plant Science*, 2024, v. 15, p. 1393245. DOI 10.3389/fpls.2024.1393245
- [8] Campo A.D., Segura-Orenga G., Ceacero C.J., González-Sanchis M., Molina A.J., Reyna S., Hermoso J. Reforesting drylands under novel climates with extreme drought filters: The importance of trait-based species selection // *Forest Ecology and Management*, 2020, v. 467, p. 118156. DOI 10.1016/j.foreco.2020.118156
- [9] Beck H.E., McVicar T.R., Vergopolan N., Berg A., Lutsko N.J., Dufour A., Zeng Z., Jiang X., Dijk A.I.J.M., Miralles D.G. High-resolution (1 km) Köppen-Geiger maps for 1901–2099 based on constrained CMIP6 projections // *Scientific Data*, 2023, v. 10, p. 724. DOI: 10.1038/s41597-023-02549-6
- [10] Vacek Z., Vacek S., Cukor J. European forests under global climate change: Review of tree growth processes, crises and management strategies // *J. of Environmental Management*, 2023, v. 332, p. 117353. DOI 10.1016/j.jenvman.2023.117353
- [11] Manaenkov A. Basic principles and technologies for planted forests and nature-oriented forests in arid conditions // *BIO Web of Conferences*, 2024, v. 145, p. 01006. DOI 10.1051/bioconf/202414501006
- [12] Винокуров Ю.И., Краснорова Б.А., Харламова Н.Ф., Плуталова Т.Г., Шарабарина С.Н. Районирование территории Алтайского края по степени проявления климатических рисков // *Вестник Забайкальского государственного университета*, 2024. Т. 30. № 2. С. 8–20.
- [13] 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
- [14] Малиновских А.А., Савин М.А. Естественное лесовосстановление на гарях в ленточных борах Западной Сибири // *Хвойные бореальной зоны*, 2019. Т. 37. № 3–4. С. 223–228.
- [15] Башегуров К.А., Малиновских А.А., Савин М.А., Годовалов Г.А. Специфика накопления подроста на гарях в различных лесорастительных подзонах ленточных боров Алтая // *Леса России и хозяйство в них*, 2020. № 1 (72). С. 4–14.
- [16] 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.
- [17] 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
- [18] Майсснер Р., Рупп Х., Шмидт Г., Бондарович А.А., Щербинин В.В., Понькина Е.В., Мащора А.В., Рудев Н.В., Кожанов Н.А., Пузанов А.В., Балыкин Д.Н. Агроклиматический мониторинг сухой степи Алтайского края // *География и природопользование Сибири*, 2017. № 23. С. 121–139.
- [19] Малиновских А.А. Степень развития растительного покрова в разных типах лесорастительных усло-

- вий 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
- [20] Беховых Ю.В., Беховых Л.А. Параметры компенсации почвенного влагодефицита при посадке сеянцев *Pinus sylvestris* L. с закрытой корневой системой на гарях ленточных боров // Природообустройство, 2023. № 1. С. 122–128.
- [21] Беховых Ю.В., Беховых Л.А., Олешко В.П. Почвенные запасы влаги на гарях соснового бора в сухостепной климатической зоне Алтайского края и параметры орошения для искусственного лесовосстановления // Вестник Алтайского государственного аграрного университета, 2022. № 2 (208). С. 33–41.
- [22] 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
- [23] Сидоренко Е.В. Методы математической обработки в психологии. Санкт-Петербург: Речь, 2007. 349 с.
- [24] Гоф А.А., Жигулин Е.В., Залесов С.В., Оплетав А.С. Опыт создания лесных культур сеянцами с закрытой корневой системой на гарях Алтайского края // Международный научно-исследовательский журнал, 2019. № 12–2 (90). С. 125–130. DOI 10.23670/IRJ.2019.90.12.073
- [25] Socha J., Orzel S., Ochal W., Pietrzykowski M. Effect of seedling production method on the growth of *Pinus sylvestris* L. on reclaimed post-industrial sites in Poland // Dendrobiology, 2022, v. 88, pp. 124–137. DOI 10.12657/denbio.088.009
- [26] Гаврилова О.И., Грязькин А.В., Пак К.А., Го Л., Чэн Т. Особенности структуры молодняков, сформировавшихся на участках лесных культур // Хвойные бореальной зоны, 2023. Т. XLI. №. 2. С. 133–138.
- [27] Гоф А.А., Жигулин Е. В., Залесов С.В. Причины низкой приживаемости сеянцев сосны обыкновенной с закрытой корневой системой в ленточных борах Алтая // Успехи современного естествознания, 2019. № 12. С. 9–13.
- [28] Дебков Н.М. Опыт создания лесных культур посадочным материалом с закрытой корневой системой // Изв. вузов Лесной журнал, 2021. № 5. С. 192–200.
- [29] Маленко А.А., Чичкарев А.С., Завалишин С.И., Малиновских А.А., Курсикова Е.С. Выращивание лесных культур сосны с закрытой корневой системой в условиях степи на юге Западной Сибири // Лесохозяйственная информация, 2023. № 3. С. 103–116.
- [30] Данчева А.В., Залесов С.В., Половникова Д.А. Влияние субстрата на биометрические показатели сеянцев сосны обыкновенной с закрытой корневой системой // Леса России и хозяйство в них, 2023. № 4 (87). С. 94–104.
- [31] South D.B., Starkey T.E., Lyons A. Why healthy pine seedlings die after they leave the nursery // Forests, 2023, v. 14, no. 3, pp. 645. DOI 10.3390/f14030645
- [32] Ильинцев А.С., Наквасина Е.Н. Приживаемость и рост лесных культур, созданных сеянцами с закрытой корневой системой механизированным и ручным способами в Двинско-Вычегодском лесном районе // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства, 2024. № 2. С. 79–88.
- [33] Collet C., Agro C., Akroume E., Bello J., Berthelot A., Boulanger V., Calas A., Dumas N., Pitaud J., Puyal M., Vast F. Mechanical site preparation severity mediates one-year-survival response to summer drought in planted tree seedlings // New Forests, 2024, v. 55, pp. 1581–1594. DOI 10.1007/s11056-024-10050-0
- [34] Pikkariainen L., Luoranen J., Peltola H. Early field performance of small-sized silver birch and scots pine container seedlings at different planting depths // Forests, 2021, v. 12, no. 5, p. 519. DOI 10.3390/f12050519
- [35] Zlobin I.E. Linking the growth patterns of coniferous species with their performance under climate aridization // Science of The Total Environment, 2022, v. 831, p. 154971. DOI 10.1016/j.scitotenv.2022.154971

Сведения об авторах

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

Осипенко Регина Александровна — канд. с.-х. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (УГЛТУ), osipenkora@m.usfeu.ru

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

Поступила в редакцию 10.02.2025.

Одобрено после рецензирования 25.03.2025.

Принята к публикации 21.05.2025.

EXPERIENCE IN PLANTING SCOTS PINE (*PINUS SYLVESTRIS* L.) USING CONTAINERIZED ROOT-BALLED SEEDLINGS IN ALTAI REGION STEPPE ZONE

A.E. Osipenko✉, R.A. Osipenko, S.V. Zalesov

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

osipenkoae@m.usfeu.ru

The article presents results of studying the survival ability and growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) open communities created with planting material with root-balled and bare-root tree systems. The study establishes that, in conditions of the dry forest on gentle slopes, the survival rate of forest plantations created by various planting materials does not differ statistically. The study shows that in the conditions of the trial plot forest plantations are repeatedly supplemented. This leads to a postponement of the assignment of open forest plantations to the plots on which forests are located. It is recommended to increase the density of forest crop planting to 5–6 thousand pcs/ha, since the density of planting from 2,0 to 4,4 thousand pcs/ha does not allow the density of the Scots pine to exceed 2,5 thousand pcs/ha six years after planting. The growth progress graphs of artificial and natural trees growing in the trial plots were drawn. It is indicated that up to the age of eight years artificial forest plantations lag behind the trees of natural origin considering their height, but at older ages they are ahead of them in this indicator. It was revealed that there is no natural seeding of pine in seven of the eleven plots of open forest plantations; its number does not exceed 45 pcs/ha in three plots, and only in the plot adjacent to the forest edge, the number of self-seeding is 1,5 thousand pcs/ha. The average crown diameters and basic wood increment of pine trees of various origins have been determined. It is recommended not to use containerized root-balled seedlings in the Altai Region steppe zone in favor of bare root seedlings.

Keywords: forest plantations, *Pinus sylvestris*, containerized root-balled seedling, survival rate, growth, ribbon forest, steppe zone

Suggested citation: Osipenko A.E., Osipenko R.A., Zalesov S.V. *Proizvodstvennyy opyt sozdaniya kul'tur sosny obyknovennoy (Pinus sylvestris L.) seyantsami s zakrytoy kornevoy sistemoy v usloviyakh stepnoy zony Altayskogo kraya* [Experience in planting Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) using containerized root-balled seedlings in Altai region steppe zone]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 4, pp. 5–18.

DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-5-18

References

- [1] Campo A.D., Segura-Orenga G., Bautista I., Ceacero C.J., González-Sanchis M., Molina A.J., Hermoso J. Assessing reforestation failure at the project scale: The margin for technical improvement under harsh conditions. A case study in a Mediterranean Dryland. *Science of The Total Environment*, 2021, v. 796, p. 148952. DOI 10.1016/j.scitotenv.2021.148952
- [2] Perez-Silos I., Alvarez-Martinez J.M., Barquin, J. Large-scale afforestation for ecosystem service provisioning: learning from the past to improve the future. *Landscape Ecology*, 2021, v. 36, pp. 3329–3343. DOI 10.1007/s10980-021-01306-7
- [3] Preece N.D., Oosterzee P., Lawes M.J., Reforestation success can be enhanced by improving tree planting methods. *J. of Environmental Management*, 2023, v. 336, p. 117645. DOI 10.1016/j.jenvman.2023.117645
- [4] Montagnoli A., Lasserre B., Terzaghi M., Byambadorj S-O., Nyam-Osor B., Scippa G.S., Chiatante D. Fertilization reduces root architecture plasticity in *Ulmus pumila* used for afforesting Mongolian semi-arid steppe. *Frontiers in Plant Science*, 2022, v. 13, p. 878299. DOI 10.3389/fpls.2022.878299
- [5] Kazakov V. I., Prokazin N. E., Martynyuk A. A., Lobanova E.N., Kazakov I.V., Druchinin D.Yu. *Sozdanie kul'tur sosny seyantsami s otkrytoy i zakrytoy kornevoy sistemoy na gorel'nike v lesostepnoy zone* [Creation of Common Pine Crops by Seedlings with Open and Closed Root Systems on the Mountain Range in the Forest-Steppe Zone]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 2023, no. 4, pp. 53–60.
- [6] Tregubov O.V., Laktionov A.P., Mizin Yu.A., Tseplyaev A.N., Korneev A.B., Pokhvalenko V.A., Varivodina I.N., Tregubova A.O. *Prizhivaemost' i sokhrannost' lesnykh kul'tur sosny obyknovennoy, vysazhennoy s zakrytoy kornevoy sistemoy v usloviyakh lesostepnoy zony evropeyskoy chasti Rossiyskoy Federatsii* [Survival and safety of forest crops of scott pine, planted with a closed root system in the conditions of the forest-steppe zone of the european part of the Russian Federation]. *Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya* [Astrakhan Bulletin for Environmental Education], 2023, no. 3 (75), pp. 152–161. DOI 10.36698/2304-5957-2023-3-152-161
- [7] Dimitrova A., Balzano A., Tsedensodnom E., Byambadorj S-O., Nyam-Osor B., Scippa G.S., Merela M., Chiatante D., Montagnoli A. The adaptability of *Ulmus pumila* and the sensitivity of *Populus sibirica* to semi-arid steppe is reflected in the stem and root vascular cambium and anatomical wood traits. *Frontiers in Plant Science*, 2024, v. 15, p. 1393245. DOI 10.3389/fpls.2024.1393245
- [8] Campo A.D., Segura-Orenga G., Ceacero C.J., González-Sanchis M., Molina A.J., Reyna S., Hermoso J. Reforesting drylands under novel climates with extreme drought filters: The importance of trait-based species selection. *Forest Ecology and Management*, 2020, v. 467, p. 118156. DOI 10.1016/j.foreco.2020.118156

- [9] Beck H.E., McVicar T.R., Vergopolan N., Berg A., Lutsko N.J., Dufour A., Zeng Z., Jiang X., Dijk A.I.J.M., Miralles D.G. High-resolution (1 km) Köppen-Geiger maps for 1901–2099 based on constrained CMIP6 projections. *Scientific Data*, 2023, v. 10, p. 724. DOI: 10.1038/s41597-023-02549-6
- [10] Vacek Z., Vacek S., Cukor J. European forests under global climate change: Review of tree growth processes, crises and management strategies. *J. of Environmental Management*, 2023, v. 332, p. 117353. DOI 10.1016/j.jenvman.2023.117353
- [11] Manaenkov A. Basic principles and technologies for planted forests and nature-oriented forests in arid conditions. *BIO Web of Conferences*, 2024, v. 145, p. 01006. DOI 10.1051/bioconf/202414501006
- [12] Vinokurov Yu.I., Krasnoyarova B.A., Kharlamova N.F., Plutalova T.G., Sharabarina S.N. *Rayonirovanie territorii Altayskogo kraya po stepeni proyavleniya klimaticheskikh riskov* [Zoning of the Altai Region territory according to the degree of climate risks]. *Vestnik Zabaykal'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Transbaikalian State University Journal], 2024, v. 30, no. 2, pp. 8–20.
- [13] 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
- [14] Malinovskikh A.A., Savin M.A. *Estestvennoe lesovosstanovlenie na garyakh v lentochnykh borakh Zapadnoy Sibiri* [Natural reforestation of burned areas in pine forests of Western Siberia]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the boreal area], 2019, v. 37, no. 3–4, pp. 223–228.
- [15] 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]. *Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh* [Forests of Russia and the economy in them], 2020, no. 1 (72), pp. 4–14.
- [16] 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]. *Yekaterinburg, USFEU Publ.*, 2023, 357 p.
- [17] Osipenko A.E., Zalesov S.V. *Obespechennost' podrostom sosnovykh nasazhdeniy Altae-Novosibirskogo rayona le-sostepey 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
- [18] Mayssner R., Rupp Kh., Shmidt G., Bondarovich A.A., Shcherbinin V.V., Pon'kina E.V., Matsyura A.V., Rudev N.V., Kozhanov N.A., Puzanov A.V., Balykin D.N. *Agroklimaticheskii monitoring sukhoy stepi Altayskogo kraya* [Agroclimatic monitoring in the dry steppe area of Altai krai]. *Geografiya i prirodopol'zovanie Sibiri* [Geography and nature management in Siberia], 2017, no. 23, pp. 121–139.
- [19] 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 region]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 4, pp. 43–51. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-4-43-51
- [20] Bekhovyykh Yu.V., Bekhovyykh L.A. *Parametry kompensatsii pochvennogo vlagodefitsita pri vysadke seyantsev Pinus sylvestris L. s zakrytoy kornevoy sistemoy na garyakh lentochnykh borov* [Parameters of compensation of soil moisture deficiency when planting *Pinus sylvestris* L. seedlings with a closed root system on the burns of ribbon hogs]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], 2023, no. 1, pp. 122–128.
- [21] Bekhovyykh Yu.V., Bekhovyykh L.A., Oleshko V.P. *Pochvennyye zapasy vlagi na gari sosnovogo bora v sukhostepnoy klimaticheskoy zone Altayskogo kraya i parametry orosheniya dlya iskusstvennogo lesovosstanovleniya* [Soil moisture holding of a burnt pine forest in the drysteppe climatic zone of the Altai region and irrigation parameters for artificial reforestation]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Altai State Agricultural University], 2022, no. 2 (208), pp. 33–41.
- [22] 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
- [23] Sidorenko E.V. *Metody matematicheskoy obrabotki v psikhologii* [Mathematical methods in psychology]. S.-Peterburg: Rech Publ., 2007, 349 p.
- [24] Gof A.A., Zhigulin E.V., Zalesov S.V., Opletaev A.S. *Opyt sozdaniya lesnykh kul'tur seyantsami s zakrytoy kornevoy sistemoy na garyakh Altayskogo kraya* [Experience in forest crops creation by seedlings with closed roots on burnt spot of Altai krai]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International research journal], 2019, no. 12–2 (90), pp. 125–130. DOI 10.23670/IRJ.2019.90.12.073
- [25] Socha J., Orzel S., Ochal W., Pietrzykowski M. Effect of seedling production method on the growth of *Pinus sylvestris* L. on reclaimed post-industrial sites in Poland. *Dendrobiology*, 2022, v. 88, pp. 124–137. DOI 10.12657/denbio.088.009
- [26] Gavrilova O.I., Gryaz'kin A.V., Pak K.A., Go L., Chen T. *Osobennosti struktury molodnyakov, sformirovavshikhsya na uchastkakh lesnykh kul'tur* [Peculiarities of the structure of young stands formed on forest plantation plots]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the boreal area], 2023, v. XLI, no. 2, pp. 133–138.
- [27] Gof A.A., Zhigulin E. V., Zalesov S.V. *Prichiny nizkoy prizhivaemosti seyantsev sosny obyknovennoy s zakrytoy kornevoy sistemoy v lentochnykh borakh Altaya* [Reasons of low survival rate of common pine seedlings with a closed root system in Altay strip-pine forests]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in current natural sciences], 2019, no. 12, pp. 9–13.

- [28] Debkov N.M. Opyt sozdaniya lesnykh kul'tur posadochnym materialom s zakrytoy kornevoy sistemoy [Experience in the creation of forest plantations using container seedlings]. Russian forestry journal, 2021, no. 5, pp. 192–200.
- [29] Malenko A.A., Chichkarev A.S., Zavalishin S.I., Malinovskikh A.A., Kursikova E.S. *Vyrashchivanie lesnykh kul'tur sosny s zakrytoy kornevoy sistemoy v usloviyakh stepi na yuge Zapadnoy Sibiri* [Growing forest crops of pine with a closed root system in the steppe in the south of Western Siberia]. Lesokhozyaystvennaya informatsiya [Forestry information], 2023, no. 3, pp. 103–116.
- [30] Dancheva A.V., Zalesov S.V., Polovnikova D.A. *Vliyaniye substrata na biometricheskie pokazateli seyantssev sosny obyknovennoy s zakrytoy kornevoy sistemoy* [The effect of the substrate on the biometric parameters of seedlings of scots pine with a closed root system]. Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh [Forests of Russia and the economy in them], 2023, no. 4 (87), pp. 94–104.
- [31] South D.B., Starkey T.E., Lyons A. Why healthy pine seedlings die after they leave the nursery. Forests, 2023, v. 14, no. 3, pp. 645. DOI 10.3390/f14030645
- [32] Il'intsev A.S., Nakvasina E.N. *Prizhivaemost' i rost lesnykh kul'tur, sozdannykh seyantsami s zakrytoy kornevoy sistemoy mekhanizirovannym i ruchnym sposobami v Dvinsko-Vychegodskom lesnom rayone* [Survival and growth of forest crops planted with containerized seedlings by mechanized and manual methods in the Dvinsko-Vychegodsky forest district]. Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva [Proceedings of the Saint Petersburg forestry research institute], 2024, no. 2, pp. 79–88.
- [33] Collet C., Agro C., Akroume E., Bello J., Berthelot A., Boulanger V., Calas A., Dumas N., Pitaud J., Puyal M., Vast F. Mechanical site preparation severity mediates one-year-survival response to summer drought in planted tree seedlings. New Forests, 2024, v. 55, pp. 1581–1594. DOI 10.1007/s11056-024-10050-0
- [34] Pikkarainen L., Luoranen J., Peltola H. Early field performance of small-sized silver birch and scots pine container seedlings at different planting depths. Forests, 2021, v. 12, no. 5, p. 519. DOI 10.3390/f12050519
- [35] Zlobin I.E. Linking the growth patterns of coniferous species with their performance under climate aridization. Science of The Total Environment, 2022, v. 831, p. 154971. DOI 10.1016/j.scitotenv.2022.154971

The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-76-00009, <https://rscf.ru/project/24-76-00009/>

Authors' information

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

Osipenko Regina Aleksandrovna — Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the Ural State Forestry University, osipenkoae@m.usfe.ru

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

Received 10.02.2025.

Approved after review 25.03.2025.

Accepted for publication 21.05.2025.

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

СОСНА СИБИРСКАЯ КЕДРОВАЯ (*PINUS SIBIRICA* DU TOUR) В СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ РОССИИ: ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Н.В. Танцырев, Н.С. Иванова[✉], Г.В. Андреев, И.В. Петрова

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

i.n.s@bk.ru

Представлены результаты анализа современных исследований сосны сибирской кедровой (*Pinus sibirica* Du Tour) за период 2018–2022 гг. Рассмотрено 257 публикаций. Выявлена высокая и стабильная публикационная активность. Установлены основные направления исследований, в частности: естественное и искусственное возобновление, семеношение, интродукция, структура древостоев и динамика кедровых лесов, восстановительные и климатогенные сукцессии, генетика и селекция, палеоботаника, инвазии вредителей и болезней, геоботаническое направление, взаимосвязи с животным миром, проблемы дистанционного зондирования и разработка GIS-технологий. Показано, что во многих публикациях наряду с традиционными методами применены новые подходы к исследованиям и анализу данных. Доказан недостаток исследований, посвященных естественному возобновлению сосны сибирской кедровой на нарушенных техногенных территориях и ее взаимоотношений с тонкоклювой кедровкой. Выявлена необходимость совершенствования лесохозяйственных мероприятий на основе региональных и лесотипологических особенностей лесовозобновления. Рекомендуются использовать результаты исследований для сохранения и воспроизводства кедровых лесов.

Ключевые слова: *Pinus sibirica*, сосна сибирская, направления исследований

Ссылка для цитирования: Танцырев Н.В., Иванова Н.С., Андреев Г.В., Петрова И.В. Сосна сибирская кедровая (*Pinus sibirica* Du Tour) в современных исследованиях России: литературный обзор // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 4. С. 19–38. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-19-38

Сосна сибирская кедровая (*Pinus sibirica* Du Tour) или кедр сибирский — истинно национальное дерево России, в пределах которой расположена наибольшая (95 %) часть ее ареала. Сосна сибирская кедровая принадлежит роду *Pinus* L. — подрод пятихвойных сосен секции *Cembra* Spach. Данный древесный вид распространен от Республики Коми и северо-востока Пермского края до юго-востока Республики Саха (Якутия), низовий Енисея на севере и Монголии на юге [1]. Экологическая амплитуда почвенных, климатических, гидрологических условий произрастания сосны сибирской кедровой сравнительно широка. В оптимальных условиях данный древесный вид является крупным деревом, способным достигать высоты 45 м и диаметра ствола 2 м, а в горах, у верхней границы своего произрастания, она принимает кустарниковую стелящуюся форму высотой около 3 м. Продолжительность жизни превышает 500 лет и может достигать 800 лет [2, 3]. Благоприятными для произрастания сосны сибирской кедровой считаются

хорошо дренированные подзолистые суглинистые достаточно увлажненные почвы, хотя дерево может также произрастать и на песчаных, торфяных болотных почвах и на скалах [1, 4–7]. При этом влажность воздуха важнее для роста всходов, чем влажность и плодородие почвы [7–9].

В результате изучения межпопуляционной аллозимно-генетической структуры популяций сосны сибирской кедровой установлено, что дифференциация популяции в пределах отдельных географических районов в 3 раза выше, нежели между популяциями разных районов [10–12]. Генетического разнообразия и дифференциации среди малочисленных изолированных насаждений на границе ареала не наблюдается [13].

Значение кедровых лесов многогранно. Они выполняют важные средообразующие и климаторегулирующие функции, являются средой обитания для многих представителей фауны. Крупные семена сосны сибирской (кедровый орех) представляют собой ценный пищевой и кормовой продукт. Кроме того, семена, хвоя и живица применяется в медицине, а древесина высоко ценится.

В связи с интенсивным промышленным освоением девственных лесов Урала и Сибири, в том числе проведением сплошных концентрированных рубок древостоев, в области научных исследований проблема скорейшего восстановления кедровников приобрела широкую актуальность. Еще в прошлом веке детально и разносторонне изучались вопросы формирования, количественной и качественной оценки урожая семян [14–17], многолетней динамики семеношения [18–23] и естественного возобновления [2, 4, 6, 9, 19, 24–30] сосны сибирской кедровой в различных регионах произрастания. В этих работах описана обширная вариабельность успешности естественного возобновления сосны сибирской кедровой под пологом древостоев, на гарях и вырубках.

Одним из коренных экологических отличий данного древесного вида, а также других близкородственных видов пятихвойных сосен с бескрылыми семенами, от других лесообразующих видов является зоохория семян (точнее — орнитохория), т. е. их разнос тонкоклювой кедровкой (*Nucifraga caryocatactes macrorhynchos* Brehm) в целях создания кормовых запасов, иногда на значительные расстояния от источников семян. Несмотря на общепризнанность этого факта и изученность биологии кедровки, работ, посвященных ее взаимоотношениям с сосной сибирской кедровой и влиянием на ее последующее возобновление, крайне мало [20, 31, 32]. Гипотетически высказано предположение об избирательном заносе семян кедровкой в конкретный тип почвенного субстрата с определенными условиями экотопа [6, 27, 30, 33, 34], однако детально это почти не изучалось. Одновременно с возобновлением большой интерес вызывали вопросы интродукции и селекции кедра сибирского [28, 35].

Значимость сосны сибирской кедровой и необходимость сохранения и восстановления кедровых лесов стимулирует дальнейшие более детальные исследования. В целом, в настоящее время имеется множество публикаций, однако представленная в них информация не систематизирована, что осложняет ее эффективное применение в целях использования, сохранения и восстановления кедровых лесов.

Цель работы

Цель работы — проведение систематического обзора современных исследований (с 2018 по 2022 гг.), посвященных сосне сибирской кедровой (*Pinus sibirica*) и выявление приоритетных направлений выполненных исследований, наиболее значимых трудов авторов, а также конкретизация проблем, остающихся до сих пор малоизученными.

Материалы и методы

При проведении данного исследования были использованы такие руководства как PRISMA [36] и руководство по проведению исследований в области экологии [37]. В качестве поискового запроса выбраны «*Pinus sibirica*», «*сосна сибирская*». Поиск информации осуществлялся по базе данных E-library и был ограничен периодом 2018–2022 гг. Сбор данных проводился с января по март 2023 г., при этом общее количество изученных записей составило 680 (рис. 1).

Обязательным условием отбора статей из журналов, монографий и глав из монографий для систематического обзора был контроль их качества. Тезисы и материалы конференций исключались из анализа. Данные извлекались вручную и заносились в электронную таблицу Excel. После исключения дублирующихся записей общее количество отобранных публикаций составило 257. Использование руководства PRISMA [36] и руководства по научным исследованиям в области экологии [37], а также указанные критерии отбора и контроль качества позволили провести научный анализ и достичь поставленной цели.

Результаты и обсуждение

Распределение публикаций по годам — важная составляющая библиографического анализа, которая позволяет получить информацию о динамике научных исследований. В ходе анализа было установлено, что интенсивность публикационной активности сохраняет стабильность: количество публикаций по годам изменяется незначительно, не имеет скачков и спадов. При этом, к сожалению, увеличения количества публикаций за последние 5 лет не наблюдается (рис. 2).

Анализ направлений исследований показал, что сосна сибирская кедровая исследуется с самых разных точек зрения, а спектр научных тематик достаточно широк, имеются также комплексные исследования (рис. 3).

Основное внимание уделяется проблемам выращивания данного древесного вида. Наибольшее количество исследований посвящено культурам сосны сибирской кедровой (29 публикаций за период 2018–2022 гг.), интродукции и озеленению (26 публикаций), а также естественному возобновлению (8 публикаций). Большинство исследований посвящено оценке состояния культур сосны сибирской кедровой, в том числе под пологом древостоев [38]. Успешный их рост и развитие отмечается не только в границах ее современного ареала, но и за его



Рис. 1. Схема систематического обзора
Fig. 1. Scheme of the systematic review

пределами [39–41]. При этом в некоторых случаях было выявлено регулярное семеношение и появление уже естественного возобновления [40], что позволяет сделать важный для лесного хозяйства вывод о расширении ареала данного ценного древесного растения.

При планировании создания культур сосны сибирской кедровой за пределами ее естественного ареала, как сообщают некоторые авторы [40–42], необходимо учитывать географическое происхождение семян и посадочного материала. Так, выявлена следующая тенденция: чем восточнее и севернее происхождение семян — тем хуже рост и сохранность культур [42], созданных в европейской части России. Создание подполовых культур сосны сибирской кедровой в сочетании с первым приемом постепенных рубок исключает разрастание травянистой растительности и обеспечивает лучшую сохранность подроста [43].

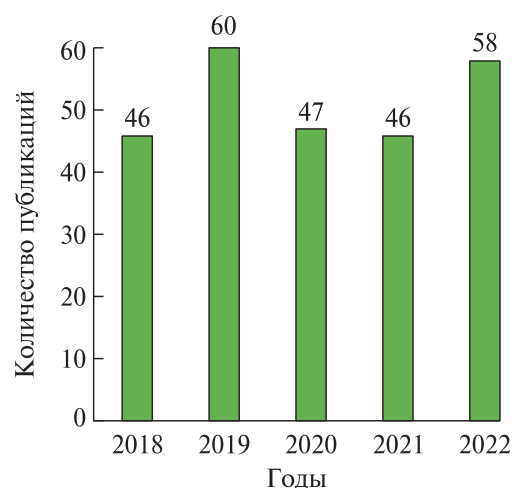


Рис. 2. Распределение по годам количества публикаций, посвященных сосне сибирской кедровой
Fig. 2. Distribution by year of the number of publications on Siberian stone pine

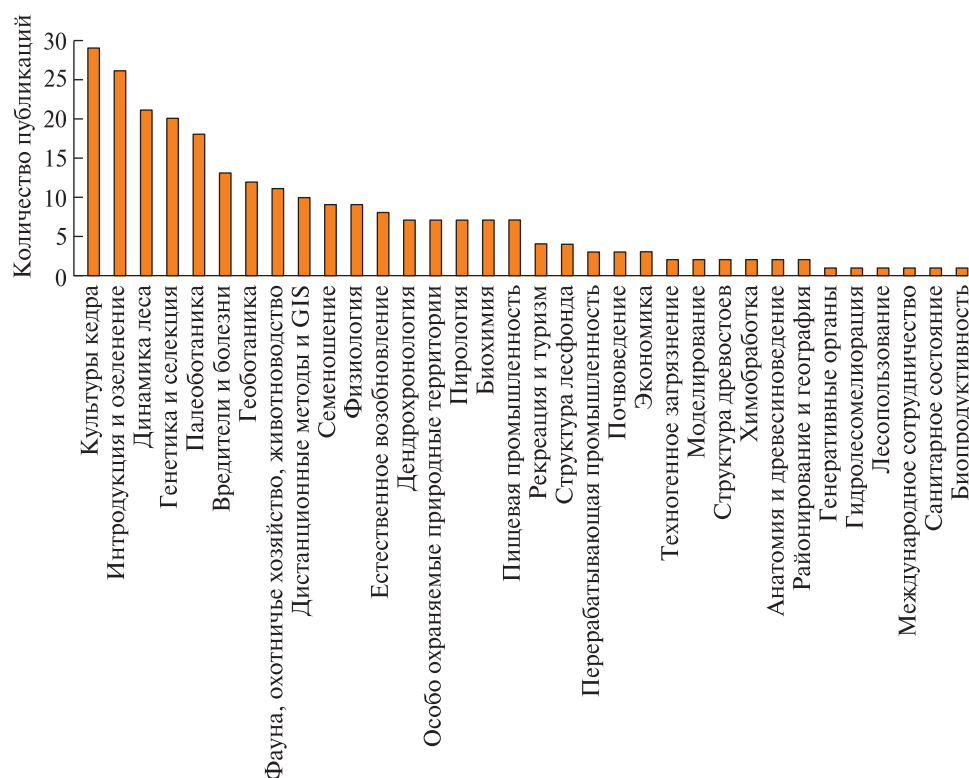


Рис. 3. Распределение публикаций по направлениям исследований

Fig. 3. Distribution of publications by research areas

Некоторые работы [44–48] подтверждают давно назревшую необходимость разработки индивидуальных требований к технологии создания культур сосны сибирской кедровой, а также к количеству, кратности и периодичности уходов в них. Отдельно можно отметить исследования, направленные на выявление причин ослабления культур сосны сибирской кедровой и условий их лучшего роста и развития [44, 45, 49].

В большинстве работ, посвященных естественному возобновлению сосны сибирской кедровой, дается традиционная количественная оценка успешности появления подроста и его роста на гарях, вырубках и под пологом коренных и производных древостоев в различных типах леса Западной Сибири [50–52], Восточной Сибири [53] и Урала [54]. Особого внимания заслуживают исследования, направленные на прогнозирование развития молодняков, в том числе и после применения целевых рубок ухода, направленных на оптимизацию роста и развития подроста сосны сибирской кедровой и формирования в дальнейшем кедровников. При этом работ, посвященных влиянию рубок ухода в производных лесах на последующее возобновление сосны сибирской кедровой [55, 56] и оптимизации этого процесса, по-прежнему

недостаточно. Все еще остаются практически не изученными процессы естественного возобновления сосны сибирской на нарушенных землях. В работе [57] констатируется лишь крайне редкая встречаемость всходов данного древесного вида на промышленных отвалах Кузбасса.

Следующее приоритетное направление — исследование структуры древостоев и динамики кедровых лесов (21 публикация) (см. рис. 3). Рассматриваются возрастная структура и видовой состав древостоев с участием сосны сибирской кедровой в различных типах леса в пределах некоторых регионов, оценивается их насыщенность подростом и прогнозируется последующая динамика древостоев [58–62]. Особо следует отметить многолетние стационарные исследования [59, 63, 64], посвященные моделированию и прогнозированию динамики развития кедровников [61].

Важными для лесной экологии и лесного хозяйства являются исследования климатогенной динамики кедровых лесов, выполненные на основе дендрохронологического анализа [65–68] и GIS-технологий [69]. На основе анализа интенсивности возобновления сосны сибирской кедровой на северном и верхнем пределе ее распространения подтвержден факт инвазии

данного древесного вида в тундру и успешное формирование кедровых молодняков на фоне изменений климата [70, 71]. Кроме того, установлено влияние изменений климата на горимость и, как следствие, на формирование биоты [72].

Большое внимание в работах уделяется проведению рубок ухода и рубок переформирования, обеспечивающих увеличение в составе древостоя кедра и стимулирующих рост и развитие подполового подроста сосны сибирской, что может способствовать ускорению формирования кедровников на месте производных насаждений [43, 55, 56, 73–76].

Новым направлением стало изучение влияния геоактивных зон на рост и развитие деревьев в древостое, в том числе сосны сибирской кедровой [77, 78]. Новизна исследований заключается в том, что они находятся на стыке космогеологии, лесоведения и ботаники. В работах [77, 78] показано, что в так называемых малых геоактивных зонах наблюдаются наилучшие рост и развитие деревьев, максимальные размеры и продолжительность жизни. Это направление, возможно, прольет свет на те вопросы, на которые ответ пока не получен.

По генетике и селекции опубликовано 20 работ (см. рис. 3), из которых следует, что изучение генетики сосны сибирской кедровой откроет путь к пониманию генетических особенностей и механизмов, благодаря которым данный древесный вид успешно адаптируется к экстремальным климатическим и почвенным условиям, что способствует успешному выращиванию не только в условиях современного ареала распространения, но и за его границами.

Дальнейшему успешному развитию данного направления содействует анализ современных литературных обзоров [79, 80], один [79] из которых посвящен истории развития лесной генетики в России. Этот труд представляет собой первый и качественный пример обзора по данной теме, охватывающий широкий спектр различных разделов лесной генетики, применяемых в ней методов и анализ теоретического и практического значений анализируемых публикаций. В работе [79] также описаны новые перспективные направления в генетике.

Другой литературный обзор [80] посвящен достижениям и проблемам в области селекции. В нем указаны актуальные проблемы, требующие решения в целях повышения эффективности лесной селекции, в том числе и для сосны сибирской кедровой, приоритетные направления лесной селекции [80]. Авторы этой работы отмечают, что область лесной селекции в России ограничивается только несколькими

экономически важными видами, в число которых входит и сосна сибирская кедровая. Среди целевых признаков при ее селекции отмечаются семенная продуктивность, ускоренный рост и смолопродуктивность [80].

К последним важным научным достижениям в области селекции сосны сибирской кедровой относят разработку высокополиморфных и информативных молекулярно-генетических маркеров [81], уточнение генетического разнообразия [82]. В целом можно отметить, что направление генетики и селекции занимает одно из первых мест в ряду актуальных.

Активно развивающимся направлением можно назвать палеоботанику. Ей отводится важное значение в понимании климатических изменений, развития экосистем, трансформации ареалов растительных видов и взаимосвязей с животным миром. Большинство современных палеоботанических исследований направлено на реконструкцию растительности различных регионов [83–88]. Полученная с помощью палеоботаники информация о сосне сибирской кедровой может способствовать пониманию факторов, лимитирующих ее современное распространение, и рисков сокращения ареала. Отсутствие палеоботанических исследований, в которых сосна сибирская кедровая является главным объектом исследований, можно считать серьезным пробелом, требующим скорейшего исправления.

Вредители и болезни могут провоцировать усыхание и гибель как отдельных деревьев, так и лесных насаждений в целом, в том числе на значительных площадях [89]. Это может привести к серьезным экономическим и экологическим проблемам.

В настоящее время, по мнению исследователей [90, 91], особую тревогу вызывают участвовавшие инвазии дендрофильных насекомых в бореальные леса. Данная проблема актуальна и для сосны сибирской кедровой [90, 91]. За последние 5 лет получены такие новые результаты, как выявление и исследование нового инвазионного стволового вредителя европейского происхождения — короеда (*Ips amitinus* Eichh.) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) [91]. Авторы работы [91] отмечают, что наиболее уязвимы насаждения сосны сибирской кедровой, ослабленные различными воздействиями, в том числе пожарами, вспышками численности сибирского шелкопряда (*Dendrolimus superans sibiricus* Tshetv.) и др. [91]. Причем эти вспышки достаточно опасны для кедровых лесов [92]. Признано, что вредители и болезни наиболее опасны для сеянцев, выращиваемых в питомниках. В неблагоприятные годы гибель сеянцев

от возбудителей заболеваний может составлять 100 %. Возбудители таких заболеваний, как фомоз, шютте (настоящее, обыкновенное, снежное), фузариоз, альтернариоз, кладоспориоз, тифулез и склерофомоз исследованы недостаточно [93]. Отсюда и риски потерь как посадочного материала, так и ценных кедровых лесов сохраняются.

В числе приоритетных находится и геоботаническое направление исследований, помогающее понять экологическое значение кедровых лесов в поддержании биоразнообразия и функционирования лесных экосистем. Внутренним направлением геоботанических исследований служит изучение растительного покрова в его взаимодействии с почвой, рельефом и климатическими условиями [94–97]. Такими исследованиями устанавливаются зависимости структуры и динамики растительности кедровых лесов от различных факторов среды. Кроме того, они могут стать основой разработки рекомендаций в области сохранения и восстановления кедровых лесов. На наш взгляд, геоботанические исследования по изучению всех ярусов лесной растительности составляют отдельную группу. Флористический состав признается чувствительным индикатором устойчивости фитоценозов. Благодаря ему выявляются дигрессивные и восстановительные сукцессии растительных сообществ в ответ на антропогенные нарушения, вспышки вредителей и болезней, а также глобальные и региональные климатические изменения. Анализ флористического состава и видовой структуры позволяет оценить степень уникальности растительности различных типов кедровых лесов и имеет важное значение для разработки рекомендаций по охране природы [95, 96, 98].

Современные методы анализа данных, разработанные в геоботанике, представляют собой эффективный инструмент для изучения зависимостей структуры растительности от природных и антропогенных факторов. Корректно проведенный геоботанический анализ помогает разработать эффективные меры по сохранению кедровых лесов и их устойчивому использованию. Однако выполненный нами анализ опубликованных трудов позволил сделать вывод о том, что недостаточно полно используется арсенал геоботанических и флористических методов анализа данных для изучения кедровых лесов, например, реализованный в среде программирования R в виде множества прикладных пакетов [99]. Кроме того, мы акцентируем внимание на экологических шкалах для оценки среды обитания и динамики фитоценозов. Такой подход отлично себя зарекомендовал во многих странах, в том числе и в России [100, 101],

но не использовался последние 5 лет для изучения кедровых лесов. Кроме того, перспективным современным методом является анализ ранговых распределений обилий видов. Он также хорошо себя зарекомендовал в лесотипологических исследованиях [102], при анализе влияния факторов среды на видовую структуру лесных фитоценозов [103] и исследовании лесных сукцессий [104]. Однако данный метод не был применен для изучения кедровых лесов.

Следующим важным направлением исследования кедровых лесов является изучение животного мира, связанного с данными лесными экосистемами. В исследованиях, посвященных взаимоотношениям сосны сибирской и животного мира, кедровники традиционно рассматриваются как среда обитания представителей того или иного вида [105–108], а также как источник кормовых ресурсов, в первую очередь кедрового ореха. Например, с его неурожаем связывают явление шатунизма у медведей [109]. По-прежнему актуальной остается проблема повреждения естественных кедровых молодняков и культур сосны сибирской кедровой животными, в первую очередь копытными, которые объедают их молодые побеги [110, 111]. К сожалению, по-прежнему единичными остаются исследования, посвященные взаимоотношениям с тонкоклювой кедровкой [112] — главным разносчиком семян, обеспечивающим возобновление этого вида.

Ценным исследовательским инструментом признаются GIS-технологии. Преимуществом данных методов являются широкие возможности для визуализации и анализа пространственных данных. Важной современной проблемой в области применения GIS-технологий является составление карт на основе синтеза классических методов картографирования и автоматизированного дешифрирования данных, полученных с помощью дистанционного зондирования. В рамках этой проблемы важные результаты получили исследователи из Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН [113]. Авторы исправили один из главных недостатков карты Global Forest Change 2000–2013, построенной с использованием данных мозаики Хансена, который заключается в игнорировании дифференциации лесных территорий. На основе многоуровневого автоматизированного дешифрирования мозаики Хансена, которое было дополнено анализом снимков ключевых участков и физико-географических профилей, исследователи составили карту северо-запада Западной Сибири. Данный подход позволил дифференцировать леса и отразить их на карте, в том числе, кедровые.

Для исследователей кедровых лесов, а также для практиков лесного хозяйства данная карта имеет большое значение и может служить отправной точкой для мониторинга состояния уникальных кедровых лесов Западной Сибири, разработки системы мер по сохранению и устойчивому лесопользованию. Из других карт растительности, созданных в последние годы, исследователей кедровых лесов могут заинтересовать серии электронных крупномасштабных универсальных и оценочных карт [114], в частности растительности Байкальского региона [115], естественных геосистем Тункинской котловины и их антропогенных модификаций [116].

Наряду с изложенным выше GIS-технологии были привлечены к решению актуальной проблемы лесовосстановления [117].

Заслуживает внимания исследование, посвященное изучению фитомассы древостоев, основанное на анализе разносезонных спутниковых снимков и данных таксации леса [118]. Авторы доказали возможность оценки запасов фитомассы пологая древостоя, определения высоты и возраста насаждений на основе разработанной ими методики. Поскольку биопродуктивность кедровых лесов в последние 5 лет достаточно не исследовалась, наша работа может иметь большое значение. Есть надежда, что она будет стимулом для дальнейшего изучения продуктивности кедровых лесов.

Следующим приоритетным направлением является изучение семеношения сосны сибирской кедровой (6 публикаций за рассматриваемый период) (см. рис. 3). В работах [119–121] представлен анализ динамики семеношения за многолетний период (17–30 лет) в разных регионах Западной Сибири с использованием различных методик определения урожая. Установлено, что на периодичность обилия пыления и семеношения влияют условия произрастания, уровень влажности воздуха и температурный фактор [119], а семенная продуктивность снижается из-за поздних весенних заморозков и повышенной температуры воздуха в сентябре. Кроме того, показано существенное снижение плодоношения в связи с направленным изменением этих факторов за последние 30 лет [120]. Интерес вызывают исследования по выявлению зависимости между объемом урожая и географическим происхождением сосны сибирской кедровой в культурах [121].

Недостаточно освещены в печати вопросы по исследованию газообмена и содержания фотосинтетических пигментов у широтных и высотных экотипов сосны сибирской кедровой и сравнению их продуктивности [122, 123]. С практической точки зрения к важным можно

отнести исследования, посвященные совершенствованию технологии и оборудования для производства кедрового масла [124]. Авторы протестировали технологию двухэтапного холодного прессования кедрового ореха и выявили увеличение общего выхода кедрового масла на 16,87 % по сравнению с общепринятой технологией [124].

Выводы

Обзор публикаций показал, что исследования сосны сибирской кедровой ведутся с самых разных точек зрения. Спектр научных тематик традиционно достаточно широк, а интенсивность публикационной активности сохраняется на достаточно высоком уровне. За рассматриваемый период 2018–2022 гг. наибольшее количество (по 20–30 публикаций) посвящено проблемам искусственного восстановления, интродукции, динамики и структуры кедровых лесов, генетики и селекции и палеоботаники. Примерно по 10–15 публикаций посвящено геоботаническим исследованиям, изучению семеношения, физиологии сосны кедровой сибирской, естественного возобновления, инвазий вредителей и болезней, взаимоотношений с представителями животного мира, применения методов дистанционного зондирования и GIS-технологий. Во многих публикациях отражены комплексные исследования этих проблем, что наряду с применением оригинальных методов исследования климатогенной динамики и геоактивных зон представляет определенную научную новизну. По-прежнему недостаточно работ, посвященных естественному возобновлению сосны сибирской кедровой на нарушенных техногенных территориях и ее взаимоотношениям с тонкоклювой кедровкой — основным разносчиком семян. В 10–12 публикациях отражена необходимость разработки индивидуальных требований к лесохозяйственным мероприятиям по возобновлению, выращиванию и формированию кедровников, основанных на экологических особенностях данного вида,

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук, № гос. регистрации 123112700125-1.

Список литературы

- [1] Бобров Е.Г. Лесообразующие хвойные СССР. Л.: Наука, 1978. 188 с.
- [2] Бех И.А. Кедровники Южного Приобья. Новосибирск: Наука, 1974. 206 с.

- [3] Кирсанов В.А. Биолого-экологическая характеристика кедровых лесов // Воспроизводство кедровых лесов на Урале и в Западной Сибири. АН СССР УНЦ. Свердловск: Уральский Рабочий, 1981. С. 3–12.
- [4] Поварницын В.А. Кедровые леса СССР. Красноярск: Изд-во СибЛТИ, 1944. 220 с.
- [5] Крылов Г.В. Леса Западной Сибири. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 255 с.
- [6] Таланцев Н.К., Пряжников А.Н., Мишуков Н.П. Кедровые леса. М.: Лесная пром-сть, 1978. 176 с.
- [7] Хохрин А.В. Влияние эдафических условий на рост культур кедровых лесов на Урале и в Западной Сибири. Свердловск: Изд-во АН СССР УНЦ, 1981. С. 63–72.
- [8] Сукачев В.Н. Дендрология с основами лесной геоботаники. М.; Л.: Гослестехиздат, 1938. 574 с.
- [9] Таланцев Н.К. Кедр. М.: Лесная пром-сть. 1981. 96 с.
- [10] Крутовский К.В., Политов Д.В., Алтухов Ю.П. Генетическая изменчивость сибирской кедровой сосны *Pinus sibirica* Du Tour. Сообщение II. Уровень аллоимного полиморфизма в природной популяции Западного Саяна // Генетика, 1988. Т. 24. № 1. С. 118–124.
- [11] Крутовский К.В., Политов Д.В., Алтухов Ю.П. Генетическая изменчивость сибирской кедровой сосны *Pinus sibirica* Du Tour. Сообщение IV. Генетическое разнообразие и степень генетической дифференциации между популяциями // Генетика, 1989. Т. 25. № 11. С. 2009–2032.
- [12] Политов Д.В. Генетика популяций и эволюционные взаимоотношения видов сосновых (сем. *Pinaceae*) Северной Евразии: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Москва, 2007. 47 с.
- [13] Петрова Е.А., Велисевич С.Н., Белоконов М.М., Белоконов Ю.С., Политов Д.В., Горошкевич С.Н. Генетическое разнообразие и дифференциация популяций кедровых лесов на Южной границе ареала в равнинной части Западной Сибири // Экологическая генетика, 2014. Т. 12. № 1. С. 48–61.
- [14] Некрасова Т.П. Биологические основы семеношения кедровых лесов. Новосибирск: Наука, 1972. 274 с.
- [15] Воробьев В.Н. Особенности плодоношения кедровых лесов в горных условиях // Биология семенного размножения хвойных Западной Сибири. Новосибирск: Наука, 1974. С. 15–21.
- [16] Воробьев В.Н., Воробьева Н.А., Горошкевич С.Н. Рост и пол кедровых лесов. Новосибирск: Наука, 1989. 153 с.
- [17] Горошкевич С.Н. Динамика роста и плодоношения кедровых лесов. Уровень и характер изменчивости // Экология, 2008. № 3. С. 181–188.
- [18] Воробьев В.Н., Черкашин В.П., Кузьмичев В.В. Цикличность роста и семеношения кедровых лесов // Лесоведение, 1982. № 4. С. 38–48.
- [19] 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.
- [20] Танцырев Н.В., Санников С.Н. Анализ консортивных связей между кедром сибирским и кедровкой на Северном Урале // Экология, 2011. № 1. С. 20–24. <https://doi.org/10.1134/S1067413611010127>
- [21] Сташкевич Н.Ю., Шишкин А.С. Зоогенный фактор возобновления сосны кедровой сибирской в горно-таежных лесах Восточного Саяна // Сибирский экологический журнал, 2014. № 2. С. 313–318.
- [22] Николаева С.А., Савчук Д.А. Динамика возобновления кедровых лесов на Кеть-Чулымском междуречье (Западно-Сибирская равнина) // Интерэкспо ГЕО-Сибирь, 2015. Т. 3. № 4. С. 64–68.
- [23] Goroshkevich S., Velisevich S., Popov A., Khutornoy O., Vasilyeva G. 30-year cone production dynamics in Siberian stone pine (*Pinus sibirica*) in the southern boreal zone: a causal interpretation // Plant Ecology and Evolution, 2021, v. 154(3), pp. 321–331. <https://doi.org/10.5091/PLECEVO.2021.1793>
- [24] Непомилуева Н.И. Кедр сибирский на северо-востоке европейской части СССР. Л.: Наука, 1974. 183 с.
- [25] Кирсанов В.А. Формирование и развитие кедровых лесов Северного Урала и смежного Зауралья: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Свердловск, 1975. 21 с.
- [26] Седых В.Н. Формирование кедровых лесов Приобья. Новосибирск: Наука, 1979. 108 с.
- [27] Крылов Г.В., Таланцев Н.К., Козакова Н.Ф. Кедр. М.: Лесная пром-сть, 1983. 216 с.
- [28] Семечкин И.В., Поликарпов Н.И., Ирошников А.И. Кедровые леса Сибири. Новосибирск: Наука, 1985. 226 с.
- [29] 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 гос. ун-та. Биология, 2008. № 3(4). С. 180–185.
- [30] Танцырев Н.В. Лесоводственно-экологический анализ естественного возобновления кедровых лесов на сплошных гарях и вырубках в горных лесах Северного Урала: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Екатеринбург, 2012. 23 с.
- [31] Воробьев В.Н. Кедровка и ее взаимосвязи с кедром сибирским. (Опыт количественного анализа). Новосибирск: Наука, 1982. 113 с.
- [32] Lanner R.M. Made for each other. A symbiosis of birds and pines. New York, Oxford: Oxford University Press, 1996, 160 p.
- [33] Бех И.А., Воробьев В.Н. Потенциальные кедровники. Проблемы кедровых лесов. Томск: Изд-во СО РАН, 1998. 122 с.
- [34] Поляков В.И., Семечкин И.В. Динамика и устойчивость черневых кедровых лесов Западного Саяна // Лесоведение, 2004. № 2. С. 12–19.
- [35] Ирошников А.И. Изменчивость некоторых морфологических признаков и эколого-физиологических свойств кедровых лесов // Селекция древесных пород в Восточной Сибири. М.: Наука, 1964. С. 62–68.
- [36] Liberati A., Altman D.G., Tetzlaff J., Mulrow C., Gøtzsche P.C., Ioannidis J.P.A., Clarke M., Devereaux P.J., Kleijnen J., Moher D. The PRISMA Statement for Reporting Systematic Reviews and Meta-Analyses of Studies That Evaluate Health Care Interventions: Explanation and Elaboration // PLOS Medicine, 2009, v. 6, p. e1000100. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000100>
- [37] Mengist W., Soromessa T., Legese G. Method for conducting systematic literature review and meta-analysis for environmental science research // MethodsX 2020, v. 7, p. 100777. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.100777>

- [38] Свалова А.И., Братилова Н.П., Лузганов А.Г. Оценка подпологовых культур сосны кедровой сибирской в урочище «Майдат» пригородной зоны Красноярск // Хвойные бореальной зоны, 2022. Т. XL. № 1. С. 46–59.
- [39] Велисевич С.Н., Попов А.В., Мельник М.А., Горшкевич С.Н. Влияние поздних весенних заморозков на плодоношение кедров сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour) в изменяющемся климате // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 5. С. 138–152.
DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-138-152
- [40] Хорошев А.С. Лесные культуры сосны кедровой сибирской в Серповском лесничестве Тамбовской области // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика, 2019. Т. 7. № 3(46). С. 306–309.
- [41] Левин С.В. Эколого-биологические особенности произрастания кедров сибирского (*Pinus sibirica*) в условиях интродукции Воронежской области // Бюллетень государственного Никитского ботанического сада, 2022. № 144. С. 25–32.
DOI: 10.36305/0513-1634-2022-144-25-32
- [42] Николаева М.А., Варенцова Е.Ю., Межина К.М. Оценка сохранности и состояния *Pinus sibirica* Du Tour в географических культурах Ленинградской области // Хвойные бореальной зоны, 2022. Т. XL. № 5. С. 381–387.
- [43] Белов Л.А., Залесова Е.С., Залесов С.В., Карташова Т.Ю., Тимербулатов Ф.Т. Опыт переформирования производных мягколиственных насаждений в коренные кедровники // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова, 2019. Т. 56. № 3. С. 87–91.
DOI: 10.34655/bgsha.2019.56.3.013
- [44] Андреева Е.М., Терехов Г.Г., Стеценко С.К., Соловьев В.М., Фомин В.В. Лесоводственная и санитарная оценка культур кедров сибирского первого класса возраста в Свердловской области // Естественные и технические науки, 2019. № 10(136). С. 172–176. DOI: 10.25633/ETN.2019.10.26
- [45] Дебков Н.М., Паневин В.С. Искусственное восстановление кедровых лесов Томской области // ИзВУЗ Лесной журнал, 2019. № 2. С. 9–21.
DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.2.9
- [46] Гришлова М.В., Свалова А.И., Братилова Н.П. Сравнительный анализ показателей сосны сибирской Бирюсинского происхождения при разной густоте посадки // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений, 2021. № 20. С. 340–342.
- [47] Терехов Г.Г., Андреева Е.М., Стеценко С.К. Оценка культур кедров сибирского в конце первого класса возраста // ИзВУЗ Лесной журнал, 2021. № 6. С. 56–68. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-56-68
- [48] Гаврилова О.И., Грязькин А.В., Кабонен А.В., Иоффе А.О. Оценка результатов интродукции сосны кедровой сибирской в условиях Южной Карелии // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование, 2022. № 2 (54). С. 6–14.
DOI: 10.25686/2306-2827.2022.2.6
- [49] Васильев С.Б., Леденев Д.А., Семаев С.В. Особенности роста сосны кедровой сибирской на технологических субстратах Егорьевского месторождения фосфоритов // ИзВУЗ Лесной журнал, 2011. № 3 (321). С. 15–19.
- [50] Дебков Н.М., Паневин В.С. Оценка естественного возобновления кедров сибирского под пологом леса и на вырубках в средней тайге Западной Сибири // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование, 2018. № 4 (40). С. 5–20.
DOI: 10.15350/2306-2827.2018.4.5
- [51] Залесова Е.С., Чермных А.И. Обеспеченность подростом насаждений в районах нефтегазодобычи // Леса России и хозяйство в них, 2019. Вып. 68. № 1. С. 18–30.
- [52] Эфа Д.Э., Залесов С.В. Лесовосстановление на вырубках в подзоне северной тайги Ханты-Мансийского автономного округа – Югра // Вестник биотехнологии, 2018. № 1 (15). С. 12–19.
- [53] Никитина Н.В., Михайлова Л.М. Рост и развитие подраста кедров (*Pinus sibirica* Du Tour) под пологом леса и на вырубках Юго-Западной Якутии // Успехи современного естествознания, 2018. № 12. С. 296–301.
- [54] Танцырев Н.В. Начальная фаза формирования послепожарных горных кедровников на Северном Урале // Хвойные бореальной зоны, 2022. Т. XL. № 5. С. 395–403.
DOI: 10.53374/1993-0135-2022-5-395-403
- [55] Танцырев Н.В., Андреев Г.В. Основные факторы развития подростов кедров сибирского под пологом производного сосняка // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование, 2020. № 4(48). С. 22–30. DOI: 10.25686/2306-2827.2020.4.22
- [56] Танцырев Н.В., Андреев Г.В. Влияние конкуренции древостоя на возобновление и рост подростов кедров сибирского в березняке // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование, 2021. № 2 (50). С. 13–22.
DOI: 10.25686/2306-2827.2021.2.13
- [57] Климова О.А., Куприянов А.Н. Влияние экологических условий на занос семян и лесовозобновление на отвалах угольных разрезов Кузбасса // Сибирский лесной журнал, 2018. № 5. С. 45–53.
DOI: 10.15372/SJFS20180504
- [58] Зиганшин Р.А. Лесной массив: сравнительная динамика среднего диаметра хвойных древостоев различных типов леса // Сибирский лесной журнал, 2019. № 6. С. 39–52. DOI: 10.15372/SJFS20190605
- [59] Данилина Д.М., Назимова Д.И., Коновалова М.Е. Пространственно-временная структура и динамика позднесукцессионного черного кедровника Западного Саяна // Лесоведение, 2020. № 5. С. 387–398.
DOI: 10.31857/S0024114820050034
- [60] Коновалова М.Е., Коновалова Е.Г., Цветков Е.Н., Генев Д.Д. Размерная и возрастная структура горных кедровников Приенисейских Саян // Сибирский лесной журнал, 2020. № 3. С. 51–62.
DOI: 10.15372/SJFS20200305
- [61] Брюханов И.И. Особенности формирования и роста кедровых лесов в различных ландшафтных условиях Восточного Саяна // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: естественные и технические науки, 2021. № 5. С. 12–15. DOI: 10.37882/2223-2966.2021.05.05

- [62] Коронатова Н.Г., Косых Н.П. Продуктивность древесного яруса на верховых болотах в таежной зоне Западной Сибири // Лесоведение, 2022. № 4. С. 432–448. DOI: 10.31857/S0024114822040052
- [63] Медведков А.А. Климатогенная динамика ландшафтов Сибирской тайги в бассейне Среднего Енисея // География и природные ресурсы, 2018. № 4. С. 122–129. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-4(122-129)
- [64] Сизых А.П. Трансформация и восстановление растительности в Прибайкалье // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле, 2021. Т. 37. С. 86–102. DOI: 10.26516/2073-3402.2021.37.86
- [65] Цибульский В.Р. Оценка устойчивости биоразнообразия севера Западной Сибири через стационарность древесно-кольцевых временных рядов видов-эдикторов // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование, 2018. Т. 4. № 2. С. 44–57. DOI: 10.21684/2411-7927-2018-4-2-44-57
- [66] Качаев А.В., Петров И.А., Харук В.И., Белова Е.Н. Новый подход к формированию переменных логистической регрессионной модели прогноза усыхания деревьев на основе динамики годовичных колец в горных лесах Кузнецкого Алатау // Сибирский лесной журнал, 2020. № 5. С. 37–44. DOI: 10.15372/SJFS20200504
- [67] Николаева С.А., Савчук Д.А. Оценка методов дендроиндикации при датировании экзогенных гравиационных процессов прошлого в верховьях р. Актру (Горный Алтай) // Известия РАН. Серия географическая, 2021. Т. 85. № 3. С. 392–404. DOI: 10.31857/S2587556621030110
- [68] Быков Н.И., Шигимага А.А., Воробьев Р.И. Радиальный рост древесных растений на побережье Телецкого озера // Полевые исследования в Алтайском биосферном заповеднике, 2022. Вып. 4. С. 6–11. DOI: 10.52245/26867109_2022_4_6
- [69] Петров И.А., Шушпанов А.С., Голуков А.С., Харук В.И. Воздействие изменений климата на радиальный прирост *Pinus sibirica* Du Tour в горных лесах Кузнецкого Алатау // Сибирский лесной журнал, 2019. № 5. С. 43–53. DOI: 10.15372/SJFS20190506
- [70] 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/10.1134/S1995425518040078>
- [71] 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, p. 1196. DOI: 10.3390/atmos13081196
- [72] Леонтьев Д.Ф. Природная среда в условиях изменения климата и реакция отдельных представителей биоты // Научное обозрение: Биологические науки, 2018. № 3. С. 18–22.
- [73] Дебков Н.М., Карташова Т.Ю., Залесова Е.С., Белов Л.А., Оплетаяев А.С., Тимербулатов Ф.Т. Некоторые аспекты последствий осветлений в кедровых культурах // Леса России и хозяйство в них, 2018. Вып. 66. № 3. С. 21–28.
- [74] Konovalova M.E., Danilina D.M., Nazimova D.I. Thinning-based formation of Siberian pine forests in the dark chern zone of Western Sayan // Сибирский экологический журнал, 2018. № 11(7). С. 779–788. DOI: 10.1134/S1995425518070065
- [75] Залесов С.В., Белов Л.А., Оплетаяев А.С., Магасумова А.Г., Карташова Т.Ю., Дебков Н.М. Формирование кедровников рубками ухода на бывших сельскохозяйственных угодьях // ИзВУЗ Лесной журнал, 2021. № 1. С. 9–19. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-9-19
- [76] Фарбер С.К., Мурзакматов Р.Т. Выборочные санитарные рубки в защитных кедровых насаждениях Хакасии: опыт послерубочной таксации и лесоводственный анализ // Сибирский лесной журнал, 2021. № 3. С. 27–37. DOI: 10.15372/SJFS20210303
- [77] Рогозин М.В., Михалев В.В. Высшие растения – фитоиндикаторы геоактивных зон в горах и на равнине // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии, 2021. Т. 20. № 1. С. 373–378. DOI: 10.14258/pbssm.2021075
- [78] Рогозин М.В., Михалев В.В., Рыбальченко А.А. Геоактивные зоны и структура растительных сообществ в связи с новыми открытиями в космической геологии // Бюллетень науки и практики, 2021. Т. 7. № 1. С. 33–48. DOI: 10.33619/2414-2948/62/03
- [79] Милютин Л.И., Муратова Е.Н., Ларионова А.А. Развитие лесной генетики в России // Сибирский лесной журнал, 2018. № 1. С. 3–15. DOI: 10.15372/SJFS20180101
- [80] Тараканов В.В., Паленова М.М., Паркина О.В., Роговцев Р.В., Третьякова Р.А. Лесная селекция в России: достижения, проблемы, приоритеты (обзор) // Лесохозяйственная информация, 2021. № 1. С. 100–143. DOI: 10.24419/LNI.2304-3083.2021.1.09
- [81] Крутовский К.В., Путинцева Ю.А., Орешкова Н.В., Бондар Е.И., Шаров В.В., Кузьмин Д.А. Постгеномные технологии в практическом лесном хозяйстве: разработка полногеномных маркеров для идентификации происхождения древесины и других задач // Лесотехнический журнал, 2019. Т. 9. № 1(143). С. 9–16. DOI: 10.12737/article_5c92016b64af27.15390296
- [82] Орешкова Н.В., Рименов А.В., Седельникова Т.С., Ефремов С.П. Генетический полиморфизм сосны сибирской кедровой (*Pinus sibirica* Du Tour) в Кузнецком Алатау // Сибирский экологический журнал, 2020. Т. 27. № 6. С. 677–688.
- [83] Анри О., Безрукова Е.В., Тетенькин А.В., Кузьмин М.И. Новые данные к реконструкции растительности и климата в Байкало-Патомском нагорье (Восточная Сибирь) в максимум последнего оледенения – раннем голоцене // Доклады Академии наук, 2018. Т. 478. № 5. С. 584–587. DOI: 10.7868/S0869565218050195
- [84] Решетова С.А. Реконструкция растительности Читино-Ингодинской впадины (Забайкалье) в позднем голоцене // Геосферные исследования, 2018. № 4. С. 56–63. DOI: 10.17223/25421379/9/6
- [85] Бибаева А.Ю. Преобразование геосистем Приольхонья в позднем кайнозое // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле, 2018. Т. 23. С. 28–42. DOI: 10.26516/2073-3402.2018.23.28
- [86] Антипина Т.Г., Прейс Ю.И., Зенин В.Н. Динамика лесной растительности и климата в южной тайге Западной Сибири в позднем голоцене по данным спорово-пыльцевого анализа и AMS-датирования торфяного разреза Болотное // Экология, 2019. № 5. С. 356–364. DOI: 10.1134/S0367059719050032

- [87] Карпенко Л.В., Родионова А.Б. Реконструкция региональной динамики лесного покрова суходолов центральной части Сым-Дубчесского междуречья в среднем и позднем голоцене // Сибирский лесной журнал, 2021. № 1. С. 45–57. DOI: 10.15372/SJFS20210105
- [88] Кошкарлов А.Д., Кошкарлова В.Л. Эколого-географические особенности формирования лесных формаций в Среднем течении Нижней Тунгуски в послеледниковое время // Успехи современного естествознания, 2021. № 2. С. 100–106. DOI: 10.17513/use.37581
- [89] Русецкая Г.Д., Балданова Л.П. Проблемы экологии и защиты леса в Иркутской области // Экология и промышленность России, 2020. Т. 24. № 4. С. 42–45. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-4-42-45
- [90] Дебков Н.М., Бисирова Э.М., Бочаров А.Ю. Динамика радиального прироста кедрового *Pinus sibirica* Du Roi в очагах инвазии уссурийского полиграфа *Polygraphus proximus* Blandf // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2018. Вып. 224. С. 161–175. DOI: 10.21266/2079-4304.2018.224.161-175
- [91] Керчев И.А., Кривец С.А., Бисирова Э.М., Смирнов Н.А. Распространение союзного короеда *Ips amitinus* (Eichhoff, 1872) в Западной Сибири // Российский журнал биологических инвазий, 2021. Т. 21. № 4. С. 77–84. DOI: 10.35885/1996-1499-2021-14-4-77-84
- [92] Чжан С.А., Пузанова О.А., Калачева Е.В. История развития очага сибирского шелкопряда в Окинском лесничестве Республики Бурятия // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки, 2021. Т. 1. С. 194–198.
- [93] Шилкина Е.А., Шеллер М.А., Ибе А.А., Сухих Т.В. Патогенные грибы лесных питомников Красноярского края и Республики Хакасия // Защита и карантин растений, 2019. № 6. С. 29–31.
- [94] Шишкин А.С., Ефимов Д.Ю., Лощев С.М., Мурзакуматов Р.Т., Буянцог Б.-О. Леса хребта Хан-Ху-хий в Монголии // Сибирский лесной журнал, 2018. № 6. С. 3–15. DOI: 10.15372/SJFS20180601
- [95] Пак Л.Н. Биоразнообразие темнохвойной тайги бассейна реки Аца (Восточное Забайкалье) // Международный научно-исследовательский журнал, 2019. № 4 (82). Ч. 1. С. 86–92. DOI: 10.23670/IRJ.2019.82.4.017
- [96] Коновалова М.Е., Данилина Д.М., Степанов Н.В., Тимошкин В.Б., Собакин Д.С. Биоразнообразие и структура ненарушенных горно-таежных кедровников Идарского Белогорья (Восточный Саян) // Сибирский экологический журнал, 2020. Т. 27. № 1. С. 62–75. DOI: 10.15372/SEJ20200105
- [97] Башегуров К.А., Бунькова Н.П., Карташова Т.Ю., Морозов А.Е. Взаимосвязь лесных формаций с типами леса, почв и увлажнения // Международный научно-исследовательский журнал, 2021. Вып. 108. Т. 3. № 6. С. 68–73. DOI: 10.23670/IRJ.2021.108.6.071
- [98] Шереметова С.А. К вопросу о флористическом районировании Кемеровской области // Ботанические исследования Сибири и Казахстана, 2019. Вып. 25. С. 354–41.
- [99] Oksanen J., Blanchet F.G., Friendly M., Kindt R., Legendre P., Mcglinn D., Minchin P., O'hara R., Simpson G., Solymos P. Vegan: Community Ecology Package. R package version 2.5-5. Available at: <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>. Community Ecol. Package 2022, 2, 1–297. Available online: <https://cran.r-project.org/web/packages/vegan/vegan.pdf> (accessed 30.03.2023).
- [100] Zolotova E., Ivanova N., Ivanova S. Global overview of modern research based on Ellenberg indicator values // Diversity, 2023, no. 15, p. 14. <https://doi.org/10.3390/d15010014>
- [101] Ivanova N., Zolotova E. Landolt indicator values in modern research: A review // Sustainability, 2023, v. 15. p. 9618. DOI: 10.3390/su15129618
- [102] Ivanova N.S., Zolotova E.S., Li G. Influence of soil moisture regime on the species diversity and biomass of the herb layer of pine forests in the Ural Mountains // Ecological Questions, 2021, v. 32, pp. 27–38. DOI: 10.12775/EQ.2021.011
- [103] Ivanova N. Forest typological features of herb species abundance distributions of pine forests in the Ural Mountains // Proceedings of the BIO Web of Conferences: Northern Asia Plant Diversity: Current Trends in Research and Conservation, Novosibirsk, Russia, 6–12 September 2021, v. 38, p. 00047. DOI: 10.1051/bioconf/20213800047
- [104] Ivanova N., Petrova I. Species abundance distributions: Investigation of adaptation mechanisms of plant communities // E3S Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference «Fundamental and Applied Research in Biology and Agriculture: Current Issues, Achievements and Innovations» (FARBA 2021); EDP Sciences: Les Ulis, France, 2021, v. 254, p. 02003. DOI: 10.1051/e3sconf/202125402003
- [105] Леонтьев Д.Ф., Петров А.С., Зотченко З.Н. Инвентаризация охотничьих угодий Учебно-опытного охотничьего хозяйства «Голоустное» // Вестник ИрГЦХА, 2018. № 86. С. 91–103.
- [106] Маркова Н.И., Панкова Н.Л., Васина А.Л., Подгодина Н.Л. Особенности роющей деятельности кабана *Sus Scrofa* на северной границе ареала в Западной Сибири // Экология, 2018. № 6. С. 482–486. DOI: 10.1134/S1067413618060085
- [107] Винобер А.В. Лесные пожары и миграции бурого медведя // Гуманитарные аспекты охоты и охотничьего хозяйства, 2019. № 7 (19). С. 81–89.
- [108] Леонтьев Д.Ф., Козлова Н.Ю. Динамика возрастной структуры лесов как фактор влияния на состояние численности охотничьих животных Южного Предбайкалья (На примере бассейна р. Голоустная) // Гуманитарные аспекты охоты и охотничьего хозяйства, 2019. № 11 (23). С. 4–44.
- [109] Пучковский С.В., Рублева Е.А., Буйновская М.С. Шатуны бурого медведя в России // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология, Науки о Земле, 2019. Т. 29. Вып. 1. С. 124–136.
- [110] Леонтьев Д.Ф., Долгерд П.А. Влияние копытных животных на подросток окрестностей Учебной охотничьей базы «Булунчук» Учебно-опытного охотничьего хозяйства «Голоустное» (Южное Предбайкалье). // Биосферное хозяйство: теория и практика, 2021. № 11 (40). С. 18–23.
- [111] Terekhov G.G., Andreeva E.M., Stetsenko S.K. Method for creating mixed cultures of cedar under conditions of damage by wild animals // Invention, 2021, 12 p.

- [112] Танцырев Н.В. Анализ размещения кедровой кладовки семян кедрового по следам их зимнего использования // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова, 2020. № 3 (60). С. 117–125. DOI: 10.34655/bgsha.2020.60.3.018.
- [113] Кузьменко Е.И., Фролов А.А., Силаев А.В. Геоинформационное картографирование ландшафтов Северо-запада Западной Сибири на основе данных мозаики Хансена // География и природные ресурсы, 2018. № 2. С. 145–153. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-2(145-153)
- [114] Самбуу А.Д., Аюнова О.Д., Чуликова С.А. Структура растительного покрова северо-восточной части Тувы // Вестник Нижневартовского государственного университета, 2020. № 1. С. 33–41. DOI: 10.36906/2311-4444/20-1/06
- [115] Воронин В.И., Сизых А.П., Осолков В.А. Почвенно-геоботаническое профилирование как метод индикации развития растительности Байкальского региона // География и природные ресурсы, 2022. Т. 43. № 3. С. 77–86. DOI: 10.15372/GIPR20220309
- [116] Атутова Ж.В. Картографирование антропогенной и спонтанной (природной) преобразованности геосистем Тункинской котловины // Известия РАН. Серия Географическая, 2020. № 1. С. 138–146. DOI: 10.31857/S2587556620010045
- [117] Рожков Ю.Ф., Кондакова М.Ю. Оценка динамики восстановления лесов после пожаров в Олекминском заповеднике (Россия) по космическим снимкам LANDSAT // Nature Conservation Research. Заповедная наука, 2019. Т. 4. № 1. С. 1–10. DOI: 10.24189/ncr.2019.014
- [118] Сочилова Е.Н., Сурков Н.В., Ершов Д.В., Хамедов В.А. Оценка запасов фитомассы лесных пород по спутниковым изображениям высокого пространственного разрешения (на примере лесов Ханты-Мансийского АО) // Вопросы лесной науки, 2018. Т. 1. № 1. С. 1–23. DOI: 10.31509/2658-607X-2018-1-1-1-23
- [119] Паркина О.В., Третьякова Р.А., Галецкая Г.А. Динамика семеношения сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica*) в условиях Новосибирской области // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 6. С. 44–50. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-6-44-50
- [120] Горошкевич С.Н., Велисевич С.Н., Жук Е.А., Васильева Г.В. Плодоношение кедровых сосен на юге Западной Сибири: результаты 30-летних наблюдений // Сибирский экологический журнал, 2022. Т. 15. № 3. С. 262–269. DOI: 10.1134/S1995425522030064
- [121] Пастухова А.М., Войткевич А.Е., Акопян Д.В. Динамика семеношения кедрового разнотравного географического происхождения на участке «Известковый» за 17 лет наблюдений // Актуальные проблемы лесного комплекса, 2022. Вып. 62. С. 67–69.
- [122] Бендер О.Г., Горошкевич С.Н. Газообмен и содержание фотосинтетических пигментов у широтных экотопов кедрового разнотравья в опыте EX SITU // Сибирский лесной журнал, 2020. № 5. С. 28–35. DOI: 10.15372/SJFS20200503
- [123] Бендер О.Г. Оценка акклиматизации горных экотопов *Pinus sibirica* EX SITU по показателям CO₂ газообмена // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии, 2021. № 20(1). С. 66–69. DOI: 10.14258/pbssm.2021014
- [124] Невзоров В.Н., Кох Ж.А., Мацкевич И.В., Холопов В.Н. Совершенствование технологии и оборудования производства кедрового масла // Хвойные бореальной зоны, 2022. Т. XL, № 5. С. 444–449. DOI: 10.53374/1993-0135-2022-6-444-449

Сведения об авторах

Танцырев Николай Владимирович — канд. биол. наук, ст. науч. сотр., ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук», 89502076608@mail.ru

Иванова Наталья Сергеевна — д-р биол. наук, вед. науч. сотр., ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук», i.n.s@bk.ru

Андреев Георгий Васильевич — канд. с.-х. наук, науч. сотр., ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук», 8061965@mail.ru

Петрова Ирина Владимировна — д-р биол. наук, зав. лабораторией Популяционной биологии древесных растений и динамики леса, ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук», irina.petrova@botgard.uran.ru

Поступила в редакцию 25.02.2025.

Одобрено после рецензирования 27.03.2025.

Принята к публикации 01.04.2025.

SIBERIAN STONE PINE (*PINUS SIBIRICA* DU TOUR) IN LATEST RESEARCH IN RUSSIA: LITERATURE SURVEY

N.V. Tantsyrev, N.S. Ivanova✉, G.V. Andreev, I.V. Petrova

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

i.n.s@bk.ru

The following paper presents the contemporary study results of Siberian stone pine (*Pinus sibirica* Du Tour) for the period 2018–2022. A total of 257 publications were subjected to review. It was revealed that there had been a high and stable level of publication activities. The primary research directions have been delineated, including natural and artificial regeneration, seed production and introduction, the stands composition and the Siberian stone pine forests dynamics, regenerative and climatogenic successions, genetics and breeding, paleobotany, pest and disease infestations, geobotany, interrelationships with the animal world, remote sensing problems and the development of GIS-technologies. It has been demonstrated that, in numerous publications, alongside conventional methodologies, novel approaches to research and data analysis have been employed. The paucity of research on the natural regeneration of Siberian stone pine in disturbed man-made territories and its relationship with nutcracker (*Nucifraga caryocatactes macrorhynchos*) is demonstrated. The necessity of improving forestry measures based on regional and forest typological features of reforestation has been identified. It is recommended to use the study results for the conservation and reproduction of Siberian stone pine forests.

Keywords: *Pinus sibirica*, Siberian stone pine, research directions

Suggested citation: Tantsyrev N.V., Ivanova N.S., Andreev G.V., Petrova I.V. *Sosna sibirskaya kedrovaya (Pinus sibirica du Tour) v sovremennykh issledovaniyakh Rossii: literaturnyy obzor* [Siberian stone pine (*Pinus sibirica* Du Tour) in latest research in Russia: literature survey]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 4, pp. 19–38. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-19-38

References

- [1] Bobrov E.G. *Lesoobrazuyushchie khvoynnye SSSR* [Forestformation coniferous of the USSR]. Leningrad: Nayka, 1978, 188 p.
- [2] Bekh I.A. *Kedrovniki Yuzhnogo Priob'ya* [Siberian stone pine stands of the Southern Priob'e]. Novosibirsk: Nauka, 1974, 206 p.
- [3] Kirsanov V.A. *Biologo-ekologicheskaya kharakteristika kedra sibirskogo kak glavnogo lesoobrazovatelya kedrovyykh lesov* [Biological and ecological characteristics of the Siberian stone pine as the main forest former of its forests]. *Vosproizvodstvo kedrovyykh lesov na Urale i v Zapadnoy Sibiri* [Reproduction of Siberian stone pine forests in the Urals and Western Siberia]. Sverdlovsk: Urals Scientific Center. 1981, pp. 3–12.
- [4] Povarnitsyn V.A. *Kedrovye lesa SSSR* [Siberian stone pine forests of the USSR]. Krasnoyarsk: SblTI Publ., 1944, 220 p.
- [5] Krylov G.V. *Lesa Zapadnoy Sibiri* [Forests of the Western Siberia]. Moscow: AN SSSR Publ., 1961, 255 p.
- [6] Talantsev N.K., Pryazhnicov A.N., Mishukov N.P. *Kedrovye lesa* [Siberian stone pine forests]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forestry industry], 1978, 176 p.
- [7] Khokhrin A.V. *Vliyaniye edaficheskikh usloviy na rost kultur kedra sibirskogo na Urale* [The influence of edaphic conditions on the growth of Siberian pine crops in the Urals]. *Vosproizvodstvo kedrovyykh lesov na Urale i v Zapadnoy Sibiri* [Reproduction of Siberian stone pine forests in the Urals and Western Siberia]. Sverdlovsk: Urals Scientific Center, 1981, pp. 63–72.
- [8] Sukachyov V.N. *Dendrologiya s osnovami lesnoy geobotaniki* [Dendrology with the basics of forest geobotany]. Moscow; Leningrad: Goslestekhzdat, 1938, 574 p.
- [9] Talantsev N.K. *Kedr* [Siberian stone pine]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forestry industry], 1981, 96 p.
- [10] Krutovskiy K.V., Politov D.V., Altukhov Yu.P. *Geneticheskaya izmenchivost sibirskoy kedrovoy sosny Pinus sibirica Du Tour: Soobshcheniye II. Uroven allozimnogo polimorfizma v prirodnoy populyatsii Zapadnogo Sayana* [Genetic variability of the Siberian stone pine *Pinus sibirica* Du Tour. Message II. Level of allozyme polymorphism in the natural population of Western Sayan]. *Genetika* [Russian J. of Genetics], 1988, iss. 24, no. 1, pp. 118–124.
- [11] Krutovskiy K.V., Politov D.V., Altukhov Yu.P. *Geneticheskaya izmenchivost sibirskoy kedrovoy sosny Pinus sibirica Du Tour: Soobshcheniye IV. Geneticheskoye raznoobraziye i stepen geneticheskoy differentsiatsii mezhdru populyatsiyami* [Genetic variability of the Siberian stone pine *Pinus sibirica* Du Tour. Message IV. Genetic diversity and degree of genetic differentiation between populations]. *Genetika* [Russian J. of Genetics], 1989, iss. 25, no. 11, pp. 2009–2023.
- [12] Politov D.V. *Genetika populyatsiy i evolyutsionnye vzaimootnosheniya vidov sosnovykh (sem. Pinaceae) Severnoy Evrazii* [Population genetics and evolutionary relationships of pine species (family Pinaceae) of Northern Eurasia]. Diss. Dr. Sci. (Biol.), Moscow, 2007, 47 p.
- [13] Petrova Ye.A., Velisevich S.N., Belokon M.M., Belokon Yu.S., Politov D.V., Goroshkevich S.N. *Geneticheskoe raznoobraziye i differentsiatsiya populyatsiy kedra sibirskogo na Yuzhnoy granitse areala v ravninnoy chasti Zapadnoy Sibiri* [Genetic diversity and differentiation of Siberian stone pine populations at the Southern edge in lowland part of West Siberia]. *Ekologicheskaya genetika* [Ecological genetics], 2014, iss. 12, no. 1, pp. 48–61.

- [14] Nekrasova T.P. *Biologicheskie osnovy semenosheniya kedra sibirskogo* [Biological basis of seed production in Siberian stone pine]. Novosibirsk: Nauka, 1972, 274 p.
- [15] Vorob'yov V.N. *Osobennosti plodonosheniya kedra sibirskogo v gornyykh usloviyakh* [Peculiarities of fruiting of Siberian stone pine in mountain conditions]. *Biologiya semennogo razmnzheniya khvoynykh Zapadnoy Sibiri* [Biology of seed propagation of conifers in Western Siberia]. Novosibirsk: Nauka, 1974, pp. 15–21.
- [16] Vorob'yov V.N., Vorob'yova N.A., Goroshkevich S.N. *Rost i pol kedra sibirskogo* [Growth and sex of Siberian stone pine]. Novosibirsk: Nauka, 1989, 153 p.
- [17] Goroshkevich S.N. *Dinamika rosta i plodonosheniya kedra sibirskogo. Uroven i kharakter izmenchivosti* [Dynamics of growth and fruiting of Siberian pine. Level and nature of variability]. *Ekologia* [Russian J. of Ecology], 2008, no. 3, pp. 181–188.
- [18] Vorob'yov V.N., Cherkashin V.P., Kuzmitchyov V.V. *Tsiklichnost' rosta i semenosheniya kedra sibirskogo* [Cyclicity of growth and seed production of Siberian pine]. *Lesovedenie* [Russian J. of Forest Science], 1982, no 4, pp. 38–48.
- [19] Smolnogov E.P. *Ekologo-geograficheskaya differentsiatsiya i dinamika kedrovyykh lesov Urala i Zapadno-Sibirskoy ravniny (ekologo-lesovodstvennye osnovy optimizatsii khozyaistva)* [Ecological and geographical differentiation and dynamics 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.
- [20] Tantsyrev N.V., Sannikov S.N. *Analiz konsortivnykh svyazei mezhdru kedrom sibirskim i kedrovkoi na Severnom Urale* [Analysis of consortive relationships between the Siberian stone pine and the nutcracker in the Northern Urals]. *Ekologiya* [Russian J. of Ecology], 2011, v. 42, no. 1, p. 17–21. DOI: 10.1134/S1067413611010127
- [21] Stashkevich N.Yu., Shishikin A.S. *Zoogeny factor vozobnovleniya sosny kedrovoy sibirskoi v gorno-taehnykh lesakh Vostochnogo Sayana* [Zoogenic factor of Siberian pine restoration in the mountain taiga forests of East Sayan]. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal* [Contemporary Problems of Ecology], 2014, no. 2, pp. 313–318.
- [22] Nikolaeva S.A., Savchuk D.A. *Dinamika vozobnovleniya kedra sibirskogo na Ket-Chulymskom mezhdurech'e (Zapadno-Sibirskaya ravnina)* [The Siberian Stone Pine regeneration dynamics in the Ket-Chulym interfluvium (West Siberian Plain)]. *Interexpo GEO-Siberia*, 2015, v. 3, no. 4, pp. 64–68.
- [23] Goroshkevich S., Velisevich S., Popov A., Khutornoy O., Vasilyeva, G. 30-year cone production dynamics in Siberian stone pine (*Pinus sibirica*) in the southern boreal zone: a causal interpretation. *Plant Ecology and Evolution*, 2021, 154(3), pp. 321–331. DOI: 10.5091/PLECEVO.2021.1793
- [24] Nepomilueva N.I. *Kedr sibirskiy na severo-vostoke Evropeyskoy chasti SSSR* [Siberian stone pine in the north-east of the European part of the USSR]. Leningrad: Nauka, 1974, 183 p.
- [25] Kirsanov V.A. *Formirovanie i razvitie kedrovnikov Severnogo Urala i smezhnogo Zauraliya* [Formation and development of Siberian stone pine forests of the Northern Urals and adjacent Trans-Urals]. Diss. Cand. Sci. (Biol.). Sverdlovsk, 1975, 21 p.
- [26] Sedykh V.N. *Formirovanie kedrovyykh lesov Priob'ya* [The formation of Siberian pine forests of Ob region]. Novosibirsk: Nauka, 1979, 110 p.
- [27] Krylov G.V., Talantsev N.K., Kozakova N.F. *Kedr*: [Siberian stone pine]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forestry industry], 1983, 216 p.
- [28] Semechkin I.V., Polikarpov N.I., Iroshnikov A.I. *Kedrovye lesa Sibiri* [Siberian stone pine forests of Siberia]. Novosibirsk, Nauka, 1985, 226 p.
- [29] Nikolaeva S.A., Bekh I.A., Savchuk D.A. *Otsenka etapov vosstanovitelno-voznrastnoy dinamiki temnokhvoyno-keedrovyykh lesov po dendrokronologicheskim dannym (na primere Ket'-Chulymskogo Mezhdurech'ya)* [Ontogeny of Siberian stone pine in the Ket-Chulym Divide]. *Bulletin of Tomsk State University. Biology*, 2008, iss. 4, no. 3, pp. 180–185.
- [30] Tantsyrev N.V. *Lesovodstvenno-ekologicheskii analiz estestvennogo vozobnovleniya kedra sibirskogo na sploshnykh goryakh 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]. Diss. Cand. Sci. (Biol.). Ekaterinburg, 2012, 215 p.
- [31] 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.
- [32] Lanner R.M. *Made for each other. A symbiosis of birds and pines*. New York, Oxford: Oxford University Press, 1996, 160 p.
- [33] Bekh I.A., Vorob'yev V.N. *Potentsial'nye kedrovniki. Problemy kedra* [Potential Siberian stone pine forests. The problems of the Siberian stone pine]. Tomsk: SO RAN, 1998, rel. 6, 123 p.
- [34] Polyakov V.I., Semechkin I.V. *Dinamika i ustoychivost' chernykh kedrovnikov Zapadnogo Sayana* [Dynamics and stability Siberian stone pine forests of Western Sayan]. *Lesovedenie* [Russian J. of Forest Science], 2004, no. 2, pp. 12–19.
- [35] Iroshnikov A.I. *Izmenchivost' nekotorykh morfologicheskikh priznakov i ekologo-fiziologicheskikh svoystv kedra sibirskogo* [Variability of some morphological features and ecological and physiological properties of Siberian stone pine]. *Selektsiya drevnykh porod v Vostochnoy Sibiri* [Selection of tree species in Eastern Siberia]. Moscow, Nauka, 1964, pp. 62–68.
- [36] Liberati A., Altman D.G., Tetzlaff J., Mulrow C., Gøtzsche P.C., Ioannidis J.P.A., Clarke M., Devereaux P.J., Kleijnen J., Moher D. The PRISMA Statement for Reporting Systematic Reviews and Meta-Analyses of Studies That Evaluate Health Care Interventions: Explanation and Elaboration. *PLOS Medicine*, 2009, v. 6, p. e1000100. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000100>
- [37] Mengist W., Soromessa T., Legese G. Method for conducting systematic literature review and meta-analysis for environmental science research. *MethodsX* 2020, v. 7, p. 100777. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.100777>

- [38] Svalova A.I., Bratilova N.P., Luzganov A.G. *Otsenka podpologovykh kultur sosny kedrovoy sibirskoy v urochishche «Maydat» prigorodnoy zony Krasnoyarska* [Assessment of cultures under forest canopy of Siberian cedar pine in the tract «Maydat» in the suburban zone of Krasnoyarsk]. *Khvoynye borealnoy zony* [Conifers of the boreal area]. 2022, v. XL, no. 1. pp. 46–59.
- [39] Velisevich S.N., Popov A.V., Mel'nik M.A., Goroshkevich S.N. *Vliyanie pozdnykh vesennykh zamorozkov na plodonoshenie kedra sibirskogo (Pinus sibirica Du Tour) v izmenyayushchetsya klimate* [Influence of late spring light frosts on Siberian stone pine (*Pinus sibirica* Du Tour) seed production in changing climate]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 5, pp. 138–152. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-138-152
- [40] Khoroshev A.S. *Lesnye kultury sosny kedrovoy sibirskoy v Serpovskom lesnichestve Tambovskoy oblasti* [Forest cultures of Siberian cedar pine in Serpovsky forestry of the Tambov region]. *Actualnye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Current Directions of Scientific Research in the 21st Century: Theory and Practice], 2019, v. 7, iss. 46, no. 3. pp. 306–309.
- [41] Levin S.V. *Ekologo-biologicheskie osobennosti proizrastaniya kedra sibirskogo (Pinus sibirica) v usloviyakh introdukcii Voronezhskoy oblasti* [Ecological and biological characteristics of Siberian cedar (*Pinus sibirica* Du Tour) growth under the conditions of introduction in Voronezh region]. *Bulleten gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada* [Bull. Of State Nikita Botan. Garden], 2022, no. 144, pp. 25–32. DOI: 10.36305/0513-1634-2022-144-25-32
- [42] Nikolaeva M.A., Varentsova E.Yu., Mezhdina K.M. *Otsenka sokhrannosti i sostoyaniya Pinus sibirica Du Tour v geograficheskikh kul'turakh Leningradskoy oblasti* [Assessment of the preservation and condition of *Pinus sibirica* Du Tour in provenance trials of Leningrad region]. *Khvoynye borealnoy zony* [Conifers of the boreal area]. 2022, v. XL, no. 5. pp. 381–387.
- [43] Belov L.A., Zalesova Ye.S., Zalesov S.V., Kartashova T.Yu., Timerbulatov F.T. *Opyt pereformirovaniya proizvodnykh myagkolistvennykh nasazhdeniy v korennye kedrovniki* [The experience of derivative soft-leaved re-forming into native cedar stands]. *Vestnik Buryatskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Bulletin of Buryat agrarian state academy]. 2019, v. 56, no 3. p. 87–91. DOI: 10.34655/bgsha.2019.56.3.013
- [44] Andreeva Ye.M., Terekhov G.G., Stetsenko S.K., Soloviyov V.M., Fomin V.V. *Lesovodstvennaya i sanitarnaya otsenka kul'tur kedra sibirskogo pervogo klassa vozrasta v Sverdlovskoy oblasti* [Forestry and sanitary assessment of cedar crops of the first class age in the Sverdlovsk region]. *Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki* [Natural and technical sciences], 2019, iss. 136, no. 10, pp. 172–176. DOI: 10.25633/ETN.2019.10.26
- [45] Debkov N.M., Panevin V.S. *Iskusstvennoe vosstanovlenie kedrovyykh lesov Tomskoy oblasti* [Artificial Reforestation of Siberian Pine Forests in Tomsk Region]. *Russian Forestry J.*, 2019, no. 2. pp. 9–21. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.2.9
- [46] Grishlova M.V., Svalova A.I., Bratilova N.P. *Sravnitel'nyy analiz pokazateley sosny sibirskoy Biryusinskogo proiskhozhdeniya pri raznoy gustote posadki* [Comparative analysis of indicators for *Pinus sibirica* of Biryusinsky origin under different planting density]. *Plodovodstvo, semenovodstvo, introduktsiya drevesnykh rasteniy* [Youth. Society. Modern science, technic and innovations], 2021, v. 20, pp. 340–342.
- [47] Terekhov G.G., Andreeva E.M., Stetsenko S.K. *Otsenka kul'tur kedra sibirskogo v kontse pervogo klassa vozrasta* [Evaluation of Siberian stone pine plantations at the end of the first age class]. *Russian Forestry J.*, 2021, no. 6, pp. 56–68. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-56-68
- [48] Gavrilova O.I., Gryazkin A.V., Kabonen A.V., Ioffe A.O. *Otsenka rezul'tatov introduktsii sosny kedrovoy sibirskoy v usloviyakh Yuzhnoy Karelii* [Evaluation of the results of the introduction of Siberian cedar pine in the conditions of South Karelia]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management], 2022, iss. 54, no. 2, pp. 6–14. DOI: 10.25686/2306-2827.2022.2.6
- [49] Vasil'ev S.B., Ledenev D.A., Semaev S.V. *Osobennosti rosta sosny kedrovoy sibirskoy na tekhnogennykh substratakh Egor'evskogo mestorozhdeniya fosforitov* [Features of growth of Siberian stone pine on technogenic substrates of the Yegoryevsky phosphorite deposit]. *Russian Forestry J.*, 2011, no. 3 (321), pp. 15–19.
- [50] Debkov N.M., Panevin V.S. *Otsenka estestvennogo vozobnovleniya kedra sibirskogo pod pologom lesa i na vyrubkakh v sredney tayge Zapadnoy Sibiri* [The estimate of natural regeneration of Siberian pine in middle taiga (Western Siberia) under forest canopy and on clearings]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management]. 2018, iss. 40, no 4, pp. 5–20. DOI: 10.15350/2306-2827.2018.4.5
- [51] Zalesova E.S., Chernnykh A.I. *Obespechennost podrostom nasazhdeniy v rayonakh neftegazodobychi* [Provision of forest stands with undergrowth in region of oil-gas production]. *Lesa Rossii i khozyaistvo v nikh* [Forests of Russia and their management], 2019, iss. 69, no. 1, pp. 18–30.
- [52] Efa D.E., Zalesov S.V. *Lesovosstanovlenie na vyrubkakh v podzone severnoy taigi Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga – Yugra* [Reforestation on felled areas in the subzone of Northern taiga in the Khanty-Mansi Autonomous district – Yugra]. *Vestnik biotekhnologii* [Bulletin of Biotechnology]. 2018, iss. 15, no 1, pp. 12–19.
- [53] Nikitina N.V., Mikhaylova L.M. *Rost i razvitie podrosta kedra (Pinus sibirica Du Tour) pod pologom lesa i na vyrubkakh Yugo-Zapadnoy Yakutii* [Growth and development of the cedar (*Pinus sibirica* Du Tour) adolescent under the forest protection and on the cut-over areas of South-Western Yakutia]. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya* [Advances in current natural sciences], 2018, v. 2, no. 12, pp. 296–301.
- [54] Tantsyrev N.V. *Nachalnaya faza formirovaniya poslepozharnykh gornykh 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. DOI: 10.53374/1993-0135-2022-5-395-403

- [55] Tantsyrev N.V., Andreev G.V. *Osnovnye factory razvitiya podrosta kedra sibirskogo pod pologom proizvodnogo sosnyaka* [The main factors in the development of Siberian stone pine undergrowth under the canopy of derivative pine stand]. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management], 2020, iss. 48, no. 4, pp. 22–30. DOI: 10.25686/2306–2827.2020.4.22
- [56] Tantsyrev N.V., Andreev G.V. *Vliyanie konkurentsii drevostoya na vozobnovlenie i rost podrosta kedra sibirskogo v bereznyake* [The Effect of Stand Competition on the Regeneration and Growth of Siberian Stone Pine Undergrowth in Birch Forest]. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management], 2021, iss. 50, no. 2, pp. 13–22. DOI: 10.25686/2306–2827.2021.2.13
- [57] Klimova O.A., Kupriyanov A.N. *Vliyanie ekologicheskikh usloviy na zanos semyan i lesovozobnovlenie na otvalakh ugol'nykh razrezov Kuzbassa* [Influence of environmental conditions on seed infusion and forest regeneration at coal mine dumps of Kuzbass]. Sibirskiy lesnoy zhurnal [Siberian Forestry J.], 2018, no. 5, pp. 45–53. DOI: 10.15372/SJFS20180504
- [58] Ziganshin R.A. *Lesnoy massiv: sravnitel'naya dinamika srednego diametra khvoynykh drevostoev razlichnykh tipov lesa* [Woodland: comparative dynamics of average diameters of coniferous tree stands of different forest types]. Sibirskiy lesnoy zhurnal [Siberian Forestry J.], 2019, no. 6, pp. 39–52. DOI: 10.15372/SJFS20190605
- [59] Danilina D.M., Nazimova D.I., Konovalova M.E. *Prostranstvenno-vremennaya struktura i dinamika pozdnesuktsessionnogo chernevogo kedrovnika Zapadnogo Sayana* [Spatio-temporal structure and dynamics of a late succession stage cedar pine taiga of the Western Sayan mountains]. Lesovedenie [Russian J. of Forest Science], 2020, no 5, pp. 387–398. DOI: 10.31857/S0024114820050034
- [60] Konovalova M.E., Konovalova E.G., Tsvetkov E.N., Genov D.D. *Razmernaya i vozrastnaya struktura gornyykh kedrovnikov Prieniseyskikh Sayan* [Dimensional and age structure of mountain Siberian stone pine forests of the Cis-Yenisei Sayan]. Sibirskiy lesnoy zhurnal [Siberian Forestry J.], 2020, no 3, pp. 51–62. DOI: 10.15372/SJFS20200305
- [61] Bryukhanov I.I. *Osobennosti formirvaniya i rosta kedrovyykh lesov v razlichnykh landshaftnykh usloviyakh Vostochnogo Sayana* [Features of the formation and growth of cedar forests in various landscape conditions of the Eastern Sayan]. Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: estestvennye i tekhnicheskie nauki [Modern Science: Current Problems of Theory and Practice. Series: Natural and Technical Sciences], 2021, no. 5. pp. 12–15. DOI: 10.37882/2223–2966.2021.05.05
- [62] Koronotova N.G., Kosykh N.P. *Produktivnost' drevesnogo yarusa na verkhovykh bolotakh v tayozhnoy zone Zapadnogo Sayana* [Forest stand productivity on peat bogs of Western Siberia's taiga zone]. Lesovedenie [Russian Journal of Forest Science], 2022, no. 4, pp. 432–448. DOI: 10.31857/S0024114822040052
- [63] Medvedkov A.A. *Klimatogennaya dinamika landshaftov Sibirskoy taigi v bassejne Srednego Eniseya* [Climatogenic dynamics of Siberian taiga landscapes in the Middle Yenisei river basin]. Geografiya i prirodnye resursy [Geography and natural resources], 2018, no. 4, pp. 122–129. DOI: 10.21782/GIPR0206–1619–2018–4(122–129)
- [64] Sizykh A.P. *Transformatsiya i vosstanovlenie rastitelnosti v Priбайкаlie* [Transformation and reconstitution of vegetation in the Pre-Baikal]. Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya nauki o Zemle [The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences], 2021, v. 37, pp. 86–102. DOI: 10.26516/2073–3402.2021.37.86
- [65] Tsubul'skiy V.R. *Otsenka ustoychivosti bioraznoobraziya severa Zapadnoy Sibiri cherez statsionarnost' drevesno-koltsevykh vremennyykh ryadov vidov-edifikatorov* [Estimating the Biodiversity Stability in the North of Western Siberia through Stationary Wood-Ring Time Series of Edificators Species]. Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya i prirodopolzovanie [Tyumen State University Herald. Natural Resource Use and Ecology], 2018, v. 4, no. 2, pp. 44–57. DOI: 10.21684/2411–7927–2018–4–2–44–57
- [66] Kachaev A.V., Petrov I.A., Kharuk V.I., Belova E.N. *Novyy podkhod k formirovaniyu peremennykh logisticheskoy regressiionnoy modeli prognoza usykhaniya derev'ev na osnove dinamiki godichnykh kolets v gornyykh lesakh Kuznetskogo Alatau* [A new approach to developing a logistic regression model variables to predict tree mortality, based on tree-ring growth dynamics]. Sibirskiy lesnoy zhurnal [Siberian Forestry J.], 2020, no 5, pp. 37–44. DOI: 10.15372/SJFS20200504
- [67] Nikolaeva S.A., Savchuk D.A. *Otsenka metodov dendroindikatsii pri datirovanii ekzogennykh gravitatsionnykh protsessov proshlogo v verkhov'yakh r. Aktru (Gornyy Altay)* [Assessment of dendrogeomorphological dating methods of past geomorphic processes in the Aktru headwater (the Russian Altai mountains)]. Izvestiya Rossiyskoy Akademii Nauk. Seriya geograficheskaya [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series], 2021, v. 85, no. 3, pp. 392–404. DOI: 10.31857/S2587556621030110
- [68] Bykov N.I., Shigimaga A.A., Vorob'ev R.I. *Radial'nyy rost drevesnykh rasteniy na poberezh'e Teletskogo ozera* [Radial growth of tree plants on the coast of lake Teletsky]. Polevyye issledovaniya v Altaiskom Biosfernom zapovednike [Field research in the Altai Biosphere Reserve], 2022, iss. 4, pp. 6–11. DOI: 10.52245/26867109_2022_4_6
- [69] Petrov I.A., Shushpanov A.S., Golyukov A.S., Kharuk V.I. *Vozdeystvie izmeneniy klimata na radial'nyy prirost Pinus sibirica Du Tour v gornyykh lesakh Kuznetskogo Alatau* [*Pinus sibirica* Du Tour response to climate change in the forests of the Kuznetsk Alatau Mountains]. Sibirskiy lesnoy zhurnal [Siberian Forestry J.], 2019, no. 5, pp. 43–53. DOI: 10.15372/SJFS20190506
- [70] 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]. Sibirskiy ekologicheskii zhurnal [Contemporary Problems of Ecology], 2018, no. 4, pp. 449–461. DOI: 10.1134/S1995425518040078

- [71] 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, p. 1196. DOI: 10.3390/atmos13081196
- [72] Leontiev D.F. *Prirodnaya sreda v usloviyakh izmeneniya klimata i reaktsiya otdelnykh predstavitel'nykh bioty* [The environment in conditions of climate change and reaction certain representatives of the biota]. *Nauchnoye obozreniye. Biologicheskiye nauki* [Scientific review: biological sciences], 2018, no 3, pp. 18–22.
- [73] Debkov N.M., Kartashova T.YU., Zalesova E.S., Belov L.A., Opletaev A.S., Timerbulatov F.T. *Nekotorye aspekty posledstviy osvetleniy v kedrovyykh kulturakh* [Some aspects of the influence of thinning in Siberian stone pine cultures]. *Lesa Rossii i khozyaistvo v nikh* [Forests of Russia and their management], 2018, iss. 66, no. 3, pp. 21–28.
- [74] Konovalova M.E., Danilina D.M., Nazimova D.I. Thinning-based formation of Siberian pine forests in the dark chern zone of Western Sayan. *Siberian Ecological J.*, 2018, no. 11(7), pp. 779–788. DOI: 10.1134/S1995425518070065
- [75] Zalesov S.V., Belov L.A., Opletaev A.S., Magasumova A.G., Kartashova T.Yu., Debkov N.M. *Formirovanie kedrovnikov rubkami ukhoda na byvshikh sel'skokhozyaystvennykh ugod'yakh* [Formation of Siberian Pine Forests by Improvement Felling on Former Agricultural Lands]. *Russian Forestry J.*, 2021, no. 1, pp. 9–19. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-9-19
- [76] Farber S.K., Murzakmatov R.T. *Vyborochnye sanitarnye rubki v zashchitnykh kedrovyykh nasazhdeniyakh Khakasii: opyt poslerubochnoy taksatsii i lesovodstvennyy analiz* [Selective forest health felling in protective Siberian stone pine stands of Khakassia: an experience of post-logging survey and silvicultural analysis]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian Forestry J.], 2021, no. 3, pp. 27–37. DOI: 10.15372/SJFS20210303
- [77] Rogozin M.V., Mikhalev V.V. *Vysshie rasteniya – fitoindikator y geoaktivnykh zon v gorakh i na ravnine* [Vascular plants – phyto-indicators of geoactive zones in mountains and plains]. *Problemy botaniki Yuzhnoi Sibiri i Mongolii* [Problems of Botany of Southern Siberia and Mongolia], 2021, v. 20, no. 1, pp. 373–378. DOI: 10.14258/pbssm.2021075
- [78] Rogozin M.V., Mikhalev V.V., Rybalchenko A.Ya. *Geoaktivnye zony i struktura rastitelnykh soobshchestv v svyazi s novymi otkrytiyami v kosmicheskoy geologii* [Geoactive zones and the structure of plant communities in connection with new discoveries in space geology]. *Byulleten nauki i praktiki* [Bulletin of science and practice], 2021, v. 7, no. 1, pp. 33–48. DOI: 10.33619/2414-2948/62/03
- [79] Milyutin L.I., Muratova E.N., Larionova A.Ya. *Razvitie lesnoy genetiki v Rossii* [Development of forest genetics in Russia]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian Forestry J.], 2018, no 1, pp. 3–15. DOI: 10.15372/SJFS20180101
- [80] Tarakanov V.V., Palenova M.M., Parkina O.V., Rogovtsev R.V., Tret'yakova R.A. *Lesnaya selektsiya v Rossii: dostizheniya, problemy, priority (obzor)* [Forest selective breeding in Russia: achievements, challenges, priorities (overview)]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 2021, no. 1, pp. 100–143. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2021.1.09
- [81] Krutovskiy K.V., Putintseva Yu.A., Oreshkova N.V., Bondar E.I., Sharov V.V., Kuz'min D.A. *Postgenomnye tekhnologii v prakticheskom lesnom khozyaystve: razrabotka polnogenomnykh markerov dlya identifikatsii proiskhozhdeniya drevesiny i drugikh zadach* [Postgenomic technologies in practical forestry: development of genome-wide markers for timber origin identification and other applications]. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forest Engineering Journal], 2019, v. 9, iss. 143, no. 1, pp. 9–16. DOI: 10.12737/article_5c92016b64af27.15390296
- [82] Oreshkova N.V., Pimenov A.V., Sedel'nikova T.S., Efremov S.P. *Geneticheskiy polimorfizm sosny sibirskoy kedrovoy (Pinus sibirica Du Tour) v Kuznetskom Alatau* [Genetic polymorphism of Siberian stone pine (*Pinus sibirica* Du Tour) in Kuznetsk Alatau]. *Sibirskiy ekologicheskij zhurnal* [Contemporary Problems of Ecology], 2020, v. 13, no. 6, pp. 569–576.
- [83] Henry A., Bezrukova E.V., Kuz'min M.I., Teten'kin A.V. *Novye dannye k rekonstruktsii rastitelnosti i klimata v Baikalo-Patomskom nagorie (Vostochnaya Sibir) v maksimum poslednego oledeneniya – ranнем golotsene* [New data on vegetation and climate reconstruction in the Baikal-Patom highland (Eastern Siberia) in the last glacial maximum and early Holocene]. *Doklady Akademii nauk* [Doklady of the Academy of sciences], 2018, v. 478, no. 2, pp. 241–244. DOI: 10.7868/S0869565218050195
- [84] Reshetova S.A. *Rekonstruktsiya rastitelnosti Chitino-Ingodinskoy vpadiny (Zabaikalie) v pozdnem golotsene* [Reconstruction of vegetation Chitino-Ingoda depression (Transbaikalia) in the late Holocene]. *Geosfernye issledovaniya* [Geosphere research], 2018, no. 4, pp. 56–63. DOI: 10.17223/25421379/9/6
- [85] Bibaeva A.Yu. *Preobrazovanie geosistem Priolkhoniya v pozdnem kainozoe* [Transformation of Priolhonye geosystems in later cenozoic era]. *Izvestia Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Nauki o Zemle* [The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences], 2018, v. 23, pp. 28–42. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2018.23.28>
- [86] Antipina T.G., Preis Y.I., Zenin V.N. *Dinamika lesnoy rastitelnosti i klimata v yuzhnoy taige Zapadnoy Sibiri v pozdnem golotsene po dannym sporovo-pyl'tsovogo analiza i AMS-datirovaniya torfyanogo razreza Bolotnoe* [Dynamics of forest vegetation and climate in the Southern taiga of Western Siberia in the late holocene according to spore-pollen analysis and AMS dating of the Peat Bog]. *Ekologiya* [Russian J. of Ecology]. 2019, v. 50, no. 5, pp. 445–452. DOI: 10.1134/S0367059719050032
- [87] Karpenko L.V., Rodionova A.B. *Rekonstruktsiya regionalnoy dinamiki lesnogo pokrova sukhodolov centralnoy chasti Sym-Dubchesskogo mezhdurechia v srednem i pozdnem golotsene* [Reconstruction of regional dynamics of forest cover on dry lands of the central Sym-Dubches interfluvium in the middle and late holocene]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian Forestry J.], 2021, no. 1, pp. 45–57. DOI: 10.15372/SJFS20210105
- [88] Koshkarov A.D., Koshkarova V.L. *Ekologo-geograficheskie osobennosti formirovaniya lesnykh formatsiy v srednem techenii Nizhney Tunguski v poslednikovoe vremya* [Ecological and geographical features of forest formation in the middle current of the Lower Tunguska in last late time]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in current natural sciences], 2021, no. 2, pp. 100–106. DOI: 10.17513/use.37581
- [89] Rusetskaya G.D., Baldanova L.P. *Problemy ekologii i zashchity lesa v Irkutskoy oblasti* [Problems of ecology and forest protection in the Irkutsk region]. *Ekologiya i promyshlennost Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2020, v. 24, iss. 4, pp. 42–45. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-4-42-45

- [90] Debkov N.M., Bisirova E.M., Bocharov A.Yu. *Dinamika radialnogo prirosta kedra sibirskogo Pinus sibirica Du Tuor v ochagakh invazii ussuriyskogo poligrafa Polygraphus proximus Blandf* [Dynamics of radial growth of Siberian pine *Pinus sibirica* Du Tuor in focus of invasion of four-eyed fir bark beetle *Polygraphus proximus* Blandf]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [News of the St. Petersburg Forest Engineering Academy], 2018, iss. 224, pp. 161–175. DOI: 10.21266/2079-4304.2018.224.161-175
- [91] Kerchev I.A., Krivets S.A., Bisirova E.M., Smirnov N.A. *Rasprostranenie soyuznogo koroeda Ips amitinus (Eichhoff, 1872) v Zapadnoy Sibiri* [Distribution of the small spruce bark beetle *Ips amitinus* (Eichhoff, 1872) in Western Siberia]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [News of the St. Petersburg Forest Engineering Academy], 2021, v. 21, no. 4, pp. 77–84. DOI: 10.35885/1996-1499-2021-14-4-77-84
- [92] Chzhan S.A., Puzanova O.A., Kalachyova Ye.V. *Istoriya razvitiya ochaga sibirskogo shelkopryada v Okinskom lesnichestve Respubliki Buryatiya* [The history of the development of the Siberian silkworm hearth in the Okinsky forestry of the Republic of Buryatia]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i Inzhenernye nauki* [Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki], 2021, iss. 1, pp. 194–198.
- [93] Shilkina E.A., Sheller M.A., Ibe A.A., Sukhikh T.V. *Patogennyye griby lesnykh pitomnikov Krasnoyarskogo kraya i Respubliki Khakassia* [Pathogenic fungi of forest nurseries of Krasnoyarsk krai and the Republic of Khakassia]. *Zashchita i karantin rasteniy* [Zashchita i karantin rasteniy], 2019, no. 6, pp. 29–31.
- [94] Shishikin A.S., Efimov D.Yu., Loshchev S.M., Murzakmatov R.T., Buyantsog B.-O. *Lesa khrebt Khan-Khykhiy* [Forests of the Khan-Khukhiy Mountain Ridge in Mongolia]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian Forestry J.], 2018, no. 6, pp. 3–15. DOI: 10.15372/SJFS20180601
- [95] Pak L.N. *Bioraznoobrazie temnokhoynoy taigi basseina reki Atsa (Vostochnoe Zabaikalie)* [Biodiversity of taiga trees with dark needles in Atsa river basin (Eastern Transbaikalia)]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research J.], 2019, iss. 82, no. 4–1, pp. 86–92. DOI: 10.23670/IRJ.2019.82.4.017
- [96] Konovalova M.E., Danilina D.M., Stepanov N.V., Timoshkin V.B., Sobachkin D.S. *Bioraznoobrazie i struktura nenarushennykh gorno-taezhnykh kedrovnikov Idarskogo Belogor'ya (Vostochnyy Sayan)* [Biodiversity and structure of undisturbed mountain Siberian pine taiga of the Idarsky Belogorye ridge (East Sayan)]. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal* [Contemporary problems of ecology], 2020, v. 13, no. 1, pp. 48–59. DOI: 10.15372/SEJ20200105
- [97] Bashegurov K.A., Bun'kova N.P., Kartashova T.Yu., Morozov A.E. *Vzaimosvyaz' lesnykh formatsiy s tipami lesa, pochv i uvlazhneniya* [Relationship of forest formations with types of forest, soil and moisture]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research J.], 2021, iss. 108, v. 3, no. 6, pp. 68–73. DOI: 10.23670/IRJ.2021.108.6.071
- [98] Sheremetova S.A. *K voprosu o floristicheskoy raionirovaniy Kemerovskoy oblasti* [To the question of the floristic zoning of the Kemerovo region]. *Botanicheskiye issledovaniya Sibiri i Kazakhstana* [Botanical studies of Siberia and Kazakhstan], 2019, iss. 25, pp. 34–41.
- [99] Oksanen J., Blanchet F.G., Friendly M., Kindt R., Legendre P., McGlinn D., Minchin P., O'hara R., Simpson G., Solymos P. *Vegan: Community Ecology Package*. R package version 2.5-5. Available at: <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>. *Community Ecol. Package* 2022, 2, 1–297. Available online: <https://cran.r-project.org/web/packages/vegan/vegan.pdf> (accessed 30.03.2023).
- [100] Zolotova E., Ivanova N., Ivanova S. *Global overview of modern research based on Ellenberg indicator values*. *Diversity*, 2023, no. 15, p. 14. <https://doi.org/10.3390/d15010014>
- [101] Ivanova N., Zolotova E. *Landolt indicator values in modern research: A review*. *Sustainability*, 2023, v. 15, p. 9618. DOI: 10.3390/su15129618
- [102] Ivanova N.S., Zolotova E.S., Li G. *Influence of soil moisture regime on the species diversity and biomass of the herb layer of pine forests in the Ural Mountains*. *Ecological Questions*, 2021, v. 32, pp. 27–38. DOI: 10.12775/EQ.2021.011
- [103] Ivanova N. *Forest typological features of herb species abundance distributions of pine forests in the Ural Mountains*. *Proceedings of the BIO Web of Conferences: Northern Asia Plant Diversity: Current Trends in Research and Conservation*, Novosibirsk, Russia, 6–12 September 2021, v. 38, p. 00047. DOI: 10.1051/bioconf/20213800047
- [104] Ivanova N., Petrova I. *Species abundance distributions: Investigation of adaptation mechanisms of plant communities*. *E3S Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference «Fundamental and Applied Research in Biology and Agriculture: Current Issues, Achievements and Innovations» (FARBA 2021)*; EDP Sciences: Les Ulis, France, 2021, v. 254, p. 02003. DOI: 10.1051/e3sconf/202125402003
- [105] Leont'ev D.F., Petrov A.S., Zotchenko Z.N. *Inventarizatsiya okhotnich'ikh ugodiy Uchebno-opytного okhotnich'ego khozyaystva «Goloustnoe»* [Inventory of hunting grounds of Educational-experimental farm «Goloustnoye»]. *Vestnik IrGSKhA* [Bulletin of the Irkutsk State Agricultural Academy], 2018, no. 86, pp. 91–103.
- [106] Markov N.I., Pankova N.L., Vasina A.L., Pogodin N.L. *Osobennosti royushchey deyatel'nosti kabana Sus Scrofa na severnoy granitse areala v Zapadnoy Sibiri* [Specific features of wild boar, *Sus Scrofa*, rooting activity at the Northern boundary of its range in Western Siberia]. *Ekologia* [Russian J. of Ecology], 2018, v. 49, no. 6, pp. 584–587. DOI: 10.1134/S1067413618060085
- [107] Vinober A.V. *Lesnye pozhary i migratsii burogo medvedya* [Forest fires and migration of the brown bear]. *Gumanitarnyye aspekty okhoty i okhotnich'yevogo khozyaystva* [Gumanitarnyye aspekty okhoty i okhotnich'ego khozyaystva], 2019, iss. 19, no. 7, pp. 81–89.
- [108] Leont'ev D.F., Kozlova N.Yu. *Dinamika vozrastnoy struktury lesov kak faktor vliyaniya na sostoyanie chislennosti okhotnich'ikh zhivotnykh Yuzhnogo Predbaykal'ya (na primere basseyna r. Goloustnaya)* [The dynamics of age struc-

- ture of forests as a factor influence on the state of number hunting animals the Southern Predbaykalia (On the example of Goloustnaya pool river)]. *Gumanitarnyye aspekty okhoty i okhotnichiyego khozyaistva* [Humanitarian aspects of hunting and game management], 2019, iss. 23, no. 11, pp. 40–44.
- [109] Puchkovskiy S.V., Rubleva E.A., Buinovskaya M.S. *Shatuny burogo medvedya v Rossii* [Brown bear shatuns in Russia]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya Biologiya, Nauki o zemle* [Bulletin of Udmurtskii state university. Seriya Biology, Earth Sciences], 2019, iss. 1, v. 29, pp. 124–136.
- [110] Leont'ev D.F., Dolgerd P.A. *Vliyanie kopytnykh zhivotnykh na podrost okrestnostey Uchebnoy okhotnich'ey bazy «Bulunchuk» Uchebno-opytного okhotnich'ego khozyaistva «Goloustnoe» (Yuzhnoe Predbaykal'e)* [Influence of the Training hunting base «Bulunchuk» of the Training and experimental hunting farm «Housnoe» (Southern Prebailkale)]. *Biosfernoye khozyaistvo: teoriya i praktika* [Biosphere Economy: Theory and Practice], 2021, iss. 40, no. 11, pp. 18–23.
- [111] Terekhov G.G., Andreeva E.M., Stetsenko S.K. Method for creating mixed cultures of cedar under conditions of damage by wild animals. *Invention*, 2021, 12 p.
- [112] Tantsyrev N.V. *Analiz razmeshcheniya kedrovoy 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, iss. 60, no. 3, pp. 117–125. DOI: 10.34655/bgsha.2020.60.3.018
- [113] Kuz'menko E.I., Frolov A.A., Silaev A.V. *Geoinformatsionnoe kartografirivanie landshaftov severo-zapada Zapadnoy Sibiri na osnove mozaiki Khansena* [Geoinformational mapping of landscapes in the northwestern part of Western Siberia using the Hansen mosaic dataset]. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and Natural Resources], 2018, no. 2, pp. 145–153. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-2(145-153)
- [114] Sambuu A.D., Ayunova O.D., Chupikova S.A. *Struktura rastitel'nogo pokrova severo-vostochnoy chasti Tuvy* [Structure of the vegetative cover of the North-Eastern part of Tuva]. *Vestnik nizhnevartovskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Nizhnevartovsk State University], 2020, no. 3, pp. 33–41. DOI: 10.36906/2311-4444/20-1/06
- [115] Voronin V.I., Sizykh A.P., Oskolkov V.A. *Pochvenno-geobotanicheskoe profilirovanie kak metod indikatsii razvitiya rastitel'nosti Baykal'skogo regiona* [Soil-Geobotanical profiling as the indication method for vegetation development in the Baikal region]. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and Natural Resources], 2022, v. 43, no. 3, pp. 77–86. DOI: 10.15372/GIPR20220309
- [116] Atutova Zh.V. *Kartografirovanie antropogennoy i spontanной (prirodной) preobrazovannosti geosistem Tunkinskoy kotloviny* [Mapping of Anthropogenic and Spontaneous (Natural) Transformation of the Geosystems of the Tunkinskaya Depression]. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series], 2020, no. 1, pp. 138–146. DOI: 10.31857/S2587556620010045
- [117] Rozhkov Yu.F., Kondakova M.Yu. *Otsenka dinamiki vosstanovleniya lesov posle pozharov v Olekminskom zapovednike (Rossiya) po kosmicheskim snimkam LANDSAT* [Assessment of the post-fire forest restoration dynamics in the Olekminsky state nature reserve (Russia) according to data of LANDSAT satellite images]. *Zapovednaya nauka* [Nature Conservation Research], 2019, v. 4, no. 1, pp. 1–10. DOI: 10.24189/ncr.2019.014
- [118] Sochilova E.N., Surkov N.V., Ershov D.V., Khamedov V.A. *Otsenka zapasov fitomassy lesnykh porod po sputnikovym izobrazheniyam vysokogo prostranstvennogo razresheniya (na primere lesov Khanty-Mansiyskogo AO)* [Assessment of biomass of forest species using satellite images of high spatial resolution) on the example of the forest of Khanty Mansi autonomous okrug]. *Voprosy lesnoy nauki* [Forest science issues], 2018, v. 1, no. 1, pp. 1–23. DOI: 10.31509/2658-607X-2018-1-1-1-23
- [119] Parkina O.V., Tretyakova R.A., Galitskaya G.A. *Dinamika semenosheniya sosny kedrovoy sibirskoy (Pinus sibirica) v usloviyakh Novosibirskoy oblasti* [Dynamics of Siberian pine (*Pinus sibirica*) seed production in Novosibirsk region]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 6, pp. 44–50. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-6-44-50
- [120] Goroshkevich S.N., Velisevich S.N., Zhuk E.A., Vasil'eva G.V. *Plodonoshenie kedrovyyh sosen na yuge Zapadnoy Sibiri: rezul'taty 30-letnikh nablyudeniy* [Cone production of stone pines in the South of Western Siberia: results of 30 years of monitoring]. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal* [Contemporary problems of ecology], 2022, v. 15, no. 3, pp. 262–269. DOI: 10.1134/S1995425522030064
- [121] Pastukhova A.M., Voytkovich A.E., Akopyan D.V. *Dinamika semenosheniya kedra sibirskogo raznogo geograficheskogo proiskhozhdeniya na uchastke «Izvestkovyy» za 17 let nablyudeniy* [Dynamics of cedar seed production of Siberian cedar of different geographical origin in the Limestone area over 17 years of observation]. *Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex], 2022, iss. 62, pp. 67–69.
- [122] Bender O.G., Goroshkevich S.N. *Gazoobmen i soderzhanie fotosinteticheskikh pigmentov u shiroknykh ekotopov kedra sibirskogo v opyte EX SITU* [Gas exchange and photosynthetic pigment content in latitudinal ecotypes of the Siberian stone pine EX SITU]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian Forestry J.], 2020, no. 5, pp. 28–35. DOI: 10.15372/SJFS20200503
- [123] Bender O.G. *Otsenka akklimatizatsii gornyykh ekotopov Pinus sibirica EX SITU po pokazatelyam SO2 gazoobmena* [Assessment of acclimation of *Pinus sibirica* mountain ecotypes EX SITU on CO₂ -gas exchange parameters]. *Problemy botaniki Yuzhnoy Sibiri i Mongolii* [Problems of botany of Southern Siberia and Mongolia], 2021, no. 20(1), pp. 66–69. DOI: 10.14258/pbssm.2021014
- [124] Nevzorov V.N., Kokh Zh.A., Matskevich I.V., Kholopov V.N. *Sovershenstvovanie tekhnologii i oborudovaniya proizvodstva kedrovogo masla* [Improvement of technology and equipment cedar oil production]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the boreal area], 2022, v. XL, no. 5, pp. 444–449. DOI: 10.53374/1993-0135-2022-6-444-449

The work was carried out within the framework of the state task of the Institute Botanic Garden Ural Branch of Russian Academy of Sciences, № 123112700125-1

Author's information

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

Ivanova Natal'ya Sergeevna [✉] — Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, Institute Botanic Garden Ural Branch of Russian Academy of Sciences, i.n.s@bk.ru

Andreev Georgiy Vasil'evich — Cand. Sci. (Agriculture), Scientific Researcher, Institute Botanic Garden Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 89502076608@mail.ru

Petrova Irina Vladimirovna — Dr. Sci. (Biology), Head of the Laboratory of Population Biology of Woody Plants and Forest Dynamics of Botanic Garden Ural Branch of Russian Academy of Sciences, irina.petrova@botgard.uran.ru

Received 25.02.2025.

Approved after review 27.03.2025.

Accepted for publication 01.04.2025.

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

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ СЕЯНЦЕВ КАНДИДАТОВ В ПЛЮСОВЫЕ ДЕРЕВЬЯ ДУБА МОНГОЛЬСКОГО (*QUERCUS MONGOLICA* FISH. EX LEDEB.) НА ЮГЕ ПРИМОРСКОГО КРАЯ

Т.П. Орехова, С.К. Малышева✉, С.В. Горохова

ФГБУН «Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии» Дальневосточного отделения Российской академии наук» (ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН), Россия, 690022, г. Владивосток, проспект 100-летия Владивостока, д. 159

malyshsveta@rambler.ru

Приведены таксационные показатели кандидатов в плюсовое насаждение и плюсовых деревьев дуба монгольского (*Quercus mongolica* Fish. ex Ledeb.), отобранных на территории Верхнеуссурийского лесного стационара ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН (Чугуевский район, Приморский край). Произведен отбор деревьев дуба монгольского в соответствии с паспортом плюсового дерева (по показателям возраста, прямостволности, очищенности ствола и скорости роста). Проведен анализ размеров и формы желудей, который позволил установить, что они относятся к северному экотипу и имеют овальную и округлую формы. Установлена низкая степень изменчивости морфометрических характеристик желудей (коэффициент вариации до 15 %). Проведена комплексная оценка семенного потомства «кандидатов» в плюсовые деревья на начальных этапах онтогенеза (одно- и двухлетних растений). Определен высокий уровень изменчивости высоты однолетних сеянцев и двухлетних растений в отдельных семьях и между отдельными деревьями (коэффициент вариации до 50 %). Наиболее высокий уровень изменчивости высоты двухлетних сеянцев внутри семей отмечен у потомства деревьев № 2, 001, 003. Выявлено, что двухлетние сеянцы активно формировали боковые побеги и фотосинтезирующие органы. Отмечена большая изменчивость количества и длины побегов и в семьях, и у потомства отдельных деревьев (коэффициент вариации более 50 %). Исследованное в составе хвойно-широколиственного леса насаждение дуба монгольского, представляет собой уникальную генетически изолированную популяцию семенного происхождения. Отобранные деревья рекомендованы для регистрации в качестве плюсовых.

Ключевые слова: дуб монгольский, плюсовое насаждение, изменчивость сеянцев, морфометрические параметры, Приморский край

Ссылка для цитирования: Орехова Т.П., Малышева С.К., Горохова С.В. Особенности развития сеянцев кандидатов в плюсовые деревья дуба монгольского (*Quercus mongolica* Fish. ex Ledeb.) на юге Приморского края // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 4. С. 39–51.
DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-39-51

В южной части российского Дальнего Востока леса с участием дуба монгольского (*Quercus mongolica* Fish. ex Ledeb.) являются одной из самых распространенных формаций, произрастающих на площади 3,37 млн га. Дуб монгольский — типичный представитель маньчжурской флоры и входит в состав широколиственных, кедрово-широколиственных, кедрово-еловых и чернопихтово-широколиственных лесных формаций [1]. Дальневосточные дубовые леса долгое время не пользовались вниманием лесопромышленников, поскольку считались малоперспективными. В настоящее время в связи с изменившейся конъюнктурой на рынке древесины все больший интерес представляют

запасы этой породы, сосредоточенные в спелых и перестойных лесах. Древесина дуба монгольского по своим техническим качествам мало отличается от ценной древесины дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) [2]. Исследователями дальневосточных лесов было установлено, что для стволов дуба монгольского семенного происхождения, выросших в составе хвойно-широколиственных насаждений выход деловой древесины может достигать 80 % [3].

Вторичные леса из дуба монгольского, образовавшиеся после рубок и пожаров, широко распространены на юге Приморья [4]. Как указывает Т.А. Москалюк [5], это единственная формация, территория которой в пределах Приморского края постепенно увеличивается. Высокая экологическая пластичность дуба и его устойчивость к пожарам позволяют ему

выживать даже в условиях высокой антропогенной нагрузки. Однако во вторичных лесах редко встречаются прямоствольные высокопродуктивные деревья дуба. Вторичные леса из дуба монгольского представляют собой насаждения с множеством деревьев порослевого происхождения, с обилием в подлеске кустарников и разнотравья. Для сохранения генофонда этой древесной породы особую ценность представляют насаждения дуба монгольского семенного происхождения. Исследователи дуба не раз указывали на необходимость более детального изучения внутривидовой изменчивости этого вида в различных частях его ареала [1, 6]. В настоящее время не установлены ни морфологические характеристики желудей в природных популяциях Чугуевского района Приморского края, ни сведения о внутривидовой изменчивости семенного потомства.

Изучение внутривидовой изменчивости имеет огромное практическое значение для селекции ценных древесных растений. Как известно, каждое дерево имеет индивидуальные и характерные для него специфические особенности, которые четко проявляются в его потомстве [7–11]. Установление изменчивости вида сводится к изучению индивидуальных характеристик отдельных особей, а лесотипологическая изменчивость вида проявляется, как правило, в формировании отдельных экотипов древесных растений [12].

В настоящее время в Приморском крае увеличился ущерб от незаконных рубок ценных древесных пород. Анализ несанкционированных заготовок древесины за период 2018–2021 гг. показал, что среднегодовой ущерб от незаконных рубок дуба монгольского в лесах Приморского края составил 3,53 млрд руб. [13]. Это не только огромный финансовый ущерб, нанесенный Приморскому краю, но и ощутимый и невосполнимый урон генофонду этой ценной древесной породы [14]. К сожалению, в Приморском крае до сих пор не зарегистрировано ни плюсовых насаждений, ни отдельных уникальных деревьев этой древесной породы. Для сохранения генофонда высокопродуктивных древесных пород эффективным методом в настоящее время считается создание устойчивых насаждений потомства плюсовых растений [15–17].

Цель работы

Цель работы — установление таксационных показателей кандидатов в плюсовые деревья дуба монгольского, оценка доброкачественности и морфометрических параметров желудей и семян на ранних стадиях развития.

Материалы и методы

Исследования проводились на территории Верхнеуссурийского биогеоценотического стационара (ВУС) и в питомнике Горнотаежной станции ДВО РАН (Уссурийский район, Приморский край). Стационар, расположенный в Чугуевском районе Приморского края, является научной и экспериментальной базой ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН. Территория стационара занимает площадь 4,5 тыс. га и находится на западном склоне северной части Южного Сихотэ-Алиня в пределах от 440 до 1108 м н. у. м. Леса стационара представляют собой уникальный участок сохранившихся высокопродуктивных хвойно-широколиственных лесов.

При подборе участка леса для исследований мы руководствовались рекомендациями по отбору плюсовых насаждений и деревьев дуба черешчатого [18], а также методическими рекомендациями А.М. Шутяева [19], поскольку в регионе отсутствуют рекомендации по отбору плюсовых деревьев дуба монгольского. Признаки, по которым отбирают плюсовые деревья, определяются, как правило, конечными целями селекции. При селекционном отборе на продуктивность в категорию плюсовых отбирают деревья, отличающиеся прямоствольностью, полнодревесностью, хорошей очищенностью стволов от сучьев, устойчивостью к неблагоприятным факторам среды, вредителям и болезням [20]. При многолетнем обследовании лесов стационара только в районе ключа Трехстенный было найдено уникальное по своим характеристикам (габитусу, высоте, продуктивности) насаждение дуба монгольского семенного происхождения. В данном насаждении было отобрано 12 деревьев дуба монгольского по признакам кандидатов в плюсовые.

Описание фитоценоза и характеристики деревьев проведены по общепринятым лесоводственным и геоботаническим методикам и в соответствии с паспортом плюсового дерева [21]. Коэффициент участия породы в древостое (ярусе) определяли целым числом, который соответствовал доли запаса древесной породы от общего запаса, выраженного в процентах.

Деревья *Quercus mongolica* Fish. ex Ledeb. присутствовали в насаждении в количестве 5–6 ед. (соответственно 46...65 %), а *Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc. составляла от 1 до 3 ед. (6...35 %); единично (6...15 %) встречались деревья *Picea koraensis* Nakai, *Abies nephrolepis* (Trautv.) Maxim., *Betula mandshurica* (Regel) Nakai, *Populus tremula* L. Подрост был представлен этими же древесными породами.

Подлесок хорошо развит, неравномерный, сомкнутость 0,6. В подлеске доминируют виды: *Acer mono* Maxim., *A. tegmentosum* Maxim., *A. pseudosieboldianum* (Pax) Kom., *Actinidia kolomicta* Maxim., *Eleutherococcus senticosus* (Rupr. et Maxim.) Maxim., *Schizandra chinensis* (Turcz.) Baill., *Philadelphus tenuifolius* Rupr. et Maxim., *Lonicera* sp. Напочвенный покров учитывали на модельных 10x10 м площадках. В данном насаждении покров слаборазвит, неравномерный, составляет 25...30 % общей площади, в нем доминируют *Carex ussuriensis* Kom., *Filipendula palmata* (Pall.) Maxim. и разнотравье; ярус мхов и лишайников не выражен (1–2 %).

В 2017 г. наблюдали массовое плодоношение отобранных деревьев. Желуди были собраны 27 сентября непосредственно под кронами деревьев. В начале октября проведен посев желудей на территории питомника Горнотажной станции ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН. Посев желудей (в количестве 903 шт.) провели в подготовленные гряды (сажали рядами на расстоянии 20 см и на глубину 4 см) для прохождения ими зимой естественной стратификации. Морфологическое описание деревьев и желудей проводили по общепринятым в лесоводстве методам. Доброкачественность желудей дуба определяли путем взрезывания согласно ГОСТ 13056.8–97 [25, 26]. Выборка желудей для анализа составляла от 50 до 100 шт. Для замеров семян отбирали от 20 до 40 шт. растений. Выборка растений для измерения высоты и длины побегов составляла от 20 до 40 шт. Для качественной оценки степени варьирования признаков использовали шкалу С.А. Мамаева [27]. Полученные данные обработаны статистически с помощью компьютерной программы Microsoft Office Excel и Статистика (версия 13.3, StatSoft Inc., USA). Ошибку репрезентативности выборок у отдельных деревьев и ее оценку рассчитывали по формулам:

$$M = \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n-1}}; \quad \varepsilon = \frac{m}{M} \cdot 100 \%$$

Латинские названия растений приведены с учетом данных международного указателя IPNI [22] и флористической сводки «Флора российского Дальнего Востока» [23]. Координаты деревьев устанавливали с помощью прибора GPSmap78, высоту деревьев определяли с помощью дальномера Disto D5 и высотомера Haglof, диаметр стволов деревьев измеряли мерной вилкой на высоте ствола 1,3 м от поверхности земли. Возраст деревьев устанавливали по таблицам «Справочника для таксации лесов Дальнего Востока» [24].

Результаты и обсуждение

Характеристика деревьев дуба монгольского. Выделение плюсовых насаждений и отбор плюсовых деревьев дуба монгольского на ВУС ранее не проводили. Дуб встречается на данной территории в составе хвойно-широколиственных фитоценозов.

Насаждение, в котором отобраны плюсовые деревья, образовалось на месте 30...40-летней выборочной вырубki леса (рис. 1). Деревья произрастают на высоте от 619 до 671 м н. у. м. и занимают южную, среднюю и верхнюю части западного склона водораздела ключа Трехстенный. Крутизна склона, на котором растут деревья, составляет от 12° до 20°. Возраст отобранных деревьев варьирует от 120 до 180 лет, а высота достигала от 23 до 33 м. Диаметр ствола составил у самого молодого дерева возрастом 120 лет — 35 см и 76 см у 180-летнего дерева. Все деревья имеют идеально прямой ствол, а бессучковая зона у большинства составляла около половины длины ствола, за исключением деревьев № 5 и № 9 (табл. 1).

Характеристика и качество желудей дуба монгольского. Согласно наблюдениям А.И. Кудинова [28] и нашим сведениям [29] четкой периодичности плодоношения у дуба монгольского нет. Обильные урожаи желудей на ВУС были редкими, а небольшие урожаи, по нашим наблюдениям, часто уничтожали животные. В 2017 г. наблюдали обильный урожай желудей. Собранные нами желуди не имели корешков и находились в состоянии покоя. Следует особо отметить очень высокую зараженность семян желудевым долгоносиком (*Curculio glandium* Mars., 1802) и различными плесневыми грибами. Зараженность желудей составила у отдельных деревьев от 48 до 60 %. Доброкачественность семян была низкой.

Для дуба монгольского И.Ф. Удра [6] выделил в Приамурье северный климатический экотип или разновидность и шесть морфологических форм желудей: крупноплодная, длинная, округлая, овальная, мелкокашечная, мелкоплодная (длинноплодоножковая). Подобные формы желудей характерны и для дуба монгольского в Приморском крае [30, 31]. На территории стационара у дубов отмечена округлая и овальная форма желудей, которые, по нашему мнению, соответствуют северному экотипу.

Неоднородность собранных нами желудей подтвердилась при анализе показателей длины и диаметра желудей. У исследуемых деревьев дуба размеры желудей варьировали. Наиболее крупные желуди (размером от $19,3 \pm 1,1$ до $21,6 \pm 0,25$ мм) собраны с деревьев № 003, 1, 2, 5 и 10.



a



б

Рис. 1. Дуб монгольский — кандидат в плюсовое дерево: а — прямая и бессучковая зона ствола; б — маркировка дерева

Fig. 1. Mongolian oak — a «candidate» for a plus tree: а — straight and bug-free zone of the trunk; б — marking of the tree

Длина желудей других исследованных деревьев составляла вариационный ряд от $16,0 \pm 1,5$ до $18,3 \pm 2,5$ мм (табл. 2). Коэффициент вариации длины и диаметра желудей изменялся от 3 до 15 %, что соответствует, по шкале С.А. Мамаева [27], очень низкой и низкой изменчивости. У половины деревьев коэффициент вариации размеров желудей не превышал 10 %, что свидетельствует о незначительной степени изменчивости этих признаков. Расчеты ошибок и относительных ошибок репрезентативности выборок, составляющих менее 3 %, позволяет сделать вывод о малом рассеянии вариант вокруг средних арифметических показателей. В целом, совокупность данных по размерам желудей отдельных деревьев можно считать однородной, поскольку коэффициент вариации низкий (см. табл. 2).

Изменчивость желудей, собранных с кандидатов в плюсовые деревья, а также установ-

ленная нами ранее изменчивость желудей из городских популяций обусловлена, вероятно, двумя уровнями проявления [31]. Полагаем, что имеет место проявление матрикальной и фенотипической изменчивости в пределах одной особи, а также популяционная изменчивость желудей в пределах изучаемой нами субпопуляции дуба. Согласно литературным источникам, более стабильным признаком в годы разных урожаев является коэффициент формы желудей, т. е. соотношение между диаметром и длиной [20, 33]. У исследованных нами деревьев дуба коэффициент формы приблизительно был одинаковым как у мелкоплодных, так и у крупноплодных особей (см. табл. 2).

Прорастание желудей и появление проростка. Семя дуба, как известно, состоит из кожуры, крупного зародыша с двумя семядолями и зачаточного корешка. Зародыш заполняет все семя, состоит из короткого и толстого

Т а б л и ц а 1

Таксационная характеристика деревьев (морфологическая форма ствола — прямой) дуба монгольского кандидатов в плюсовые деревья на Верхнеуссурийском стационаре

Taxational characteristics (the morphological shape of the trunk is straight) of Mongolian oak trees — candidates for plus trees at the Verkhneussuriysky station

Номер дерева	Высота н. у. м., м	Координаты	Возраст, лет	Высота дерева H , м	Диаметр ствола, см	Бессучковая зона, %
1	619	44°00'89,4" с. ш. 134°09'40,0" в. д.	180	30,5	76	57,5
2	630	44°00'89,4" с. ш. 134°09'42,4" в. д.	160	24,5	63	48
3	631	44°00'90,1" с. ш. 134°09'43,2" в. д.	170	27	72	60
4	645	44°00'89,1" с. ш. 134°09'45,1" в. д.	140	28	45	46
5	675	44°00'91,1" с. ш. 134°09'46,1" в. д.	150	29,5	57	15
6	638	44°00'71,8" с. ш. 134°09'70,8" в. д.	120	23	35	60
7	659	44°01'11,7" с. ш. 134°55'97,9" в. д.	160	33	70	48
8	671	44°01'11,7" с. ш. 134°55'97,9" в. д.	150	26	56	40
9	655	44°00'66,4" с. ш. 134°09'61,3" в. д.	140	26	48	31
10	659	44°01'96,1" с. ш. 134°12'53,2" в. д.	140	27,5	47	50

Т а б л и ц а 2

Морфометрические параметры желудей дуба монгольского на Верхнеуссурийском стационаре (размер выборки желудей от 50 до 100 шт.)

Morphometric parameters of acorns of Mongolian oak at the Verkhneussuriysky station (the sample size of acorns is from 50 to 100 pieces)

Номер дерева	Длина желудя L , мм	Коэффициент вариации V , %	Ширина желудя D , мм	Коэффициент вариации V , %	Коэффициент формы L/D	Коэффициент формы D/L
1	21,6 ± 0,25	11,62	16,3 ± 1,8	11,04	1,32	0,75
2	19,3 ± 2,5	12,95	15,6 ± 1,3	8,33	1,24	0,80
3	16,5 ± 0,6	3,64	14,2 ± 0,9	6,34	1,16	0,86
4	16,4 ± 1,5	9,15	14,4 ± 0,7	4,86	1,13	0,88
5	20,7 ± 1,9	9,18	16,2 ± 1,4	8,64	1,28	0,78
6	16,5 ± 1,1	6,67	13,8 ± 1,5	10,86	1,20	0,84
8	16,0 ± 1,5	9,37	13,6 ± 1,5	11,02	1,18	0,85
9	18,3 ± 2,5	13,66	15,0 ± 1,6	10,67	1,22	0,82
10	21,3 ± 0,7	3,28	17,0 ± 1,6	9,41	1,25	0,80
001	18,3 ± 1,4	7,65	14,4 ± 1,1	7,64	1,27	0,79
002	17,4 ± 1,8	10,3	14,1 ± 2,1	14,89	1,23	0,81
003	19,3 ± 1,1	5,96	16,4 ± 1,1	6,71	1,18	0,85

Примечание. Полу жирным шрифтом выделено среднеарифметическое значение.

корешка длиной 2–3 мм и двух (реже 3–4) крупных семядолей [26]. Семена дуба имеют (B_3) эпикотильный тип покоя. Этот тип покоя обусловлен не только твердостью перикарпа, но

и наличием ингибитора прорастания — комплекса таблитчатых клеток в осевых частях зародыша [34], влияние которого исчезает после стратификации семян.

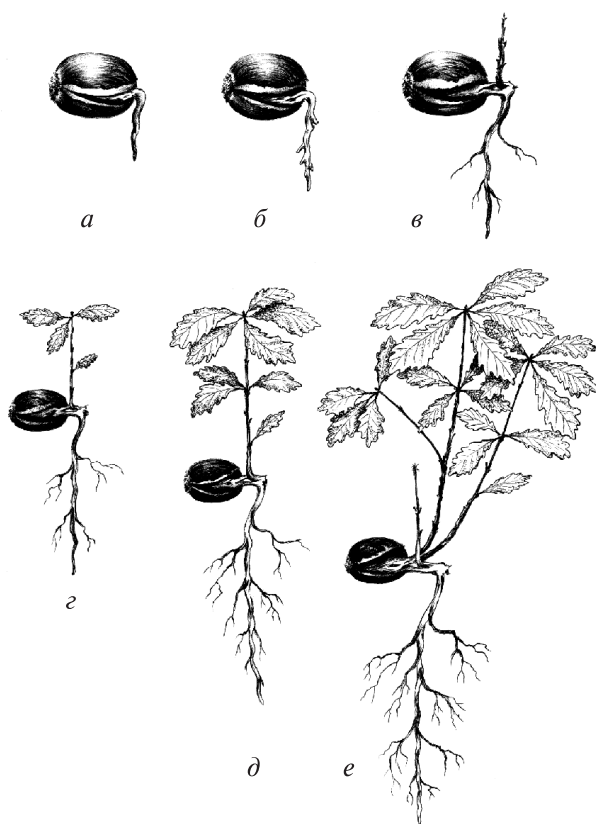


Рис. 2. Прорастание желудя и рост сеянцев дуба монгольского: *a* — растрескивание перикарпа и появление корешка; *б* — активный рост стержневого и боковых корешков; *в* — формирование всхода; *г* — образование «ложномутовочных» и стеблевых листьев; *д* — однолетнее растение; *е* — двухлетний сеянец с дополнительными побегами после обмерзания

Fig. 2. Germination of acorn and the growth of seedlings of Mongolian oak: *a* — cracking of the pericarp and the appearance of a root; *б* — active growth of the core and lateral roots; *в* — formation of the shoot; *г* — the formation of «false leaves» and stem leaves; *д* — an annual plant; *е* — a two-year-old seedling with additional shoots after freezing

Однако прорастание желудей дуба монгольского иногда начинается в осенний период, еще до опадения с материнского растения или в подстилке осенью [30, 35]. Укоренившиеся желуди успешно зимуют в подстилке, а остающиеся в покое прорастают весной. Вероятно, семена дуба монгольского часто неоднородны по глубине покоя. После зимнего периода естественной стратификации в почве желуди были готовы к прорастанию. Грунтовая всхожесть посаженных на питомнике желудей (вследствие наличия у них внутри вредителей и уничтожения их в течение зимы мышевидными грызунами) оказалась очень низкой, не выше 30 %.

Для желудей дуба монгольского независимо от места сбора характерно растянутое, скачкообразное

прорастание. По нашим наблюдениям [31], процесс прорастания весной начинался во второй декаде мая с роста гипокотилия, под давлением которого зародышевый корешок выталкивался наружу из желудя. Он пробивал семенную кожуру и околоплодник и углублялся в почву (рис. 2, *a*, *б*).

После прорастания в нормальных почвенных условиях дуб, как правило, начинает формировать мощную корневую систему стержневого типа (см. рис. 2, *д*, *е*). Прорастание семян дуба подземное, семядоли остаются в почве и служат резервом запасных питательных веществ. В этот период масса и объем корней превышают надземную часть сеянца. После углубления корня начинает расти эпикотиль, затем появляется побег с первичными чешуевидными листьями и далее продолжается формирование надземной части растения (см. рис. 2, *в*, *г*). На верхушке побега формируются 2–3 опушенных листа с зубчатыми краями.

На этом этапе развития сеянца, как уже отмечалось, масса корней значительно превышает массу надземной части растения, но позднее это соотношение изменяется в пользу надземной части. Преобладание массы корней над надземной частью сохраняется до достижения диаметра ствола у дуба в 4...6 см [1].

Первый появившийся лист сеянца дуба продолговатый, овальный, почти сидячий, по краю зубчатый; второй лист крупнее, неравномерно зубчатый, а последующие листья продолговатые, достигают 5 см длины, слабоволнистозубчатые. По нашим наблюдениям [31], количество тупых слабо- и сильнорассеченных листьев было таким же в процентном отношении, что и листьев острой формы со слабо- и сильнорассеченными краями. Формирование листьев у всходов дуба соответствовало описанию Т.А. Комаровой [35]. Разнообразие листовых пластинок у всходов дуба монгольского отмечали и ранее [30].

Спорным вопросом в семеноводстве дуба является сопряженность между размерами и массой желудей, с одной стороны, и ростом сеянцев, выращенных из них — с другой. Можно предположить, что размеры и масса желудей существенно влияют на рост и развитие семенного потомства на начальных этапах онтогенеза. Тем не менее экспериментально установлено, что рост растений из крупных и мелких желудей нивелируется, например, у дуба черешчатого на 2–3-й год [20]. Наблюдения за развитием дуба монгольского помогут в дальнейшем уточнить это предположение.

Характеристика однолетних и двухлетних сеянцев. Однолетние сеянцы, выросшие из желудей разных деревьев, различались по

Т а б л и ц а 3

**Характеристика однолетних сеянцев дуба монгольского
(размер выборки от 20 до 40 шт.)**

Characteristics of annual seedlings of Mongolian oak (the sample size of plants is from 20 to 40 pieces)

Номер дерева	Высота однолетних сеянцев, см		Коэффициент вариации V , %	Количество листьев в мутовке, шт.		Коэффициент вариации V , %
	в среднем	интервал		в среднем	интервал	
1	11,96 ± 3,29	8...20	27,51	4,03 ± 0,83	3...5	20,57
2	9,21 ± 3,23	4...14	35,04	2,7 ± 1,02	1...4	36,50
4	10,81 ± 4,93	3...20	45,56	3,00 ± 1,31	1...6	43,71
5	12,73 ± 7,53	5...19	59,19	3,78 ± 1,09	2...5	28,93
6	8,5 ± 2,02	7...12	23,72	4,00 ± 0,81	3...5	20,25
8	10,12 ± 2,03	7...13	20,05	4,00 ± 0,82	3...5	20,50
9	15,84 ± 2,03	12...27	26,78	4,46 ± 1,05	3...7	23,54
10	11,75 ± 5,64	6...25	48,00	3,82 ± 1,40	2...6	36,65
001	9,91 ± 4,56	4...18	46,02	3,80 ± 1,21	1...6	31,76
002	11,11 ± 4,01	5...19	36,09	3,89 ± 1,03	1...6	29,11
003	8,46 ± 2,18	7...11	25,81	2,63 ± 1,40	1...4	53,72

Примечание. Полуужирным шрифтом выделено среднеарифметическое значение.

высоте. Согласно шкале С.А. Мамаева [27], уровень изменчивости высоты растений в отдельных семьях был высоким и очень высоким. Например, сеянцы деревьев № 1, 4, 5, 9 имели максимальную высоту растений от 20 до 27 см (табл. 3). Максимальная высота (27 см) отмечена у сеянцев дерева № 9. Следует отметить, что самые маленькие однолетние растения (3...5 см) отмечены у деревьев № 4, 5, 001, 002. Эти же деревья имели высокий коэффициент варьирования высоты в семьях и характеризовались очень высокой изменчивостью этого признака.

Расчеты относительной ошибки репрезентативности выборки высоты сеянцев деревьев показали удовлетворительный результат (4,34...7,61 %). Ошибка репрезентативности выборки высоты растений внутри семей составляла 0,52...0,90, что соответствует точной выборке. Максимальное число листьев (7 шт.), собранных в «ложных мутовках», отмечено у сеянцев деревьев № 4, 9, 10, 001, 002. Эти деревья имели высокий уровень изменчивости по этому признаку (см. табл. 3). Гетерогенность потомства при перекрестном свободном опылении деревьев в лесном фитоценозе, как известно, обуславливает быстрый и стабильный рост сеянцев, но может зависеть и от местообитания деревьев. Полученные нами сведения о размерах однолетних сеянцев, соответствуют показателям, приведенным для природных популяций дуба монгольского [1, 36].

Известно, что у древесных растений на протяжении первого года жизни сеянцы наиболее чувствительны к влиянию неблагоприятных ус-

ловий окружающей среды. Зима 2017–2018 гг. в Приморском крае была очень холодной и малоснежной. Часть молодых растений подверглась обмерзанию до корневой шейки и весной из почек на гипокотиле образовались 1–2 молодых побега (см. рис. 2, е). Развитие этих побегов активно поддерживалось хорошо сформированной корневой системой. Сохранность растений в отдельных семьях была в пределах от 13 до 50 %.

Изменчивость высоты двухлетних сеянцев дуба монгольского в семьях была высокой. Высокий уровень изменчивости высоты отмечен в семьях у деревьев №№ 2, 001, 003. Следует отметить, что у этих же деревьев максимальная высота достигало соответственно 46, 52 и 77 см. Средняя высота сеянцев в семьях также изменялась (от 17,16 ± 4,72 см до 30,00 ± 8,42 см), при этом максимальные средние величины были у деревьев № 9 и № 003 (табл. 4). Расчеты относительной ошибки репрезентативности выборки высоты сеянцев деревьев показали удовлетворительный результат (3,63...7,21 %). Ошибка репрезентативности выборки внутри семей имела показатели менее 2, что соответствует точности выборки.

В первый год своего развития сеянцы дуба монгольского формировали мощную корневую систему, состоящую из стержневого и боковых корней, которые превышали побег почти в два раза. Во второй год развития сеянцы дуба активно формировали боковые побеги и фотосинтетический аппарат. Количество побегов у сеянцев составляло от 1 до 10 шт. (см. табл. 4).

Т а б л и ц а 4
Морфометрические показатели двухлетних сеянцев дуба монгольского (выборка растений от 20 до 40 шт.)
Morphometric indicators of two-year-old seedlings of Mongolian oak (the sample size of plants is from 20 to 40 pieces)

Номер дерева	Высота двухлетних сеянцев, см		Коэффи- циент вари- ации V , %	Количество побегов, шт.		Коэффи- циент вари- ации V , %	Длина побега, см		Коэффи- циент вари- ации V , %	Количество ложных «мутовок», шт.		Коэффи- циент вари- ации V , %	Количество листьев в «мутовке», шт.		Коэффи- циент вари- ации V , %
	в среднем	интер- вал		в среднем	интер- вал		в среднем	интер- вал		в среднем	интер- вал		в среднем	интер- вал	
1	21,19 ± 4,81	14...35	22,69	2,63 ± 1,15	1...5	43,73	7,83 ± 4,93	2...17,5	62,96	3,55 ± 1,39	2...7	39,15	4,03 ± 0,84	3...5	20,84
2	23,00 ± 10,60	6...46	46,08	3,66 ± 2,33	1...9	63,66	6,00 ± 2,97	1...18	49,50	4,23 ± 2,64	1...9	62,41	4,10 ± 1,11	1...6	27,07
4	17,16 ± 4,72	10...25	25,51	3,16 ± 1,80	1...6	56,96	6,20 ± 3,60	2...17	58,06	3,91 ± 1,99	1...7	50,90	3,86 ± 0,99	2...6	25,64
5	23,69 ± 7,62	9...37	31,16	3,34 ± 1,62	1...10	48,50	7,89 ± 4,73	2...19	59,95	4,64 ± 2,02	1...10	43,53	3,95 ± 1,04	1...6	26,33
6	20,00 ± 5,56	10...27	27,80	5,33 ± 2,69	3...9	50,47	5,73 ± 2,69	3...9	46,95	6,60 ± 5,59	1...15	84,70	3,88 ± 1,01	2...5	26,03
9	30,00 ± 8,42	17...45	28,07	3,87 ± 1,55	2...6	40,05	8,64 ± 4,56	2...18	52,78	4,70 ± 1,71	2...7	36,38	4,02 ± 1,17	1...6	29,10
10	20,40 ± 7,56	15...36	37,06	2,28 ± 1,60	1...4	70,17	6,56 ± 3,27	2...14	49,85	3,44 ± 1,74	2...7	50,58	3,96 ± 0,74	2...5	18,68
001	27,15 ± 10,95	13...52	40,33	2,66 ± 1,55	1...8	58,27	8,67 ± 5,87	2...26	67,70	4,13 ± 2,11	1...10	51,08	3,97 ± 0,93	1...6	23,43
002	17,80 ± 6,18	8...30	34,72	4,00 ± 1,41	3...6	35,25	4,40 ± 2,06	2...9	46,82	3,33 ± 2,06	2...7	61,86	4,23 ± 1,15	1...6	27,18
003	29,60 ± 12,71	16...77	42,94	3,70 ± 1,64	1...6	44,32	8,59 ± 4,63	1...21	53,90	4,80 ± 2,61	1...11	54,58	3,98 ± 1,09	2...6	27,38
Примечание. Полукирным шрифтом выделено среднееарифметическое значение.															

В среднем число побегов в отдельных семьях изменялось от 3 до 5 шт. Уровень изменчивости числа боковых побегов (по шкале С.А. Мамаева [27]) был высоким. Длина образовавшихся побегов в среднем не превышала 8 см. Максимальная длина побега (26 см) была у сеянцев, полученных из желудей от дерева № 001. Уровень изменчивости длины побегов в отдельных семьях достигал значительной величины и был очень высоким (см. табл. 4). Активный рост двухлетних растений сопровождался образованием большого количества листьев. Максимальное число сформировавшихся на побегах «ложных мутовок» листьев достигало 15 шт. В среднем их число составило от 3 до 6 шт. Уровень изменчивости этого признака был очень высок. Максимальное значение этого показателя отмечено у потомства дерева № 9. Более стабильным у сеянцев оказался признак количества листьев в «ложных мутовках», которые имели в среднем по четыре листа, а максимальное их количество составляло 6 шт. Изменчивость этого признака оценена как средняя (см. табл. 4).

Таким образом, несмотря на обмерзание главного побега, двухлетние сеянцы дуба монгольского успешно восстановились и продолжили активный рост, образовав молодые боковые побеги и множество «ложных мутовок» листьев. Высокую регенеративную способность дуба монгольского отмечали и другие исследователи [1, 5].

Выводы

Впервые в Приморском крае на территории Верхнеуссурийского лесного стационара ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН (Чугуевский район, Приморский край) отобраны деревья, растущие в составе хвойно-широколиственного леса, которые представляют собой уникальную генетически изолированную популяцию дуба монгольского семенного происхождения. Данные деревья отвечают всем морфометрическим параметрам, предъявляемым к плюсовым (прямоствольные, с большой бессучковой частью ствола) и подлежат обязательной государственной регистрации, поскольку в настоящее время официально зарегистрированных плюсовых деревьев этой ценной древесной породы в крае нет.

Потомство, выращенное из желудей «кандидатов» в плюсовые деревья, использовано для создания первой в крае испытательной плантации дуба монгольского на территории Горнотажной станции ДВО РАН (Уссурийский городской округ, Приморский край).

Важной задачей в ближайшее время является установление генотипов деревьев дуба монгольского и изучение особенностей роста их семенного потомства в целях сохранения генофонда и последующего селекционного отбора быстрорастущих особей.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (темы № 124012200183-8 и № 121031000144-5).

Список литературы

- [1] Добрынин А.П. Дубовые леса российского Дальнего Востока (биология, география, происхождение). Владивосток: Дальнаука, 2000. 260 с.
- [2] Пахомов Н.Д. Физико-механические свойства древесных дальневосточных пород. М: Лесная промышленность, 1965. 98 с.
- [3] Лосицкий К.Б. Цемек А.А. Твердолиственные леса СССР. М: Лесная промышленность, 1972. 238 с.
- [4] Куренцова Г.Э. Естественные и антропогенные смены растительности Приморья и Южного Приамурья. Новосибирск: Наука, 1973. 230 с.
- [5] Москалюк Т.А. Экобиоморфы дуба монгольского (*Quercus mongolica* Fish. ex Ledeb.) на склонах южной экспозиции в Приморье // Биологические исследования на Горнотажной станции. Владивосток: Дальнаука, 1996. Вып. 3. С. 41–65.
- [6] Удра И.Ф. О внутривидовой изменчивости монгольского дуба // Бюллетень Главного ботанического сада, 1972. Вып. 83. С. 42–45.
- [7] Лукьянец Б.В. Внутривидовая изменчивость дуба черешчатого в центральной лесостепи. Воронеж: Изд-во Воронежского университета, 1979. 216 с.
- [8] Нарзаяев В.В., Матвеева Р.Н., Буторова Р.Ф., Щерба Ю.Е. Изменчивость вегетативного потомства плюсовых деревьев кедров сибирского, аттестованных по ствольной или семенной продуктивности // ИзВУЗ Лесной журнал, 2019. № 4 (370). С. 22–33.
- [9] Кострикин В.А., Ширнин В.К., Крюкова С.А. Критерии оценки плюсовых насаждений дуба // ИзВУЗ Лесной журнал, 2021. № 4 (382). С. 68–79.
- [10] Игнатенко Р.В., Ершова М.А., Галибина Н.А., Раевский Б.В. Цитогенетическая характеристика семенного потомства клонов плюсовых деревьев сосны обыкновенной в Карелии // ИзВУЗ Лесной журнал, 2022. № 1 (385). С. 9–22.
- [11] Крекова Я.А., Чеботько Н.К. Исследования потомства плюсовых деревьев *Pinus sylvestris* L. в испытательных культурах первой генерации // Природообустройство, 2023. № 3. С. 130–136.
- [12] Ащеулов Д.И., Миленин А.И. Внутривидовая изменчивость дуба черешчатого в центральной лесостепи и на Кавказе // ИзВУЗ Лесной журнал, 2008. № 6. С. 22–26.
- [13] Орлов А.М., Громыко О.С., Зайцев В.А. Оценка экономических потерь, связанных с незаконными рубками на примере Хабаровского и Приморского краев // Материалы Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвященной 300-летию Российской академии наук, 55-летию Института водных и

- экологических проблем ДВО РАН, 60-летию запоевников в Приамурье, 4–6 октября 2023 г., г. Хабаровск. Хабаровск: Изд-во ИВЭП ДВО РАН, 2023. С. 311–312.
- [14] Современное состояние лесов российского Дальнего Востока и перспективы их использования. Хабаровск: Изд-во ДальНИИЛХ, 2009. 355 с.
- [15] Чудецкий А.И., Багаев С.С. Оценка потенциала еловых насаждений для создания лесных плантаций лесоводственными методами в южнотажном районе европейской части России // ИзВУЗ Лесной журнал. 2019. № 2 (368). С. 22–31.
- [16] Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Горелов А.Н., Михалюк А.В. Рост клонов плюсовых деревьев сосны обыкновенной на лесосеменной плантации во Владимирской области // Труды Санкт-Петербургского НИИ лесного хозяйства, 2022. № 2. С. 18–32.
- [17] Сухоруких Ю.И., Биганова С.Г., Глинушкин А.П., Свиридова Л.Л. Критерии отбора плюсовых деревьев для защитного лесоразведения // Новые технологии, 2023. Т. 19. № 1. С. 69–79.
- [18] Методика отбора плюсовых деревьев дуба черешчатого и оценки их семенных потомств. Воронеж: НИИ лесной генетики и селекции, 1995. 13 с.
- [19] Шутяев А.М. Способ отбора и оценки плюсовых деревьев дуба черешчатого // Лесное хозяйство, 1995. № 6. С. 26–27.
- [20] Крюкова С.А., Ширнин В.К. Плодоношение дубрав и плюсовых деревьев дуба черешчатого // Лесотехнический журнал, 2016. № 2. С. 22–30.
- [21] Указания по лесному семеноводству в Российской Федерации. М.: ВНИИЦ Лесресурс, 2000. 198 с.
- [22] International Plant Names Index (IPNI). URL: <https://www.ipni.org>. (дата обращения 20.03.24).
- [23] Флора российского Дальнего Востока: Дополнения и изменения к изданию «Сосудистые растения советского Дальнего Востока». Т. 1–8. (1985–1996) / под ред. А.Е. Кожевникова, Н.С. Пробатовой. Владивосток: Дальнаука, 2002. 456 с.
- [24] Справочник для таксации лесов Дальнего Востока / под ред. В.Н. Корякина. Хабаровск: Изд-во ДальНИИЛХ, 1990. 526 с.
- [25] ГОСТ 13056.8–97 Межгосударственный стандарт. Семена деревьев и кустарников. Метод определения доброкачественности. Минск: ИПК Изд-во стандартов, 1998. 15 с.
- [26] Справочник по лесосеменному делу / под ред. А.И. Новосельцевой. М.: Лесная пром-сть, 1978. 336 с.
- [27] Мамаев С.А. Основные принципы методики исследования внутривидовой изменчивости древесных растений // Индивидуальная и эколого-географическая изменчивость растений. Свердловск: Изд-во УНЦ АН СССР, 1975. С. 3–14.
- [28] Кудинов А.И. О плодоношении дуба монгольского на юге Приморского края // Использование и восстановление лесов Дальнего Востока. Уссурийск: Изд-во ПСХИ, 1992. С. 103–110.
- [29] Орехова Т.П. Семена дальневосточных деревянистых растений (биологическая характеристика, химический состав, рекомендации по сбору и хранению). Владивосток: Дальнаука, 2005. 161 с.
- [30] Владимиров С.М. Морфологические особенности прорастания желудей дуба монгольского // Растения в природе и культуре. Владивосток: Дальнаука, 2000. С. 5–9.
- [31] Шихова Н.С., Орехова Т.П. Оценка качества семян и семенного потомства *Quercus mongolica* Fish.ex Ledeb. в г. Владивостоке // Растительные ресурсы, 2001. Вып. 3. С. 40–48.
- [32] Левина Р.Е. Репродуктивная биология семенных растений. М.: Наука, 1981. 96 с.
- [33] Усова Е.А. Изменчивость семенного потомства дуба монгольского в дендрарии СибГТУ // Вестник КрасГАУ, 2013. № 12. С. 154–156.
- [34] Ковалев А.Г. Рост корней и проростков (*Quercus rubor* L. и *Aesculus hippocastanum* (клеточный анализ): дис...канд. биол. наук. Москва, МГУ, 1977. 148 с.
- [35] Комарова Т.А. Семенное возобновление растений на свежих гарях (леса южного Сихотэ-Алиня). Владивосток: Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1986. 224 с.
- [36] Куза Н.А. Особенности роста генеративного потомства дуба черешчатого в Молдове // Лесоведение, 2010. № 1. С. 31–37.

Сведения об авторах

Орехова Татьяна Павловна — канд. биол. наук, ст. науч. сотр. сектора микрклонального размножения лесных, сельскохозяйственных и декоративных растений, ФГБУН «Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии» Дальневосточного отделения Российской академии наук» (ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН), tp.orekhova@mail.ru

Малышева Светлана Константиновна — канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаборатории дендрологии, ФГБУН «Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии» Дальневосточного отделения Российской академии наук» (ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН), malyshsveta@rambler.ru

Горохова Светлана Валентиновна — канд. биол. наук, начальник отдела интродукции древесных растений, ФГБУН «Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии» Дальневосточного отделения Российской академии наук» (ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН), svetagor63@mail.ru

Поступила в редакцию 23.04.2024.

Одобрено после рецензирования 04.12.2024.

Принята к публикации 03.06.2025.

SEEDLINGS DEVELOPMENT OF MONGOLIAN OAK (*QUERCUS MONGOLICA* FISH. EX LEDEB.) PLUS TREES IN SOUTH OF PRIMORSKY TERRITORY

T.P. Orekhova, S.K. Malysheva✉, S.V. Gorokhova

Federal Scientific Center for Biodiversity of Terrestrial Biota of East Asia of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 159, av. of the 100th Anniversary of Vladivostok, 690022, Vladivostok, Russia

malysheveta@rambler.ru

The paper presents taxation indices of candidates for plus plantation and plus trees of Mongolian oak (*Quercus mongolica* Fish. ex Ledeb.) selected in the territory of the Verkhneussurian forest station of the Federal Research Centre for Biodiversity of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Chuguevsky District, Primorsky Krai). The Mongolian oak trees were selected in accordance with the characteristics of the plus tree (according to age, straightness of stem, trunk purity and growth rate). An analysis of the size and shape of acorns was carried out, which allowed us to establish that they belong to the northern ecotype and have oval and rounded shapes. A low degree of variability in the morphometric characteristics of acorns has been established (coefficient of variation is up to 15 %). A comprehensive assessment of the seed progeny of candidates for plus trees at the initial stages of ontogenesis (one- and two-year-old plants) was carried out. A high level of variability in the height of annual seedlings and biennial plants in individual families and between individual trees has been determined (coefficient of variation up to 50 %). The highest level of variability in the height of two-year-old seedlings within families was observed in the offspring of trees no. 2, 001, 003. It was revealed that two-year-old seedlings actively formed lateral shoots and photosynthetic organs. There is a great variability in the number and length of shoots both in families and in the offspring of individual trees (the coefficient of variation is more than 50 %). The Mongolian oak plantation studied in the coniferous-broadleaved forest represents a unique genetically isolated population of seed origin. The selected trees are recommended to be regarded as plus trees.

Keywords: Mongolian oak, plus planting, variability of seedlings, morphometric parameters, Primorsky Territory

Suggested citation: Orekhova T.P., Malysheva S.K., Gorokhova S.V. *Osobennosti razvitiya seyancev kandidatov v plyusovye derev'ya duba mongol'skogo (Quercus mongolica Fish. ex Ledeb.) na yuge Primorskogo kraya* [Seedlings development of Mongolian oak (*Quercus mongolica* Fish. ex Ledeb.) plus trees in south of Primorsky Territory]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 4, pp. 39–51. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-39-51

References

- [1] Dobrynin A.P. *Dubovye lesa rossiyskogo Dal'nego Vostoka (biologiya, geografiya, proiskhozhdenie)* [Oak forests of the Russian Far East (biology, geography, origin)]. Vladivostok: Dalnauka, 2000, 260 p.
- [2] Pakhomov N.D. *Fiziko-mekhanicheskie svoystva drevesnykh dal'nevostochnykh porod* [Physico-mechanical properties of wood of Far Eastern breeds]. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1965, 98 p.
- [3] Lositskiy K.B. Tsemek A.A. *Tverdolistvennye lesa SSSR* [Hardwood forests of the USSR]. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1972, 238 p.
- [4] Kurentsova G.E. *Estestvennye i antropogennye smeny rastitel'nosti Primor'ya i Yuzhnogo Priamur'ya* [Natural and anthropogenic vegetation changes in Primorye and the Southern Amur region]. Novosibirsk: Nauka, 1973, 230 p.
- [5] Moskalyuk T.A. *Ekobiomorfy duba mongol'skogo (Quercus mongolica Fish. ex Ledeb.) na sklonakh yuzhnoy ekspozitsii v Primor'e* [Ecobiomorphs of the Mongolian oak (*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.) on the slopes of the southern exposure in Primorye]. *Biologicheskie issledovaniya na Gornotaezhnoy stantsii* [Biological research at the Mountain Taiga station] Vladivostok: Dal'nauka, 1996, v. 3, pp. 41–65.
- [6] Udra I.F. *O vnutrividovoy izmenchivosti mongol'skogo duba* [On the intraspecific variability of the Mongolian oak]. *Byulleten' Glavnogo botanicheskogo sada* [Bulletin of Gl. botan. the garden], 1972, v. 83, pp. 42–45.
- [7] Luk'yanets B.V. *Vnutrividovaya izmenchivost' duba chereschatogo v tsentral'noy lesostepi* [Intraspecific variability of the pedunculate oak in the central forest-steppe]. Voronezh: Voronezhskiy universitet, 1979, 216 p.
- [8] Narzyaev V.V., Matveeva R.N., Butorova R.F., Shcherba Yu.E. *Izmenchivost' vegetativnogo potomstva plyusovykh derev'ev kedra sibirskogo, attestovannykh po stvolovoy ili semennoy produktivnosti* [Variability of vegetative offspring of Siberian cedar plus trees certified for stem or seed productivity]. *Russian Forestry J.*, 2019, no. 4 (370), pp. 22–33.
- [9] Kostrikin V.A., Shirnin V.K., Kryukova S.A. *Kriterii otsenki plyusovykh nasazhdeniy duba* [Criteria for evaluating positive oak plantations]. *Russian Forestry J.*, 2021, no. 4 (382), pp. 68–79.
- [10] Ignatenko R.V., Ershova M.A., Galibina N.A., Raevskiy B.V. *Tsitogeneticheskaya kharakteristika semennogo potomstva klonov plyusovykh derev'ev sosny obyknovennoy v Karelii* [Cytogenetic characteristics of the seed progeny of clones of plus trees of Scots pine in Karelia]. *Russian Forestry J.*, 2022, no. 1 (385), pp. 9–22.

- [11] Krekova Ya.A., Chebot'ko N.K. *Issledovaniya potomstva plusovykh derev'ev Pinus sylvestris L. v ispytatel'nykh kul'turakh pervoy generatsii* [Studies of the offspring of plus trees *Pinus sylvestris* L. in test cultures of the first generation]. Prirodobustroystvo [Nature management], 2023, no. 3, pp. 130–136.
- [12] Ashcheulov D.I., Milenin A.I. *Vnutrividovaya izmenchivost' duba chereshchatogo v tsentral'noy lesostepi i na Kavkaze* [Intraspecific variability of the pedunculate oak in the central forest-steppe and in the Caucasus]. Russian Forestry J., 2008, no. 6, pp. 22–26.
- [13] Orlov A.M., Gromyko O.S., Zaytsev V.A. *Otsenka ekonomicheskikh poter', svyazannykh s nezakonnymi rubkami na primere Khabarovskogo i Primorskogo kraev* [Assessment of economic losses associated with illegal logging on the example of the Khabarovsk and Primorsky Territories]. Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoy 300-letiyu Rossiyskoy akademii nauk, 55-letiyu Instituta vodnykh i ekologicheskikh problem DVO RAN, 60-letiyu zapovednikov v Priamur'e [Proceedings of the All-Russian scientific conference with international participation dedicated to the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences, the 55th anniversary of the Institute of Water and Environmental Problems of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, and the 60th anniversary of the reserves in the Amur Region], 4–6 oktyabrya 2023 g., Khabarovsk. Khabarovsk: IVEP DVO RAN, 2023, pp. 311–312.
- [14] *Sovremennoe sostoyanie lesov rossiyskogo Dal'nego Vostoka i perspektivy ikh ispol'zovaniya* [The current state of the forests of the Russian Far East and the prospects for their use]. Khabarovsk: Dal'NIILH, 2009, p. 355.
- [15] Chudetskiy A.I., Bagaev S.S. *Otsenka potentsiala elovykh nasazhdeniy dlya sozdaniya lesnykh plantatsiy lesovodstvennymi metodami v yuzhno-taizhnom rayone evropeyskoy chasti Rossii* [Assessment of the potential of spruce plantations for the creation of forest plantations by forestry methods in the South taiga region of the European part of Russia]. Russian Forestry J., 2019, no. 2 (368), pp. 22–31.
- [16] Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Gorelov A.N., Mikhalyuk A.V. *Rost klonov plusovykh derev'ev sosny obyknovennoy na lesosemnoy plantatsii vo Vladimirskey oblasti* [Growth of clones of plus trees of Scots pine on a forest seed plantation in the Vladimir region]. Trudy Sankt-Peterburgskogo NII lesnogo khozyaystva [Proceedings of the St. Petersburg Research Institute of Forestry], 2022, no. 2, pp. 18–32.
- [17] Sukhorukikh Yu.I., Biganova S.G., Glinushkin A.P., Sviridova L.L. *Kriterii otbora plusovykh derev'ev dlya zashchitnogo lesorazvedeniya* [Criteria for the selection of plus trees for protective afforestation]. Novye tekhnologii [New technologies], 2023, vol. 19, no. 1, pp. 69–79.
- [18] *Metodika otbora plusovykh derev'ev duba chereshchatogo i otsenki ikh semennykh potomstv* [The method of selection of plus-sized oak trees and evaluation of their seed progeny]. Voronezh: NII lesnoy genetiki i selektsii, 1995, 13 p.
- [19] Shutyaev A.M. *Sposob otbora i otsenki plusovykh derev'ev duba chereshchatogo* [Method of selection and evaluation of plus-sized oak trees]. Lesnoe khozyaystvo [Forestry], 1995, no. 6, pp. 26–27.
- [20] Kryukova S.A., Shirnin V.K. *Plodonoshenie dubrav i plusovykh derev'ev duba chereshchatogo* [Fruiting of oak forests and plus-sized oak trees]. Lesotekhnicheskii zhurnal [Forestry Engineering J.], 2016, no. 2, pp. 22–30.
- [21] *Ukazaniya po lesnomu semenovodstvu v Rossiyskoy Federatsii* [Guidelines on forest seed production in the Russian Federation]. Moscow: VNIITs Lesresurs, 2000, 198 p.
- [22] International Plant Names Index (IPNI). Available at: <https://www.ipni.org>. (accessed 20.03.2024).
- [23] *Flora rossiyskogo Dal'nego Vostoka: Dopolneniya i izmeneniya k izdaniyu «Sosudistye rasteniya sovetского Dal'nego Vostoka». T. 1–8. (1985–1996)* [Flora of the Russian Far East: Additions and changes to the publication «Vascular plants of the Soviet Far East», v. 1–8. (1985–1996)]. Vladivostok: Dal'nauka, 2002, 456 p.
- [24] *Flora rossiyskogo Dal'nego Vostoka: Dopolneniya i izmeneniya k izdaniyu «Sosudistye rasteniya sovetского Dal'nego Vostoka». T. 1–8. (1985–1996)* [Handbook for the taxation of forests of the Far East]. Khabarovsk: Dal'NIILH, 1990, 526 p.
- [25] *GOST 13056.8–97 Mezhgosudarstvennyy standart. Semena derev'ev i kustarnikov. Metod opredeleniya dobrokachestvennosti* [GOST 13056.8–97 is an interstate standard. Seeds of trees and shrubs. The method of determining the quality.]. Minsk: IPK Izd-vo standartov, 1998, 15 p.
- [26] *Spravochnik po lesosemennomu delu* [Handbook of forest seed business]. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1978, 336 p.
- [27] Mamaev S.A. *Osnovnye printsipy metodiki issledovaniya vnutrividovoy izmenchivosti drevesnykh rasteniy* [Basic principles of the methodology for the study of intraspecific variability of woody plants]. Individual'naya i ekologo-geograficheskaya izmenchivost' rasteniy [Individual and ecological-geographical variability of plants]. Sverdlovsk: UNC AN SSSR, 1975, pp. 3–14.
- [28] Kudinov A.I. *O plodonoshenii duba mongol'skogo na yuge Primorskogo kraya* [On the fruiting of the Mongolian oak in the south of the Primorsky Territory]. Kudinov A.I. O plodonoshenii duba mongol'skogo na yuge Primorskogo kraya [Use and restoration of forests in the Far East]. Ussuriysk: PSHI, 1992, pp. 103–110.
- [29] Orekhova T.P. *Semena dal'nevostochnykh derevyanistykh rasteniy (biologicheskaya kharakteristika, khimicheskiy sostav, rekomendatsii po sboru i khraneniyu)* [Seeds of Far Eastern woody plants (biological characteristics, chemical composition, recommendations for collection and storage)]. Vladivostok: Dal'nauka, 2005, 161 p.
- [30] Vladimirov S.M. *Morfologicheskie osobennosti prorstaniya zheludey duba mongol'skogo* [Morphological features of the germination of acorns of the Mongolian oak]. Rasteniya v prirode i kul'ture [Plants in nature and culture]. Vladivostok: Dalnauka, 2000, pp. 5–9.
- [31] Shikhova N.S., Orekhova T.P. *Otsenka kachestva semyan i semennogo potomstva Quercus mongolica Fisch.ex Ledeb. v g. Vladivostoke* [Assessment of the quality of seeds and seed progeny of *Quercus mongolica* Fisch.ex Ledeb. in Vladivostok]. Rastitel'nye resursy [Plant resources], 2001, iss. 3, pp. 40–48.
- [32] Levina R.E. *Reproduktivnaya biologiya semennykh rasteniy* [Reproductive biology of seed plants]. Moscow: Nauka, 1981, 96 p.

- [33] Usova E.A. *Izmenchivost' semennogo potomstva duba mongol'skogo v dendrarii SibGTU* [Variability of the seed progeny of the Mongolian oak in the arboretum of SibSTU]. *Vestnik KrasGAU* [Bulletin of KrasGAU], 2013, no. 12, pp. 154–156.
- [34] Kovalev A.G. *Rost korney i prorostkov (Quercus rubor L. i Aesculus hippocastanum (kletochnyy analiz)* [Growth of roots and seedlings (*Quercus robur* L. and *Aesculus hippocastanum* (cell analysis)]. Diss. Cand. Sci. (Biol.). Moscow: MGU, 1977, 148 p.
- [35] Komarova T.A. *Semennoe vozobnovlenie rasteniy na svezhikh garyakh (lesa yuzhnogo Sikhote-Alinya)* [Seed renewal of plants on fresh burns (forests of southern Sikhote-Alin)]. Vladivostok: DVNC AN SSSR, 1986, 224 p.
- [36] Kuza N.A. *Osobennosti rosta generativnogo potomstva duba chereshchatogo v Moldove* [Features of the growth of generative offspring of the pedunculate oak in Moldova]. *Lesovedenie* [Forest science]. 2010, no. 1, pp. 31–37.

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topics No. 124012200183-8 and No. 121031000144-5).

Authors' information

Orekhova Tat'yana Pavlovna — Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher in the sector of microclonal reproduction of forest, agricultural and Ornamental Plants, Federal Scientific Center for Biodiversity of Terrestrial Biota of East Asia FEB RAS, tp.orekhova@mail.ru

Malysheva Svetlana Konstantinovna — Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher at the Laboratory of Dendrology, Federal Scientific Center for Biodiversity of Terrestrial Biota of East Asia, FEB RAS, malyshevsveta@rambler.ru

Gorokhova Svetlana Valentinovna — Cand. Sci. (Biology), Head of the Department of Introduction of Woody Plants, Federal Scientific Center for Biodiversity of Terrestrial Biota of East Asia FEB RAS, svetagor63@mail.ru

Received 23.04.2024.

Approved after review 04.12.2024.

Accepted for publication 03.06.2025.

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

ОСОБЕННОСТИ РЕКРЕАЦИОННОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ФЛОРЫ, ЖИВОГО НАПОЧВЕННОГО ПОКРОВА И ДИНАМИКИ ПРИРОСТА ГОРОДСКИХ ЕЛЬНИКОВ

В.В. Тимофеева[✉], С.М. Синькевич

Институт леса — обособленное подразделение ФГБУН ФИЦ Карельский научный центр Российской академии наук», Россия, 185910, Республика Карелия, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, д. 11

timofeevavera2010@yandex.ru

Приведены результаты исследования флоры, древостоя и живого напочвенного покрова внутриквартальных городских еловых насаждений и примыкающих к городу контрольных лесных массивов. Флора внутригородских ельников в 2 раза богаче, чем на контрольных участках. Охарактеризовано изменение систематической и эколого-ценотической структуры флоры ельников под воздействием рекреационных нагрузок, в результате которых доля лесных видов уменьшается в 2,9 раза и заменяется на луговые и рудеральные элементы с пионерной стратегией. Установлено, что деградация травяно-кустарничкового яруса происходит при достижении площади вытаптывания 25...35 % и более; мохово-лишайниковый ярус начинает разрушаться уже при 15 % вытоптанной площади. В динамике радиального прироста на протяжении последних 40 лет выявлено общее для всех объектов возрастное снижение в среднем на 1,5 % в год. На его фоне отмечена устойчивая синхронность колебаний в пределах ± 30 % от среднего уровня, свидетельствующая об удовлетворительном состоянии городских еловых насаждений. Проявляющиеся в неблагоприятные сезоны депрессии прироста в последующие годы компенсируются усилением, но в случае повышенной степени рекреационной нагрузки становятся необратимыми. Указано, что нерегулируемая рекреация в будущем, даже при невысокой степени вытоптанности, может оказывать существенное отрицательное влияние на прирост древостоя. В качестве меры повышения устойчивости еловых насаждений рекомендовано формирование лиственных опушек.

Ключевые слова: городские леса, ель (*Picea abies*), радиальный прирост, флора города, живой напочвенный покров, видовое разнообразие

Ссылка для цитирования: Тимофеева В.В., Синькевич С.М. Особенности рекреационной трансформации флоры, живого напочвенного покрова и динамики прироста городских ельников // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 4. С. 52–63. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-52-63

Город Петрозаводск расположен на пологом макросклоне северо-восточной экспозиции, ограничен с востока акваторией Онежского озера, с запада окружен обширными площадями естественных преимущественно хвойных лесов, граничащих или перемежающихся с жилыми массивами и хозяйственными объектами [1, 2]. Благодаря преобладающим юго-западным и западным ветрам [3] эти леса создают благоприятные мезоклиматические условия на территории города, насыщая воздух кислородом, способствуя оздоровлению населения, являются местами отдыха и с каждым годом становятся все более востребованным рекреационным ресурсом [4, 5].

Активное взаимодействие города с окружающими лесами началось более трех веков назад с их вырубки для строительства, заготовки

топлива и прочих нужд. Важное значение в сведении лесов имело углежжение в больших масштабах для работы Александровского пушечно-литейного завода. Коренные сосново-еловые леса постепенно замещались производными насаждениями. По мере изменений в политике и экономике этот процесс циклически повторялся, в результате чего к середине XX в. в окружающих город лесах преобладали чистые спелые ельники.

Современный Петрозаводск по своей территориально-планировочной структуре является совокупностью административных, промышленных и жилых зон разного уровня урбанизации. Активное возведение новых микрорайонов в 1970-е гг. сопровождалось сохранением многочисленных, различных по площади островков естественных ельников, которые в настоящее время являются устойчивыми элементами урбоэкосистемы, испытывая при этом существенные рекреационные нагрузки. Безусловными

достоинствами еловых насаждений можно назвать круглогодичное эффективное задержание пыли и высокое шумопоглощение [6], имеющие важное для современной городской застройки значение. При этом низкая газоустойчивость ели в жилых районах первостепенной роли не играет.

Рекреационное воздействие на лесные сообщества многогранно [7] в силу сложности строения и разнообразия возможных вариантов породно-возрастной и типологической структуры, отраженных в показателях, предназначенных для измерения рекреационной нагрузки [8, 9]. Высказаны предложения о расширении их перечня с последующей сверткой информации до численного индекса, который учитывает также таксационную структуру древостоя, биоразнообразие и ландшафтную структуру оцениваемой территории [10]. При оценке рекреационной дигрессии лесов традиционно используют шкалы с набором признаков, характеризующих нарушение целостности древесного яруса и напочвенного покрова — основных индикаторов состояния лесных экосистем, подвергающихся антропогенному прессу [11–16].

Изменение лесных экосистем под воздействием рекреации (особенно в городах) сопровождается коренным преобразованием флоры. По мере нарастания дигрессии насаждений изменяется таксономическая, биоморфологическая и эколого-ценотическая структура флоры ельников.

В спектре ведущих по числу видов семейств резко снижается участие семейства Ericaceae и возрастает значение семейств Poaceae, Fabaceae, Asteraceae.

В спектре биоморф гемикриптофиты вытесняют криптофиты. Разнообразие видов в травяно-кустарничковом ярусе повышается, а в мохово-лишайниковом, наоборот, сокращается [17].

Устойчивость видов к вытаптыванию неодинакова, что объясняется особенностями их морфологии, биологии и экологии [18, 19]. Так, по отношению к вытаптыванию выделяют группы мало-, средне- и высокоустойчивых видов сосудистых растений и мхов [6, 20]. В условиях ельников черничных индикаторами стадий рекреационной дигрессии являются такие виды, как *Convallaria majalis* L., *Luzula pilosa* (L.) Willd., *Maianthemum bifolium* (L.) F. W. Schmidt, *Melampyrum sylvaticum* L., *Vaccinium myrtillus* L. Известны и некоторые другие виды, обилие которых резко изменяется в зависимости от нарушения напочвенного покрова [21].

Древостой наиболее устойчив к рекреационной нагрузке [22], но также подвержен изменениям в результате трансформации других

элементов лесных сообществ. Считается, что для ельников характерна слабая устойчивость к рекреационным нагрузкам, которая повышается с возрастом и при формировании разновозрастных насаждений [6]. К интегральным показателям жизненного состояния древостоя относят его текущий прирост, доступный для оценки как в статике, так и в динамике. По результатам большинства исследований, с усилением рекреационной нагрузки, диагностируемой по вытоптанности напочвенного покрова, наблюдается снижение радиального прироста деревьев. Степень такого снижения зависит от климатической зоны, древесной породы и стадии рекреационной дигрессии. Пороговым уровнем предложено считать переход от II к III стадии, в ходе которого снижение прироста за 10 лет составляет от 20 до 60 % по сравнению с контрольным вариантом или предшествовавшим базовым показателем [23]. По результатам этого же исследования, в дальнейшем наблюдалось как уменьшение прироста, так и высокая длительность его пребывания на достигнутом уровне.

В ельниках Карпат, находящихся на I и III стадиях рекреационной дигрессии, различия радиального прироста составляли от 5 до 20 % [27]. Аналогичные результаты (10...18 %) были получены для среднетаежных ельников Карелии [25]. Существенное снижение радиального прироста при достижении III стадии дигрессии древостоев отмечено в сосняках [17, 23, 26] и дубравах [27].

Встречаются случаи отсутствия изменений прироста во всем диапазоне стадий дигрессии или при усилении ее интенсивности [26, 28], а также увеличения ширины годичных слоев [17, 29] по отношению к предыдущему уровню. Причинами такого расхождения результатов служат, по-видимому, различия в подходах к оценке вытоптанности, размещения корневых систем в почвенных горизонтах и видового состава живого напочвенного покрова, что дает основание для внимательного рассмотрения каждого конкретного случая влияния рекреации на состояние лесных фитоценозов.

По итогам периода активных исследований лесной рекреации (1970–1980 гг.) было констатировано, что тема рекреационной дигрессии «...в отношении ельников ... до сих пор остается разработанной в значительно меньшей степени по сравнению с сосновыми и широколиственными лесами» [30]. По прошествии почти четырех десятилетий в «рекреационной» тематике исследований, судя по соотношению количества публикаций, касающихся бореальной зоны, представленность ельников по-прежнему

Т а б л и ц а 1

Общая характеристика объектов исследования
General characteristics of research objects

Номер участка	Категория участка	Площадь, га	Состав древостоя	Полнота, м ² /га	Высота, м	Класс бонитета	Вытоптанность, %
1к	Лес	25,0	10E ₁₃₀ +Ос, ед. Б, С	27	24	III, 5	5
2	Сквер 1	0,4	9E ₁₁₅ 1Б+Ос	18	22	III, 5	30
3к	Лес*	15,0	8E ₁₂₀ 2С	24	27	II, 5	10
4	Двор 1	0,4	9E ₁₁₅ 1Б+Ос	23	19	IV, 0	80
5	Двор 2	0,4	9E ₁₂₀ 1Ос+Б	24	20	IV, 0	30
6	Сквер 2	1,6	7E ₁₂₀ 2E ₈₀ 1С+Б	21	23	III, 5	50
7к	Лес	15,0	7E ₁₂₅ 2С1Ос+Б	23	26	III, 5	5

*На участке живой напочвенный покров не выбит, а только примят.

существенно отстает от сосняков и насаждений других пород как более привлекательных для посещения рекреационных объектов.

Цель работы

Цель работы — оценка состояния естественных еловых насаждений и перспектив их интеграции в городскую среду в связи с интенсивным освоением лесных участков под жилищное строительство.

Объекты и методы исследования

Исследование выполнено в 2021–2024 гг. в естественных спелых еловых древостоях с разной степенью рекреационной нагрузки, которые сохранились внутри городской застройки (табл. 1). Для сравнения в прилегающих к городской застройке ельниках черничной группы типов леса были подобраны три контрольных участка на I–II стадии дигрессии без явных нарушений напочвенного покрова и выраженной тропиночной сети (номера с индексом «к» в табл. 1).

На каждом участке на 3...5 круговых реласкопических площадках определяли абсолютную полноту с использованием призмы Анучина и среднюю высоту древостоя [31]. Для определения возраста и оценки динамики радиального прироста буравом Пресслера отбирали 70 кернов [32] со случайно выбранных доминирующих деревьев на высоте 1,3 м от поверхности земли. Ширину годичных колец измеряли с точностью отсчетов 0,01 мм на свежих зачищенных кернах с использованием измерительного комплекса [33] с полуавтоматической записью результатов на компьютере.

Для элиминации исходных различий между объектами данные о ежегодном радиальном

приросте каждого учетного дерева были нормированы делением на его средний периодический прирост за 1965–1974 гг. и далее анализировалась динамика погодичных средних индексов по каждому объекту. Геоботанические описания, выполнявшиеся с июня по август вегетационных сезонов 2021, 2023 и 2024 гг., включали в себя видовой состав, общее проективное покрытие (ОПП) живого напочвенного покрова (ЖНП), доминантных видов травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов, а также вытоптанность в процентах. При сравнении списков видов использовали коэффициент Сьеренсена — Чекановского (K_{sc}).

Результаты и обсуждение

В обследованных еловых насаждениях выявлено 113 видов сосудистых растений и 20 видов мхов. В древесно-кустарниковом и травяно-кустарничковом ярусах рекреационных ельников доминируют аборигенные виды (72 %), адвентивная фракция содержит менее 30 % всех видов флоры. Флора участков внутри застройки (дворы, скверы) характеризуется почти в 2 раза большим богатством, чем в ельниках черничных на контрольных участках (93 и 48 видов), что обусловлено экспансией заносных видов, доля которых составляет в среднем 34 % — несколько ниже, чем в целом для городских флор Карелии [34, 35].

В лесах, примыкающих к городской застройке, присутствие адвентивных видов в 10 раз ниже (табл. 2), они представлены только одичавшими древесными интродуцентами. Флора ельников на контрольных участках сохраняет черты малонарушенных среднетаежных лесов, для которых характерно полное отсутствие или незначительное (до 1,4...5,4 %) участие чужеродных видов [36, 37].

Т а б л и ц а 2

Общая характеристика флоры и живого напочвенного покрова**General characteristics of the flora of the ground cover**

Ярусы и показатели	1к	2	3к	4	5	6	7к
Число видов, ед.							
Деревья и кустарники*	7	12	10	5	13	19	5
Травяно-кустарничковый ярус	19	40	23	25	27	43	12
Мохово-лишайниковый ярус	11	4	9	3	7	3	8
Соотношение фракций флоры (сосудистые растения), %							
Аборигенная	100	64	94	65	66	69	92
Адвентивная	0	37	6	36	34	31	8
Проективное покрытие живого напочвенного покрова, %							
Общее	85	50	70	50	10	50	90
Травяно-кустарничковый ярус	70	50	35	50	10	40	50
Мохово-лишайниковый ярус	20	2	40	0	1	10	60
*Номера участков см. табл. 1.							

Т а б л и ц а 3

Представленность эколого-ценотических групп в городских ельниках, %**Representation of ecological-coenotic groups in urban spruce stands, %**

Эколого-ценотическая группа	1к	2	3к	4	5	6	7к
Болотная*	4,9	0,0	0,0	0,0	0,0	4,6	0,0
Лесная	90,2	35,7	85,7	53,7	51,6	49,2	92,0
Луговая	2,4	32,1	4,8	19,5	45,2	18,5	0,0
Опушечная	2,4	1,8	4,8	4,9	0,0	4,6	4,0
Открытых местообитаний	0,0	25,0	4,8	19,5	0,0	16,9	4,0
Прибрежная	0,0	5,4	0,0	2,4	3,2	6,2	0,0
*Номера участков см. табл. 1.							

Процесс изменения флоры городских ельников под воздействием рекреации отражает ее эколого-ценотическая структура: господствующее положение закономерно занимают лесные виды, во внутригородских насаждениях их участие резко (в 2,9 раза) снижается и существенно увеличивается участие луговых и рудеральных видов, предпочитающих открытые вторичные местообитания (пустыри, свалки, обочины дорог и т. п.) (табл. 3). При этом соответствующий достоверный рост индексов разнообразия Шеннона ($1,11 \pm 0,11$ и $1,62 \pm 0,24$) вряд ли следует считать индикатором увеличения устойчивости экосистемы.

Список видов, отмеченных в обследованных ельниках, охватывает 40 семейств, из которых 33 формируют флору ельников во дворах и скверах, а 26 — флору контрольных лесных участков. Наибольшее количество видов во

флоре внутриквартальных ельников отмечено для семейств Asteraceae (16 видов), Poaceae, Rosaceae (по 12), Fabaceae (5), Salicaceae и Scrophulariaceae (по 4 вида). По сравнению с ними во флоре контрольных участков ельников резко (в 5 раз) ослабевают позиция семейства Asteraceae (3 вида) и отсутствует семейство Fabaceae, а ведущее положение занимают семейства Poaceae и Rosaceae (по 6 видов). Для флоры ельников дворов и скверов характерна насыщенность «антропофильными» семействами (Brassicaceae, Caryophyllaceae, Chenopodiaceae и др.), включающими в себя адвентивные и устойчивые к рекреации аборигенные виды (*Lathyrus pratensis* L., *Stellaria media* (L.) Vill., *Vicia cracca* L. и др.). При этом флора контрольных лесных участков, даже в условиях непосредственной близости к городу, сохраняет основные зональные черты таксономического

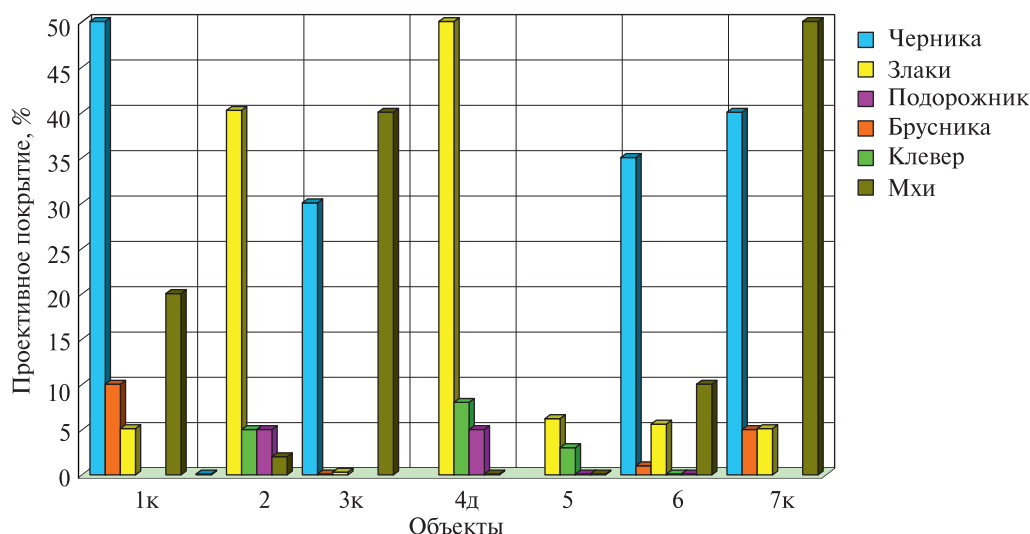


Рис. 1. Проективное покрытие доминантных видов живого напочвенного покрова в городских еловых насаждениях с разной рекреационной нагрузкой (номера участков см. табл. 1)

Fig. 1. Projective cover of dominant species of ground cover in urban spruce plantations with different recreational impact (see Table 1 for plot numbers)

спектра, свойственные насаждениям, не испытывающим антропогенный пресс.

Подлесок обследованных ельников сформирован 18 видами, из которых 11 — аборигенные деревья и кустарники (*Alnus incana* (L.) Moench, *Juniperus communis* L., *Prunus padus* L. и др.), 7 — популярные в регионе декоративные породы и ягодные кустарники (*Acer platanoides* L., *Amelanchier spicata* (Lam.) K. Koch, *Aronia mitschurinii* A. K. Skvorts. & Maitul., *Crataegus* sp., *Malus domestica* (Suckow) Borkh., *Quercus robur* L., *Sambucus racemosa* L.) встречающиеся в единичных экземплярах.

Всего в травяно-кустарничковом ярусе ельников зарегистрирован 91 вид сосудистых растений; внутри городской застройки — 71 вид, что резко отличается от контрольных участков ($K_{sc} = 0,28$), где видовое богатство травяно-кустарничкового яруса вдвое ниже (35 видов). Лесные кустарнички и многие травы не выдерживают антропогенного пресса в фитоценозах, существующих более 35 лет внутри городской застройки. Естественный травяно-кустарничковый ярус в ельниках дворов и скверов либо практически полностью выбивается, либо происходит его олуговение и рудерализация (рис. 1) за счет подсева газонных трав и расселения распространенных синантропных (*Agrostis capillaris* L., *Anthriscus sylvestris* (L.) Hoffm., *Deschampsia cespitosa* (L.) P. Beauv. и др.) и агрессивных инвазионных видов (*Ambrosia artemisiifolia* L., *Chelidonium majus* L., *Impatiens glandulifera* Royle). Похожее изменения в травяно-кустарничковом ярусе ельников города отмечались и ранее [2].

В рекреационных сосновых лесах северо-таежной подзоны Карелии при увеличении антропогенного воздействия также происходит существенная деградация ЖНП, но экспансия луговых видов крайне замедлена или отсутствует [38]. В контрольных лесных массивах травяно-кустарничковый ярус сохраняет базовые параметры, свойственные малонарушенным ельникам, в покрове здесь господствуют виды *Vaccinium myrtillus*, *V. vitis-idaea* L., *Oxalis acetosella* L., *Calamagrostis arundinacea* (L.) Roth и другие, типичные для лесов Карелии. Наибольшее видовое сходство травяно-кустарничкового яруса характерно для внутридворовых насаждений ($K_{sc} = 0,69$), а также для насаждений дворов и скверов ($K_{sc} = 0,43...0,57$). Сходство внутригородских ельников с контрольными участками минимальное ($K_{sc} = 0,05...0,18$ — дворы — контроли, $K_{sc} = 0,12...0,39$ — скверы — контроли), что свидетельствует о коренной трансформации травяно-кустарничкового яруса внутриквартальных ельников.

Вытаптывание крайне негативно влияет на состояние мохово-лишайникового яруса во дворах и скверах на участках жилой застройки. По мере увеличения площади вытаптывания мхи сохраняются только в приствольных зонах деревьев у корневых лап; лишайники отсутствуют. В ельниках за границей городской застройки, благодаря большей площади даже при заметной вытаптанности (5...10 %) или примятости ЖНП сохраняется как видовой состав мхов, так и характерное для лесов среднетаежной

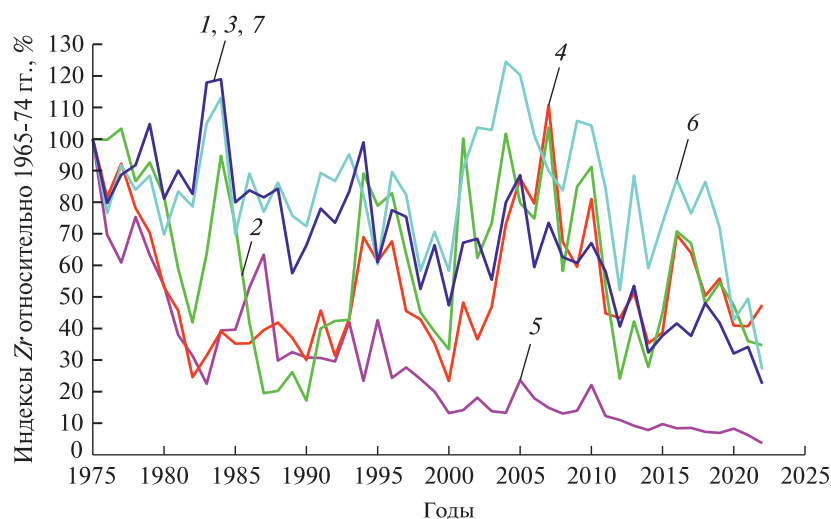


Рис. 2. Динамика радиального прироста ели, нормированного к среднему за 1965–1974 гг. в обследованных городских насаждениях (по контрольным участкам дано среднее значение): 1, 3, 7 — контрольные участки; 2 — сквер 1; 4 — двор 2; 5 — двор 1; 6 — сквер 2

Fig. 2. Dynamics of annual rings increment of spruce, normalized to the average for the period 1965–1974 in the surveyed urban forests, % (the average is shown for the control stands): 1, 3, 7 — control stands; 2 — square 1; 4 — yard 2; 5 — yard 1; 6 — square 2

подзоны высокое проективное покрытие доминантных видов (*Dicranum scoparium* Hedw., *Hylocomium splendens* (Hedw.) Schimp., *Pleurozium schreberi* (Willd. ex Brid.) Mitt. и др.). Максимально близки между собой видовые списки мхов во дворах ($K_{sc} = 0,60$) и скверах ($K_{sc} = 0,57$); состав мохового яруса ельников внутри застройки отличается от контрольных участков на 40...85 % ($K_{sc} = 0,15...0,40$). В целом резкая деградация ЖНП городских ельников (обеднение аборигенной фракции флоры и физическая деформация лесных трав и кустарничков) наблюдается при достижении площади вытаптывания 25...35 % и более. При этом существенная трансформация мохового яруса происходит уже при 15 % вытоптанной площади, что выражается в обеднении видового состава мхов и сокращении (в десятки раз) их проективного покрытия.

Динамика радиального прироста за последние полвека на всех обследованных объектах при имеющихся неизбежных различиях проявляет синхронность колебаний и ярко выраженную возрастную тенденцию снижения прироста после 1960 г. Различия индексов прироста между контрольными участками (№ 1к, 3к, 7к) оказались незначительными (коэффициент вариации 10...19 %), поэтому их среднее значение взято в качестве базового для оценки прироста всех насаждений внутри городской застройки (рис. 2).

Прирост во внутридворовых насаждениях за первые 10 лет после застройки снизился на 60...70 % (двор 1, двор 2) и в последующие 20 лет оставался на этом уровне. В дальнейшем, благодаря созданию мощных плитам дорожек, в одном из дворов (двор 2) прирост постепенно восстановился до уровня контроля, а в другом (двор 1) неуклонно уменьшается.

Формирование сквера 1 по соседству с лесным массивом происходило постепенно, начиная с расширения автомобильной трассы в 1986 г. и появления прилегающей застройки (1996 г.), вследствие чего первоначальная площадь лесного участка уже с 1991 г. сократилась вдвое. В результате такого постепенного осветления радиальный прирост деревьев стал заметно превышать его значения на контрольных участках, но в результате совмещения транзитной и рекреационной пешеходной нагрузки после 2015 г. существенно снизился. Сквер 2 представляет собой краевой остаток небольшого участка леса, середина которого в 1986 г. была вырублена и на протяжении 10 лет использовалась под рынок. По мере устройства окружающих транспортных и пешеходных путей антропогенная нагрузка существенно сократилась и прирост деревьев восстановился до уровня контроля, хотя в годы депрессий опускался до уровня внутридворовых насаждений (см. рис. 2). В последние два десятилетия индексы радиального прироста на этом объекте

находятся на уровне контрольных площадей, в том числе благодаря регулированию пешеходного потока и мерам рекультивации.

В ельниках внутри городской застройки, не испытывающих экстремальных нагрузок, индексы радиального прироста зачастую превышают уровень контрольных объектов, в которых сказывается влияние фактора конкуренции окружающего древостоя.

Ретроспективный анализ показал, что в долговременной динамике возможны периоды депрессии и восстановления прироста в зависимости от интенсивности и характера рекреационной нагрузки, если она не будет превышать некоторый критический порог. Использование в качестве базы «стартового» периода, предшествовавшего началу активного антропогенного воздействия, стандартизует условия для сравнения, но при этом усложняет понимание изменений, происходящих по прошествии почти полувекового периода. В связи с этим для оценки текущего состояния древостоев целесообразно оценить соотношение средней ширины годичных колец в 2018–2022 гг. и 2013–2017 гг., %:

1к (лес).....	105 ± 05
2 (сквер 1).....	88 ± 2
3к (лес).....	76 ± 3
4 (двор 1).....	84 ± 19
5 (двор 2).....	92 ± 6
6 (сквер 2).....	75 ± 9
7к (лес).....	103 ± 11

В среднем для всех обследованных насаждений в границах застройки изменение радиального прироста составляет 84 ± 5 %, а в контрольных древостоях 98 ± 4 %. Между изменением радиального прироста и степенью вытоптанности выявлена статистическая зависимость, характеризуемая коэффициентом корреляции $R = 0,59$. Приведенные данные в целом свидетельствуют об удовлетворительном состоянии обследованных насаждений. В то же время активная рекреация даже при средней степени вытоптанности (сквер 1) может оказывать существенное отрицательное влияние на прирост. Полученные результаты согласуются с мониторинговыми исследованиями конца XX в. [39, 40], согласно которым высокая загрязненность лесных подстилок серой и тяжелыми металлами сказалась на состоянии еловых древостоев незначительно, а основным фактором их дигрессии была признана нерегулируемая рекреация.

Выводы

1. Оценка состояния флоры, древесного яруса и живого напочвенного покрова насаждений

внутри городской застройки показала, что ельники в условиях города находятся в удовлетворительном состоянии, они успешно сохраняются в условиях перманентного (более 45 лет) антропогенного пресса и функционально устойчивы, о чем свидетельствует незначительное их отличие по радиальному приросту от контрольных участков, хотя по уровню деградаций живого напочвенного покрова эти сообщества соответствуют IV–V стадии рекреационной дигрессии.

2. Одной из причин долговременной устойчивости городских ельников, по-видимому, является сохранение при застройке микрорайонов естественной грубогумусной подстилки, пронизанной корнями кустарничков, которая на начальных стадиях рекреации защитила корни деревьев от повреждения. Подтверждает это отсутствие на всех обследованных объектах выбивания подстилки до минерального горизонта.

3. Необходимые условия для существования островков елового леса в городе — сохранение минимальной площади лесных участков и их функциональное зонирование путем регулирования антропогенных нагрузок за счет рационального обустройства дорожно-тропиночной сети.

4. В качестве перспективного варианта интеграции еловых насаждений в городскую среду можно рекомендовать искусственное формирование лиственных опушек, которые частично возникают естественным путем на периферии еловых островков и способствуют выживанию появляющегося естественного возобновления ели. Это позволит повысить общую устойчивость к неизбежному в будущем выпадению части елей вследствие усыхания и теоретически обеспечить смену поколений древостоя. Кроме того, в связи с высоким возрастом еловых насаждений необходимо отслеживание их санитарного состояния в целях обеспечения безопасности людей.

Благодарности

Авторы признательны М.А. Бойчук (ИБ КарНЦ РАН) и Р.П. Обабо (ИЛ КарНЦ РАН) за помощь в определении видов мхов.

Исследование выполнено в рамках государственных заданий ФИЦ КарНЦ РАН (Институт леса).

Список литературы

- [1] Кучко А.А. Оптимизация рекреационного лесопользования в зеленой зоне г. Петрозаводска // Оптимизация рекреационного лесопользования. М.: Наука, 1990. С. 32–38.

- [2] Новиков С.Г., Медведева М.В., Пеккоев А.Н., Тимофеева В.В. Диагностика почв, расположенных в градиенте урботехногенного воздействия // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева, 2021. № 108. С. 55–82. DOI: 10.19047/0136-1694-2021-108-55-82
- [3] Атлас Карельской АССР. М., 1989. 40 с.
- [4] Рысин Л.П., Рысин С.Л. Урболесоведение. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2012. 240 с.
- [5] 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
- [6] Юшкевич М.В., Шиман Д.В., Клыш А.С. Рекреационное лесоводство. Минск: Изд-во БГТУ, 2021. Кн. 1. 258 с.
- [7] Рысин Л.П. Рекреационное лесопользование: научные и практические аспекты // Лесобиологические исследования на северо-западе таежной зоны России: итоги и перспективы: Материалы науч. конф., посвященной 50-летию Института леса Карельского научного центра РАН, 3–5 октября 2007 г. Петрозаводск: Изд-во Карельского научного центра РАН, 2007. С. 83–94.
- [8] ОСТ 56-100-95. Методы и единицы измерения рекреационных нагрузок на лесные природные комплексы. М., 1995. 8 с.
- [9] Закацкий В.А., Мусин Х.Г. Оценка лесных территорий для массового отдыха по стадиям рекреационной дигрессии // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование, 2013. № 2 (18). С. 20–29.
- [10] Тарасова Н.П., Беднова О.В., Кузнецов В.А. Система городских охраняемых природных территорий и устойчивое развитие мегаполиса // Экология урбанизированных территорий, 2011. № 3. С. 12–17.
- [11] Карпишенова Р.А. Дубравы лесопарковой зоны г. Москвы. М.: Наука, 1967. 103 с.
- [12] Репшас Э.А., Палишкис Е.Е. Определение состояния и экологической емкости рекреационных лесов (методические рекомендации). Каунас: б. и., 1981. 16 с.
- [13] Кучко А.А. Диагностика нарушения рекреационных насаждений в Карелии // Экологическая безопасность рекреационного лесопользования: тез. докл. на Междунар. симп., 6–9 сентября 1988 г., Саласпилс. Саласпилс, 1988. С. 37–39.
- [14] Эмсис И.В. Опыт прикладного изучения лесов рекреационного назначения в Латвии // Оптимизация рекреационного лесопользования. М.: Наука, 1990. С. 15–23.
- [15] Таран И.В., Спиридонов В.Н., Беликова Н.Д. Леса города. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 196 с.
- [16] Рысин С.Л., Новоселов В.В., Федяева А.М. Рекреационный потенциал лесопарковых насаждений на территории ГБС РАН (г. Москва) // Актуальные проблемы лесного комплекса, 2020. № 56. С. 186–190.
- [17] Бурова Н.В., Феклистов П.А. Антропогенная трансформация пригородных лесов. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2007. 264 с.
- [18] Швалева Н.П., Феоктистов С.В., Залесова М.С., Годовалов Г.А. Влияние рекреационных нагрузок на видовой состав живого напочвенного покрова в условиях г. Снежинска // Леса Урала и хозяйство в них. Екатеринбург, 2004. Вып. 25. С. 147–151.
- [19] Полякова Г.А., Малышева Т.В., Флеров А.А. Антропогенное влияние на сосновые леса Подмосквы. М.: Наука, 1981. 144 с.
- [20] Рысина Г.П., Рысин Л.П. Оценка антропогенной устойчивости лесных травянистых растений // Природные аспекты рекреационного использования леса. М.: Наука, 1987. С. 26–35.
- [21] Казанская Н.С., Ланина В.В., Марфенин Н.Н. Рекреационные леса. М.: Лесная пром-сть, 1977. 96 с.
- [22] Грязькин А.В., Кочкин А.А., Петрик В.В. Динамика состава растительности нижних ярусов в парковых фитоценозах // ИзвВУЗ Лесной журнал, 2017. № 6. С. 46–55. DOI: 10.17238/ISSN0536-1036.2017.6.46
- [23] Дыренков С.А. Изменения лесных биогеоценозов под влиянием рекреационных нагрузок и возможности их регулирования // Рекреационное лесопользование в СССР. М.: Наука, 1983. С. 20–34.
- [24] Смаглюк К.К., Середин В.И., Питикин А.И., Парпан В.И. Исследование рекреационного лесопользования в Карпатах // Рекреационное лесопользование в СССР. М.: Наука, 1983. С. 81–95.
- [25] Кищенко И.Т., Ольхина Е.С. Рост вегетативных органов *Picea abies* (L.) Karst. в антропогенной среде // ИзвВУЗ Лесной журнал, 2021. № 3. С. 59–72. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-59-72
- [26] Матвеев С.М., Мироненко А.В., Тимашук Д.А. Лесоводственный и дендроклиматический анализ искусственных сосновых фитоценозов, подверженных рекреационной дигрессии в пригородной зоне г. Воронежа // Журнал Сибирского федерального университета. Биология, 2015. № 4. С. 410–425. DOI: 10.17516/1997-1389-2015-8-4-410-425
- [27] Исмаилов Н.И. Влияние рекреации на текущий прирост дубовых насаждений // Проблемы лесоведения и лесоводства: сб. науч. тр. ИЛ НАН Беларуси, 2015. Вып. 75. С. 451–459.
- [28] Кукарских В.В., Дэви Н.М., Бубнова М.О., Агафонов Л.И. Рекреация и радиальный прирост сосняков памятника природы «Озеро Тургой», Южный Урал // Экология, 2022. № 3. С. 189–201. DOI: 10.31857/S0367059722030076
- [29] Симоненков В.С., Симоненкова В.А., Гилязиева С.Р., Калякина Р.Г., Ангальт Е.М. Влияние рекреации на радиальный прирост сосны обыкновенной // Известия Саратовского университета. Серия: Химия. Биология. Экология, 2024. Т. 24. Вып. 1. С. 111–117. DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2024-24-1-111-117>
- [30] Рысин Л.П., Полякова Г.А. Влияние рекреационного лесопользования на растительность // Природные аспекты рекреационного использования леса. М.: Наука, 1987. С. 4–26.
- [31] Порядок отвода и таксации лесосек. Утвержден приказом Минприроды России от 17.10.2022 № 688. М., 2022. 32 с. URL: <https://minjust.consultant.ru/documents/33560> (дата обращения 27.03.2025).
- [32] Румянцев Д.Е., Липаткин В.А., Черакшев А.В., Воробьева Н.С. Методические рекомендации по отбору кернов древесины для целей дендрохронологических исследований в лесоведении и лесоводстве. М.: Профессиональная наука, 2022. 44 с. DOI: 10.54092/9785907607187
- [33] Шпалте Э.П. Новая техника для исследования ширины годовичных колец // Лесное хозяйство, 1974. № 1. С. 56–57.

- [34] Кравченко А.В., Гнатюк Е.П., Крышень А.М. Основные тенденции формирования флоры молодого таежного города (на примере г. Костомукши, Республика Карелия) // Биogeография Карелии (флора и фауна таежных экосистем). Труды КарНЦ РАН, 2003. № 4. С. 59–75.
- [35] Кравченко А.В., Тимофеева В.В., Рудковская О.А., Фадеева М.А. Сосудистые растения города Беломорска (Республика Карелия) // Труды КарНЦ РАН. Серия: Биogeография, 2016. № 7. С. 51–71. DOI: 10.17076/bg333
- [36] Бурова Н.В. Типологический анализ ценофлоры ельников Архангельской области // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Естественные науки. Архангельск, 2015. № 4. С. 35–43. DOI: 10.17238/issn2227-6572.2015.4.35
- [37] Геникова Н.В., Гнатюк Е.П., Крышень А.М. Ценофлора ельников черничных Восточной Фенноскандии // Ботанический журнал, 2019. Т. 104. № 5. С. 699–716. DOI: 10.1134/S0006813619050041
- [38] Timofeeva V., Kutenkov S. Analysis of recreational impact on living ground cover in forests on Paanajärvi National Park (Republic of Karelia, Russia) // Oulanka Reports. Oulun Yliopisto, Oulu, 2009, no. 29, pp. 16–26.
- [39] Синькевич С.М. Антропогенная динамика прироста ельников в зеленой зоне промышленного центра // Антропогенное воздействие на природу Севера и его экологические последствия: тез. докл. Всерос. совещ. Апатиты, 22–25 июня 1998 г. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра Российской академии наук, 1998. С. 181–182.
- [40] Дьяконов В.В., Крутов В.И., Синькевич С.М. Состояние лесов зеленой зоны г. Петрозаводска // Экологический мониторинг лесных экосистем: тез. докл. Всерос. совещ., Петрозаводск, 06–10 сентября 1999 г. Петрозаводск: Изд-во Карельского научного центра РАН, 1999. С. 41.

Сведения об авторах

Тимофеева Вера Владимировна✉ — канд. биол. наук, науч. сотр., Институт леса — обособленное подразделение ФГБУН ФИЦ «Карельский научный центр Российской академии наук» (ИЛ КарНЦ РАН), timofeevavera2010@yandex.ru

Синькевич Сергей Михайлович — канд. с.-х. наук, вед. науч. сотр., Институт леса — обособленное подразделение ФГБУН ФИЦ «Карельский научный центр Российской академии наук» (ИЛ КарНЦ РАН), sergei.sinkevich@krc.karelia.ru

Поступила в редакцию 05.02.2025.

Одобрено после рецензирования 24.03.2025.

Принята к публикации 15.04.2025.

FEATURES OF FLORA, GROUND COVER RECREATIONAL TRANSFORMATION AND WOOD INCREMENT OF URBAN SPRUCE FORESTS

V.V. Timofeeva✉, S.M. Sinkevich

Forest Research Institute of the Karelian Research Centre RAS, 11, Pushkinskaya st., 185910, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia

timofeevavera2010@yandex.ru

The article presents the study results of the flora, stand and ground cover of spruce block green belt and controlled wooded area adjacent to the city. The flora of inner-city spruce forests is 2 times richer than in test areas. A change in the systematic and ecological-cenotic structure of the spruce stands' flora under the influence of recreational impact is characterized, because of which the share of forest species decreases by 2.9 times and is replaced by meadow and ruderal elements with a groundbreaking strategy. It has been established that the degradation of the grass-shrub layer occurs when the trampling area reaches 25...35 % or more; the moss-lichen layer begins to collapse already at 15 % of the trampled area. Over the past 40 years, the dynamics of radial growth have revealed a general decline for all objects by an average of 1.5 % per year. Against its background, stable synchronism of oscillations within ± 30 % of the average level was noted, indicating a satisfactory state of urban spruce plantations. The growth depression during unfavorable seasons in subsequent years is compensated for by an intensive increase, but in the case of an increased degree of recreational impact, it becomes irreversible. It is indicated that unregulated recreation in the future, even with a low degree of trampling, can have a significant negative impact on the growth of stands. As a measure to increase the stability of spruce stands, the formation of deciduous edges is recommended.

Keywords: urban forest, spruce (*Picea abies*), annual rings increment, ground vegetation, floristic diversity

Suggested citation: Timofeeva V.V., Sin'kevich S.M. *Osobennosti rekreatsionnoy transformatsii flory, zhivogo napochvennogo pokrova i dinamiki prirosta gorodskikh el'nikov* [Features of flora, ground cover recreational transformation and wood increment of urban spruce forests]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 4, pp. 52–63. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-52-63

References

- [1] Kuchko A.A. *Optimizatsiya rekreatsionnogo lesopol'zovaniya v zelenoy zone g. Petrozavodsk* [Optimization of recreational forest management in the green zone of Petrozavodsk]. *Optimizatsiya rekreatsionnogo lesopol'zovaniya* [Optimization of recreational forest management]. Moscow: Nauka, 1990, pp. 32–38.
- [2] Novikov S.G., Medvedeva M.V., Pekkoev A.N., Timofeeva V.V. *Diagnostika pochv, raspolozhennykh v gradiente urbotekhnogennogo vozdeystviya* [Diagnostics of soils located in the gradient of urban-technogenic impact]. *Byulleten' Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaeva* [Dokuchaev Soil Bulletin], 2021, no. 108, pp. 55–82. DOI: 10.19047/0136-1694-2021-108-55-82
- [3] *Atlas Karel'skoy ASSR* [Atlas of the Karelian ASSR]. Moscow, 1989, 40 p.
- [4] Rysin L.P., Rysin S.L. *Urbolesovedenie* [Urban Forestry]. Moscow: Tovarichestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2012, 240 p.
- [5] 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
- [6] Yushkevich M.V., Shiman D.V., Klysh A.S. *Rekreatsionnoe lesovodstvo* [Recreational forestry]. Minsk: BGUTU, 2021, book 1, 258 p.
- [7] Rysin L.P. *Rekreatsionnoe lesopol'zovanie: nauchnye i prakticheskie aspekty* [Recreational forest management: scientific and practical aspects]. *Lesobiologicheskie issledovaniya na severo-zapade taizhnoy zony Rossii: itogi i perspektivy: mater. nauch. konf., posvyashchennoy 50-letiyu Instituta lesa Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Forest biology research in the northwest of the Russian taiga zone: results and visions: Proceedings of the Scientific Conference celebrating the 50th anniversary of the Forest Research Institute Karelian Research Centre of RAS]. Petrozavodsk, October 3–5, 2007. Petrozavodsk: Karelian Research Centre of RAS, 2007, pp. 83–94.
- [8] OST 56-100-95. *Metody i edinitsy izmereniya rekreatsionnykh nagruzok na lesnye prirodnye komplekсы* [Methods and units of measurement of recreational loads on forest natural complexes]. Moscow, 1995, 8 p. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/471826617> (accessed 15.11.2024).
- [9] Zakamskiy V.A., Musin Kh.G. *Otsenka lesnykh territoriy dlya massovogo otdykha po stadiyam rekreatsionnoy digressii* [Forests evaluation for tourism by recreational digression stages]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Forest. Ecology. Nature management], 2013, no. 2 (18), pp. 20–29.
- [10] Tarasova N.P., Bednova O.V., Kuznetsov V.A. *Sistema gorodskikh okhranyaemykh prirodnnykh territoriy i ustoychivoe razvitiye megapolisa* [The system of urban protected natural areas and sustainable development of the metropolis]. *Ekologiya urbanizirovannykh territoriy* [Ecology of urbanized territories], 2011, no. 3, pp. 12–17.

- [11] Karpisonova R.A. *Dubravyy lesoparkovoy zony g. Moskvy* [Oak groves of the forest park zone of Moscow]. Moscow: Nauka, 1967, 103 p.
- [12] Repshas E.A., Palishkis E.E. *Opredelenie sostoyaniya i ekologicheskoy emkosti rekreatsionnykh lesov (metodicheskie rekomendatsii)* [Determination of the state and ecological capacity of recreational forests (methodological recommendations)]. Kaunas, 1981, 16 p.
- [13] Kuchko A.A. *Diagnostika narushennosti rekreatsionnykh nasazhdeniy v Karelii* [Diagnostics of disturbance of recreational plantings in Karelia] *Ekologicheskaya bezopasnost' rekreatsionnogo lesopol'zovaniya: Tezisy dokl. na mezhdunar. simpoziume* [Ecological safety of recreational forest management: theses at the International Symposium], Salaspils, 06–09 September 1988. Salaspils, 1988, pp. 37–39.
- [14] Emsis I.V. *Opyt prikladnogo izucheniya lesov rekreatsionnogo naznacheniya v Latvii* [Experience of applied study of recreational forests in Latvia]. *Optimizatsiya rekreatsionnogo lesopol'zovaniya* [Optimization of recreational forest management]. Moscow: Nauka, 1990, pp. 15–23.
- [15] Taran I.V., Spiridonov V.N., Belikova N.D. *Lesa goroda* [City forests]. Novosibirsk: SB RAS, 2004, 196 p.
- [16] Rysin S.L., Novoselov V.V., Fedyaeva A.M. *Rekreatsionnyy potentsial lesoparkovykh nasazhdeniy na territorii GBS RAN (g. Moskva)* [Recreational potential of forest park plantations on the territory of the Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences (Moscow)]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex], 2020, no. 56, pp. 186–190.
- [17] Burova N.V., Feklistov P.A. *Antropogennaya transformatsiya prigorodnykh lesov* [Anthropogenic transformation of suburban forests]. Arkhangel'sk: Arkhangel'sk State Technical University, 2007, 264 p.
- [18] Shvaleva N.P., Feoktistov S.V., Zalesova M.S., Godovalov G.A. *Vliyaniye rekreatsionnykh nagruzok na vidovoy sostav zhivogo napochvennogo pokrova v usloviyakh g. Snezhinsk* [The influence of recreational loads on the species composition of the living ground cover in the conditions of the city of Snezhinsk]. *Lesa Urala i khozyaystvo v nikh* [Ural forests and their management]. Ekaterinburg, 2004, iss. 25, pp. 147–151.
- [19] Polyakova G.A., Malysheva T.V., Flerov A.A. *Antropogennoe vliyaniye na sosnovye lesa Podmoskov'ya* [Anthropogenic impact on pine forests of the Moscow region]. Moscow: Nauka, 1981, 144 p.
- [20] Rysina G.P., Rysin L.P. *Otsenka antropotolerantnosti lesnykh travyanistykh rasteniy* [Assessment of anthropotolerance of forest herbaceous plants]. *Prirodnye aspekty rekreatsionnogo ispol'zovaniya lesa* [Natural aspects of recreational use of forests]. Moscow: Nauka, 1987, pp. 26–35.
- [21] Kazanskaya N.S., Lanina V.V., Marfenin N.N. *Rekreatsionnye lesa* [Recreational forests]. Moscow, 1977, 96 p.
- [22] Gryaz'kin A.V., Kochkin A.A., Petrik V.V. *Dinamika sostava rastitel'nosti nizhnikh yarusov v parkovykh fitotsenozakh* [Dynamics of Understory Vegetation Structure in the Park Phytocenosis]. *Russian Forestry Journal*, 2017, no. 6, pp. 46–55. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.6.46
- [23] Dyrenkov S.A. *Izmeneniya lesnykh biogeotsenozov pod vliyaniem rekreatsionnykh nagruzok i vozmozhnosti ikh regulirovaniya* [Changes in forest biogeocenoses under the influence of recreational loads and the possibilities of their regulation]. *Rekreatsionnoye lesopol'zovanie v SSSR* [Recreational forest management in the USSR]. Moscow: Nauka, 1983, pp. 20–34.
- [24] Smaglyuk K.K., Seredin V.I., Pitikin A.I., Parpan V.I. *Issledovanie rekreatsionnogo lesopol'zovaniya v Karpatakh* [Research of recreational forest use in the Carpathians]. *Rekreatsionnoye lesopol'zovanie v SSSR* [Recreational forest management in the USSR]. Moscow: Nauka, 1983, pp. 81–95.
- [25] Kishchenko I.T., Ol'khina E.S. *Rost vegetativnykh organov Picea abies (L.) Karst. v antropogennoy srede* [Growth of vegetative organs *Picea abies* (L.) Karst. in anthropogenic environment]. *Russian Forestry Journal*, 2021, no. 3, pp. 59–72. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-59-72
- [26] Matveev S.M., Mironenko A.V., Timashchuk D.A. *Lesovodstvennyy i dendroklimaticheskiy analiz iskusstvennykh sosnovykh fitotsenozov, podverzhennykh rekreatsionnoy digressii v prigorodnoy zone g. Voronezha* [Silvicultural and dendroclimatic analysis of artificial pine phytocenoses exposed to recreational digression in a suburban Area of Voronezh]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Biologiya* [Journal of Siberian Federal University. Biology], 2015, no. 4, pp. 410–425. DOI: 10.17516/1997-1389-2015-8-4-410-425
- [27] Ismailov N.I. *Vliyaniye rekreatsii na tekushchiy prirost dubovykh nasazhdeniy* [The Impact of recreation on the current growth of oak plantations]. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva: sb. nauch. tr. IL NAN Belarusi* [Problems of Forest Science and Silviculture: coll. scientific papers of the Institute of Forestry of the National Academy of Sciences of Belarus.], Gomel', 2015, iss. 75, pp. 451–459.
- [28] Kukarskikh V.V., Devi N.M., Bubnova M.O., Agafonov L.I. *Rekreatsiya i radial'nyy prirost sosnyakov pamyatnika prirody «Ozero Turgoyak», Yuzhnyy Ural* [Recreation and radial growth of pine forests of the natural monument «Lake Turgoyak», South Urals]. *Ekologiya* [Russian Journal of Ecology], 2022, no. 3, pp. 189–201. DOI: 10.31857/S0367059722030076
- [29] Simonenkov V.S., Simonenkova V.A., Gilazieva S.R., Kalyakina R.G., Angal't E.M. *Vliyaniye rekreatsii na radial'nyy prirost sosny obyknovennoy* [Influence of recreation on radial growth of the common pine tree]. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Seriya: Khimiya. Biologiya. Ekologiya* [Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology], 2024, v. 24, iss. 1, pp. 111–117. DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2024-24-1-111-117>
- [30] Rysin L.P., Polyakova G.A. *Vliyaniye rekreatsionnogo lesopol'zovaniya na rastitel'nost'* [The impact of recreational forest use on vegetation]. *Prirodnye aspekty rekreatsionnogo ispol'zovaniya lesa* [Natural aspects of recreational use of forests]. Moscow: Nauka, 1987, pp. 4–26.
- [31] *Poryadok otvoda i taksatsii leseosek. Uverzhden prikazom Minprirody Rossii ot 17.10.2022 № 688* [The procedure for the allocation and taxation of logging areas. App. by order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated 17.10.2022 no. 688]. Moscow, 2022. 32 p. Available at: <https://minjust.consultant.ru/documents/33560> (accessed 27.03.2025).

- [32] Rumyantsev D.E., Lipatkin V.A., Cherakshev A.V., Vorob'eva N.S. *Metodicheskie rekomendatsii po otboru kernov drevesiny dlya tseley dendrokronologicheskikh issledovaniy v lesovedenii i lesovodstve* [Guidelines for the selection of wood cores for the purposes of dendrochronological studies in forestry and silviculture]. Moscow, 2022, 43 p. DOI: 10.54092/9785907607187
- [33] Shpalte E.P. *Novaya tekhnika dlya issledovaniya shiriny godichnykh kolets* [New technique for studying the tree rings width]. *Lesnoe khozyaystvo* [Silviculture], 1974, no. 1, pp. 56–57.
- [34] Kravchenko A.V., Gnatyuk E.P., Kryshen' A.M. *Osnovnye tendentsii formirovaniya flory mladogo taezhnogo goroda (na primere g. Kostomukshi, Respublika Kareliya)* [Main trends in the formation of the flora of a young city in taiga (case study of Kostomuksha, Republic of Karelia)]. *Biogeografiya Karelii (flora i fauna taezhnykh ekosistem)*. Trudy KarNTs RAN. Vyp. 4 [Biogeography of Karelia (flora and fauna boreal ecosystems). Proceedings of Karelian Research Centre of Russian Academy of Science. Vol. 4]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2003, pp. 59–75.
- [35] Kravchenko A.V., Timofeeva V.V., Rudkovskaya O.A., Fadeeva M.A. *Sosudistye rasteniya goroda Belomorska (Respublika Kareliya)* [Vascular plants of the town of Belomorsk, Republic of Karelia]. Trudy KarNTs RAN. Seriya: Biogeografiya [Transactions of the Karelian Research Centre of Russian Academy of Science. Biogeography Series], 2016, no. 7, pp. 51–71. DOI: 10.17076/bg333
- [36] Burova N.V. *Tipologicheskiy analiz tsenoflory el'nikov Arkhangel'skoy oblasti* [Typological analysis of spruce forests coenoflora (Arkhangel'sk region)]. *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta. Ser.: Estestvennyye nauki* [Vestnik of Northern (Arctic) Federal University. Series «Natural sciences»], 2015, no. 4, pp. 35–43. DOI: 10.17238/issn2227-6572.2015.4.35
- [37] Genikova N.V., Gnatyuk E.P., Kryshen' A.M. *Tsenoflora el'nikov chernichnykh Vostochnoy Fennoskandii* [Coenoflora of bilberry spruce forests in Eastern Fennoscandia]. *Botanicheskiy zhurnal* [Botanical J.], 2019, t. 104, no. 5, pp. 699–716. DOI: 10.1134/S0006813619050041
- [38] Timofeeva V., Kutenkov S. Analysis of recreational impact on living ground cover in forests on Paanajärvi National Park (Republic of Karelia, Russia). *Oulanka Reports*. Oulun Yliopisto, Oulu, 2009, no. 29, pp. 16–26.
- [39] Sin'kevich S.M. *Antropogennaya dinamika prirosta el'nikov v zelenoy zone promyshlennogo tsentra* [Anthropogenic dynamics of spruce forest growth in the green zone of the industrial center]. *Antropogennoe vozdeystvie na prirodu Severa i ego ekologicheskie posledstviya: Tezisy dokl. Vseross. soveshch. Kol'skiy NTs RAN* [Anthropogenic impact on the Nature of the North and its ecological consequences: report summary of the All-Russian Conference]. Apatity, 22–25 June 1998. Apatity: Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, 1998, pp. 181–182.
- [40] D'yakonov V.V., Krutov V.I., Sin'kevich S.M. *Sostoyanie lesov zelenoy zony g. Petrozavodsk* [The state of forests of the green zone of Petrozavodsk]. *Ekologicheskiy monitoring lesnykh ekosistem: Tezisy dokl. Vseross. soveshch. Izd-vo KarNTs RAN* [Ecological monitoring of forest ecosystems: report summary of the All-Russian conference]. Petrozavodsk, 06–10 September 1999. Petrozavodsk: Karelian Research Centre RAS, 1999, p. 41.

Acknowledgments

The authors are grateful to M.A. Boychuk (Institute of Forestry of the Karelian Institute of Science and Technology) and R.P. Obabko (Institute of Forestry of the Karelian Institute of Science and Technology) for their help in identifying moss species.

The study was carried out within the framework of state assignments of FIC Karelian Research Centre RAS (Forest Institute).

Authors' information

Timofeeva Vera Vladimirovna  — Cand. Sci. (Biology), Research Fellow, Forest Research Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (FRI KarRC RAS), timofeevavera2010@yandex.ru

Sin'kevich Sergei Mikhailovich — Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Forest Research Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (FRI KarRC RAS), sergei.sinkevich@krc.karelia.ru

Received 05.02.2025.

Approved after review 24.03.2025.

Accepted for publication 15.04.2025.

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

О ПРОЯВЛЕНИИ ИЗМЕНЧИВОСТИ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО ПРИЗНАКА СОСТОЯНИЯ КОРЫ КЕДРА СИБИРСКОГО (*PINUS SIBIRICA* DU TOUR.) ПРИ ЕГО ИНТРОДУКЦИИ В УСЛОВИЯХ ЛЕСОСТЕПИ В ПРЕДЕЛАХ ВОРОНЕЖСКОЙ ОБЛАСТИ

С.В. Левин

ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии» (ВНИИЛГИСБиотех), Россия, 394087, г. Воронеж, ул. Ломоносова, д. 105

leslesovik63@yandex.ru

Представлены материалы исследований интродукции кедра сибирского в условиях лесостепи Воронежской области. Определено полное соответствие процессов его жизнедеятельности условиям интродукции: густоте культур, ориентации по сторонам света, плодородию почвы. Установлено, что среди особей одного возрастного состояния в культурах не абсолютный возраст, а возрастное состояние выявляет их биологическое значение, отражаясь на феномене состояния коры. Выявлен самый высокий комплексный оценочный показатель среди групп феномена по коре у гладкокорых деревьев (9,37 см/см²), что связано с отставанием в развитии по времени и подтверждается заниженными величинами всех значений таксационных показателей. Показано, что при определении перспективности развития насаждения среди кандидатов по развитию самой многочисленной оказалась группа из деревьев с плитчатой корой (60,5 %), а самой малочисленной — группа из деревьев с гладкой корой (6,9 %). Указано, что при пересчете показателей на одно дерево наблюдается практически отсутствие особей с мужским цветением среди гладкокорых деревьев. Рекомендуется в перспективе при индивидуальном отборе деревьев применять комплексный оценочный показатель и учитывать при селекционном уходе состояние коры дерева, где из гладкокорой группы деревьев намечаются особи для удаления.

Ключевые слова: кедр сибирский, интродукция, культуры, таксационные показатели, изменчивость, комплексный оценочный показатель, феномен состояния коры

Ссылка для цитирования: Левин С.В. О проявлении изменчивости морфологического признака состояния коры кедра сибирского (*Pinus sibirica* du Tour.) при его интродукции в условиях лесостепи в пределах Воронежской области // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 4. С. 64–78. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-64-78

В литературе неоднократно подчеркивалась значимость изучения эколого-физиологических свойств и морфологических признаков кедра сибирского (*Pinus sibirica* du Tour.) и путей его селекции. Такие отличительные признаки, как долговечность, высокие эстетические, дезинфицирующие, почвоулучшающие, водорегулирующие свойства, определяют кедр сибирский как ценную древесную породу. Кроме того, широко используется в пищевой и фармацевтической промышленности, в медицине. Область распространения кедра сибирского охватывает районы северо-востока европейской части России, Урал, Западную и Восточную Сибирь и северную часть Монголии. В настоящее время ареал распространения кедра относит его к евроазиатскому типу, монголо-сибирско-европейскому подтипу [1–3]. Огромная протяжен-

ность ареала кедра сибирского в широтном и меридиальном направлениях свидетельствует о его обширной эколого-географической приспособленности, значительно большей не только по сравнению с другими кедровыми соснами, но и многими сопутствующими лесообразователями [4]. Следует подчеркнуть, что изучение изменчивости биоэкологических характеристик кедра сибирского очень важно для отбора деревьев с такими важными признаками, как скорость роста, обильность и регулярность семеношения, высокое качество орехов, смолопродуктивность и устойчивость к болезням.

Изучение наследственности и изменчивости кедра сибирского необходимо для выделения с помощью методов селекции ценных форм кедровых сосен в условиях интродукции. Успешный рост сибирского кедра во многих регионах страны, «цветение», семеношение южнее ареала являются важнейшим показателем его адаптации к новым условиям [5, 6].

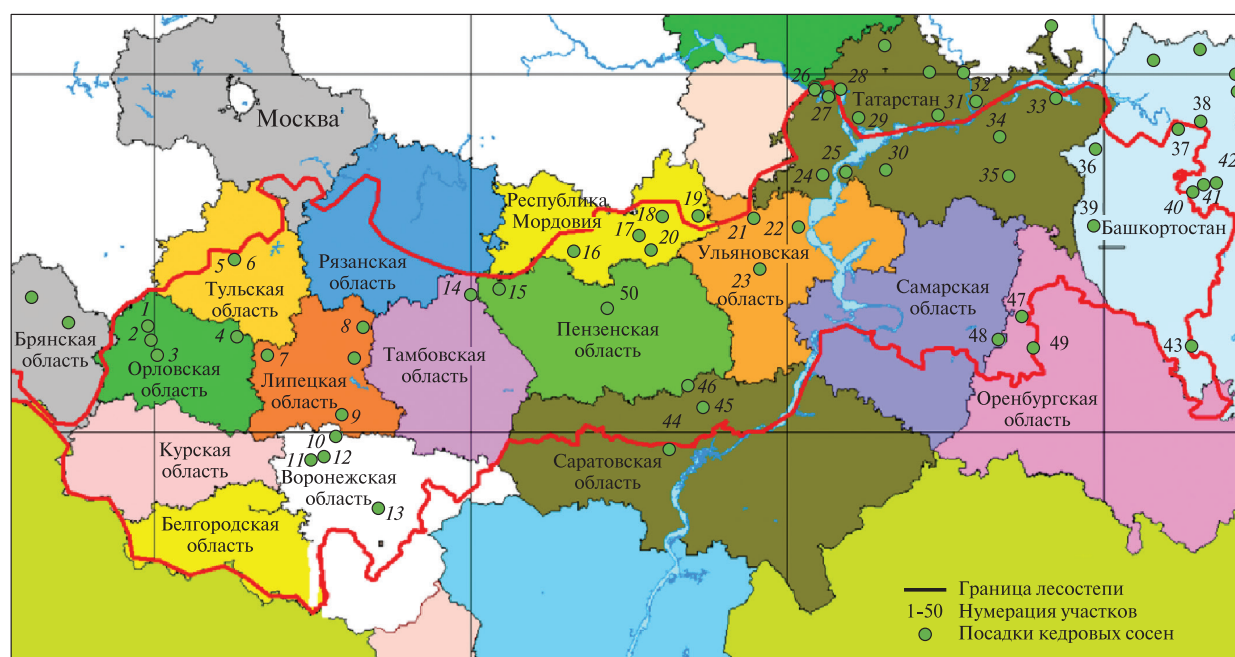


Рис. 1. Местонахождение посадок орехоносных кедровых сосен

Fig. 1. Location of nut-bearing cedar pines

К.К. Калущий, Н.А. Болотов нашли климатические особенности европейской части России вполне приемлемыми для успешной адаптации на уровне лесоводственной пластичности всех видов кедровых сосен. Для характеристики лимитирующих климатических условий интродукции используют три показателя: сумму температурных значений более 100 °С, абсолютные величины зимних значений температуры, к которым приспособляются интродуценты при определенной степени устойчивости, средний гидротермический коэффициент вегетационного периода [7].

Результаты исследований, проведенных в различных лесорастительных условиях, свидетельствуют о требовательности кедра к влажности и плодородию почвы, о его недостаточной конкуренции в смешанных молодняках. Культуры кедра целесообразно создавать в свежих и влажных сурамях, на достаточно богатых с прослойками глины супесчаных и легкосуглинистых почвах, хорошо обеспеченных обменным калием [8].

С момента этапа создания культур на территории лесостепи в пределах европейской части России детальные исследования на объектах проводились ограниченно, кроме начального периода их развития, что подчеркивает новизну исследований в настоящее время. На данный момент выявлен в пределах указанной территории 51 объект с участием кедровых сосен.

Распределение их по субъектам оказалось неравномерным, что подчеркивает незавершенность этапа интродукции кедровых сосен к 1990-м годам в условиях лесостепи (рис. 1). Изучение развития кедра сибирского проводилось в условиях интродукции и на территории Воронежской области [9–11].

На перспективность работ по выявлению изменчивости кедра указывал еще Л.Ф. Правдин [12], отмечая, что стоило лишь начать систематическое изучение, как были установлены различия в обилии урожайности, крупности шишек, жирности семян и других морфологических признаков. В пределах одного лесного насаждения кедр сибирский дифференцируется на группы деревьев (селекционные формы) по некоторым признакам и свойствам. Одни формы имеют более высокие показатели признаков и свойств, другие — менее, причем многие из них закреплены генетически и воспроизводятся из поколения в поколение [13]. С.А. Мамаев [14] делит изменчивость древесных растений на два типа: внутривидовую и внутриорганизменную (эндогенную). При изучении внутривидовой изменчивости было выявлено, что полиморфизм видов включает в себя все формы дифференциации. В работе И.В. Семечкина [15] дан перечень форм кедра сибирского:

- 1) по расположению хвои на побегах:
 - с пучкообразной плакучей хвоей;
 - ажурной;

2) по структуре коры:

- елововиднокорая;
- соснововиднокорая;

3) по репродуктивной деятельности:

- раноплодоносящая;
- с крайне неравномерным плодоношением;
- с неравномерным плодоношением;
- с равномерным плодоношением;
- с ускоренным развитием шишек;
- с комбинированным типом развития шишек;
- скороспелая;
- позднеспелая;

4) по конфигурации шишек (круглошишечные, цилиндрические, яйцевидные, конусовидные);

5) по развитию апофиза (крючковатые, бугорчатые, плоские).

В сосновых насаждениях со времени Зейтца (1927 г.) лесоводы Западной Европы выделяют четыре вариации деревьев по строению грубой коры: пластинчатокорую, чешуйчатокорую, ракушчатокорую и обычную (с низкоопущенной зеркальной корой) [14]. А.В. Думанским и А.Ю. Ишлинским [16] в результате проведения специальных опытов было установлено, что при росте ствола дерева в толщину корка продольными трещинами распадается на длинные отдельности в среднем одинаковой ширины: расстояние между трещинами увеличивается с увеличением возраста дерева. С.А. Мамаев [14] в своей работе отмечал, что признаки, характеризующие окраску, строение и толщину коры сосны, очень сильно изменяются в онтогенезе дерева, поэтому описание морфологических особенностей коры необходимо проводить на спелых деревьях VI–VII класса возраста.

В отношении строения коры ствола дерева у кедра сибирского наиболее полно на раннем этапе изучения были проведены исследования А.И. Ирошниковым [17] и Н.А. Луганским [18].

Н.А. Луганский [18] выделил деревья кедра сибирского с соснововидной и елововидной корой. Для деревьев с соснововидной корой по типу трещиноватости он выделил груботрещиноватые, продольно-правильнотрещиноватые, продольно-неправильнотрещиноватые, коротко-правильнотрещиноватые формы. Груботрещиноватая кора расчленена на крупные площадки глубокими продольными и поперечными трещинами, где ее окраска варьирует от светло-желтой до желтоватобурой. У елововиднокорых деревьев чешуйчатотрещиноватая кора характеризуется мелкими трещинами и небольшими межтрещинными площадками с серовато-черной окраской. Толщина коры у груботрещиноватокорых деревьев на 32...37 % больше, чем у чешуйчато-

трещиноватокорых. Наиболее урожайной селекционной формой является груботрещиноватокорая (соснововиднокорая), менее урожайной — чешуйчатотрещиноватокорая (елововиднокорая) [18].

А.И. Ирошников считает [17], что размер коры — в основном неустойчивый признак, который в значительной степени определяется условиями произрастания и дифференциацией деревьев в насаждении. По его мнению, соснововиднокорая группа деревьев тяготеет к высшим ступеням толщины. При этом чем выше бонитет или возраст, тем больше в насаждении участие соснововиднокорых деревьев. Чем ниже бонитет и возраст насаждений, тем большее участие елововиднокорых деревьев. Елововиднокорая группа располагается среди низших ступеней толщины. В одновозрастных насаждениях — это отставшие в росте деревья, а в разновозрастных — как отставшие в росте, так и самые молодые деревья.

В работе Ю.Н. Ильичева [19] отмечается, что в кедровниках в возрасте 140...190 лет превышения параметров высокосмолопродуктивных деревьев над среднепопуляционными составили следующие показатели: по диаметру ствола, глубине борозд коры, протяженности по стволу грубой корки — 30...40, толщине коры — 22...42, ширине пластин — 28...35 %. Таким образом, соснововиднокорая группа деревьев определяет категорию высоко-смолопродуктивных деревьев.

В условиях интродукции акцентирование внимания только на полезных качествах кедровых сосен (пищевых семенах, бальзаме, древесине, декоративности) без объективной характеристики их *адаптивной способности*, интенсивности роста, выхода деловой древесины, *генетического потенциала* и возможности сохранения урожая является явно недостаточным при разработке целевых программ расширения ареала кедровых сосен [20]. В условиях интродукции при наступлении определенного возраста кедра в культурах после удаления сопутствующих пород и в соответствии с заданной интенсивностью изреживания возникает необходимость затрагивания кедрового элемента. Учитывая особую ценность вида в несвойственных ему условиях интродукции, по отношению к нему следует применять селекционный метод рубок ухода [13], основанный на законе внутривидовой изменчивости.

Цель работы

Цель работы — выявление изменчивости морфологического признака состояния коры кедра сибирского и его значение в определении



Рис. 2. Деревья по состоянию коры на объекте: *а* — бороздчатые; *б* — плитчатые; *в* — гладкокорые
Fig. 2. Trees according to the state of the bark on the object: *a* — furrowed; *б* — platy; *в* — smooth-barked

перспективности развития насаждения при интродукции в условиях лесостепи Воронежской области.

Материалы и методы

Исследования проводились на территории Семилукского коллекционно-маточного дендрария на территории Воронежской области в насаждении кедра сибирского возрастом 38 лет с его определением как географической культуры, созданной из семенного фонда Горного Алтая. Исходная густота культур при размещении 2×1 м составляла 4755 шт./га. На момент исследования густота составляла 1848 шт./га при сохранности 38,9 %.

В ходе работ лесные культуры интродуцированных пород изучали по высоте дерева и диаметру ствола на высоте 1,3 м от поверхности земли [21] с установлением значений дополнительных таксационных параметров: высоты прикрепления живой ветви, диаметра кроны. Было установлено наличие многовершинности, выявлено заселение лишайником, определено семеношение и мужское цветение. Оценка урожая семян проводилась по методике Центрального научно-исследовательского института лесной генетики и селекции (ЦНИИЛГиС) глазомерно по наличию шишек в кроне деревьев по категориям от 0 до III [22].

Расположение деревьев на площади картировалось для исчисления площади роста

деревьев по расстоянию до третьего соседнего дерева [23] и установлению степени перекрытия пространства кронами деревьев.

С применением комплексного оценочного показателя (КОП) для определения перспективности развития насаждения были выделены две группы деревьев: 1) кандидаты по развитию; 2) за исключением кандидатов. Показатель рассчитывался для деревьев как отношение средней высоты древостоя (H , см) к площади поперечного сечения среднего дерева в древостое ($G_{1,3}$, см²) на высоте 1,3 м от поверхности земли

$$\text{КОП} = \frac{H}{G_{1,3}}.$$

Содержание КОП заключается в характеристике величины древесного ствола, которая была обеспечена единицей площади поперечного сечения ствола. Более полувека тому назад этот показатель был предложен К.К. Высоцким [24]. Применение он получил в различных аспектах исследования насаждений и деревьев при оценке их жизненного состояния [25, 26].

По состоянию коры ствола на высоте 1,3 м от поверхности земли деревья визуально распределялись по группам: бороздчатая, плитчатая и гладкокорая (рис. 2).

Полученный материал статистически обрабатывался с применением программы Statistica 6.0. Степень изменчивости по коэффициентам вариации (C_v , %) характеризовали



Рис. 3. Общий вид культур

Fig. 3. General view of crops

с использованием шкалы, разработанной применительно к древесным растениям [27]. Анализировали корреляцию по коэффициенту (r).

Результаты и обсуждение

Создание географических культур в районе интродукции кедра — это этап организации постоянной лесосеменной базы кедр сибирского в перспективе. В.И. Некрасов [28, 29] и А.И. Ирошников [30] подчеркивали, что процесс акклиматизации растений протекает только при семенном размножении и смене поколений интродуцентов, в зависимости от наличия и качества семян местной репродукции. Индивидуальный отбор в культурах позволит получить исходный материал для лесосеменных плантаций первого порядка, а после проверки по потомству — второго порядка.

Обследованный объект представлен насаждением IV класса бонитета возрастом 38 лет (I класс возраста) на площади 0,1 га. Тип лесорастительных условий — Д₂. Учетные при оценке семеношения деревья отнесены к кате-

гории деревьев, имеющих единичное количество шишек до 10 шт. Почва — выщелоченный чернозем (рис. 3).

На момент исследований мы наблюдали ситуацию по перекрытию расчетных значений, приходящихся на одно дерево по следующим показателям: площадь проекции кроны (S_k) и площадь роста дерева (S_p) как в целом, так и по рядам от опушки вглубь насаждения (рис. 4).

Выявлена высокая степень перекрытия площадей проекции кроны в опушечном ряду (ряд 1 — 83,76 %) при ее снижении вглубь насаждения (ряд 5 — 19,1 %). По перекрытию площадей роста, за исключением размещения деревьев в 3-м ряду, значения показателей достаточно выровненные. Это указывает на благоприятное сочетание факторов размещения посадочного материала на площади как в междурядье (2 м) и ряду (1 м), так и при расположении рядов — с северо-востока на юго-запад.

На момент исследования густота составляла 1848 шт./га при сохранности 38,9 % по причине выпадения растений в первые 5 лет, позднее выкопке деревьев с корневой системой и вырубке деревьев в 1990-е годы (что подтверждается наличием «живых пней» и ям). Выпадение растений на начальном этапе — это закономерное явление даже в условиях создания культур на территории естественного ареала [5, 31, 32], а при его культивировании южнее границы ареала к шести годам сохраняется около 60 % высаженных сеянцев [33].

Как отмечено в лесной таксации по размерам деревьев, их распределение в одновозрастном насаждении характеризуется кривой нормального распределения, имеющей значительную асимметрию [34]. При этом указано, что деревья изменяются по диаметру ствола следующим образом: с наибольшей величиной отличается от среднего на 70 %, а с наименьшей — на 50 %. В отношении отклонения величин высот деревьев от среднего значения в сторону увеличения — 10...14 %, а снижения — 20...32 %. В данном случае получены следующие результаты: по диаметру — увеличение на 60,3 %, снижение — на 54,2 %; по высоте дерева — 31,9 и 39,6 % соответственно. Как видим, при сравнении с имеющимися результатами из литературного источника по итогам исследования наблюдаются отклонения по превышению наибольших значений по высоте дерева от среднего параметра.

По изменчивости признаков наиболее стабильными оказались диаметр ствола (20,1 %) и высота дерева (14,2 %), которые обеспечивают однородность выборки (табл. 1).

На основании изложенного выше можно свидетельствовать о хорошем протекании про-

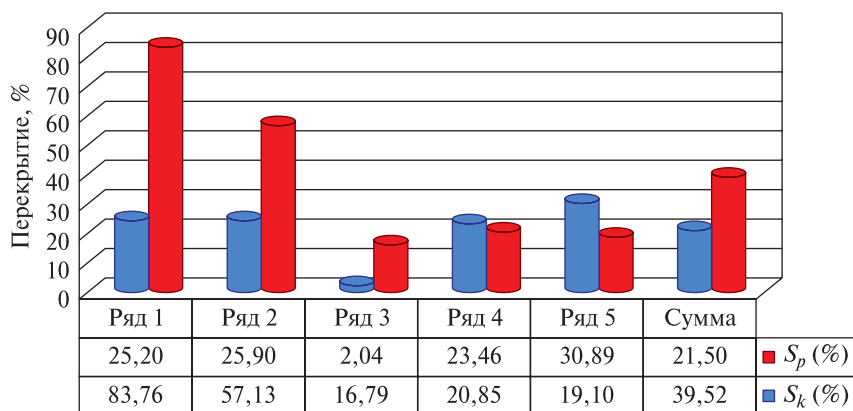


Рис. 4. Соотношение перекрытий по проекции кроны и площади роста деревьев с расчетными значениями

Fig. 4. The percentage overlaps according to the projection of the crown, the area of growth of trees with calculated values

Т а б л и ц а 1

Статистические данные по показателям на объекте

Statistical data on indicators at the facility

Показатели	Диаметр на высоте 1,3 м от поверхности земли $D_{1,3}$, см	Высота дерева H , м	Высота крепления живой ветки $h_{ж.в.}$, м	Диаметр кроны $D_{кр}$, м	Объем ствола V , м ³	Расстояние до третьего соседнего дерева (L_3), м	Площадь роста S_p , м ²	Площадь проекции кроны S_k , м ²	Комплексный оценочный показатель, см/см ²
M	13,1	9,1	3,0	2,9	0,079	2,2	6,6	6,8	7,53
m	0,22	0,11	0,12	0,06	0,003	0,06	0,33	0,29	0,284
σ	2,63	1,29	1,41	0,68	0,0346	0,68	3,86	3,32	3,31
min	6	5,5	0,15	4,8	0,23	3,7	22,82	18,1	22,37
max	21	12	6	1,3	0,0105	0,8	1,175	1,33	3,13
$t(95,0 \%)$	0,45	0,22	0,24	0,11	0,01	0,11	0,65	0,56	0,56
C_v , %	20,1	14,2	46,4	23,7	44,3	30,9	58,3	48,7	44

цессов роста и развития насаждения на момент исследований без обострения процессов дифференциации, что является положительным стечением следующих обстоятельств: плодородия почвы, густоты посадки и размещения рядов по отношению к сторонам света. Для подтверждения вывода можно привести значение показателя категории санитарного состояния насаждения — 1,3, характеризующего насаждение как здоровое.

Следует иметь в виду, что в условиях культур, где складывается иная биоценотическая обстановка по сравнению с природными популяциями, отдельные формы будут развиваться по-иному, чем в условиях жесткой конкуренции, существующей в лесных биогеоценозах. Значимость КОП при его применении для выявления особей с высокими таксационными пока-

зателями и ускоренным развитием подтверждается его корреляцией (табл. 2) со следующими показателями:

- тесная связь — диаметр ствола ($-0,88$);
- значительная связь — объем ствола ($-0,66$), площадь роста ($-0,69$), диаметр кроны ($-0,53$);
- умеренная связь — площадь проекции кроны ($-0,47$).

При этом объем ствола как показатель, кроме диаметра ствола, площади его поперечного сечения (q_i , м²) и высоты дерева, которые его определяют, тесно коррелирует с площадью роста S_p — 0,78 и значительно с площадью проекции кроны S_k — 0,55 и, соответственно, с диаметром кроны $D_{кр}$ — 0,57.

Как отмечалось, у решения как относиться, к показателю состояния коры нет единой точки зрения: считать его наследственным признаком

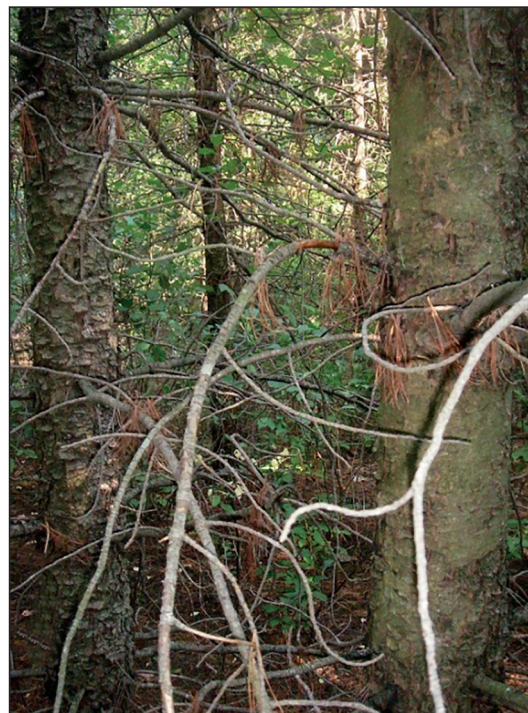
Т а б л и ц а 2

Корреляционная зависимость показателей
Correlation dependence of indicators

Показатели	Диаметр на высоте 1,3 м от поверхности земли $D_{1,3}$, см	Высота дерева H , м	Высота крепления живой ветки $h_{ж.в.}$, м	Диаметр кроны $D_{кр.}$, м	Площадь сечения ствола q_i , м ²	Расстояние до третьего соседнего дерева Li , м	Площадь роста S_p , м ²	Площадь проекции кроны S_k , м ²	Объем ствола V , м ³	Комплексный оценочный показатель (КОП), см/см ²
$D_{1,3}$, см	1,00									
H , м	0,41	1,00								
$h_{ж.в.}$, м	0,00	-0,05	1,00							
$D_{кр.}$, м	0,63	0,44	-0,35	1,00						
q_i , м ²	0,99	0,39	0,00	0,61	1,00					
Li , м	0,30	-0,11	-0,40	0,33	0,32	1,00				
S_p , м ²	0,84	0,22	-0,21	0,60	0,86	0,72	1,00			
S_k , м ²	0,59	0,41	-0,34	0,99	0,58	0,33	0,58	1,00		
V , м ³	0,88	0,54	0,00	0,57	0,90	0,27	0,78	0,55	1,00	
КОП, см/см ²	-0,88	-0,15	-0,04	-0,53	-0,82	-0,28	-0,69	-0,47	-0,66	1,00



а



б

Рис. 5. Примеры различия по состоянию коры: а — в случае с порослевым побегом; б — при размещении на площади

Fig. 5. Examples of differences in the state of the bark: а — in the case of an overgrown shoot; б — when placed on an area

Т а б л и ц а 3

Характеристика таксационных показателей с учетом перспективности и состояния коры

Characteristics of taxation indicators, taking into account the prospects and condition of the bark

Феномен по коре	Диаметр на высоте 1,3 м от поверхности земли $D_{1,3}$, см	Высота дерева H , м	Высота крепления живой ветки $h_{ж.в}$, м	Диаметр кроны $D_{кр}$, м	Объем ствола V , м ³	Расстояние до третьего соседнего дерева Li , м	Площадь роста S_p , м ²	Площадь проекции кроны S_k , м ²	Количество деревьев N		От общего итога, %
									шт.	%	
Кандидаты по развитию											
Плитчатые	15,96	9,18	3,25	3,32	0,102	2,4	10,00	9,06	26	60,5	19,1
Бороздчатые	15,71	9,18	2,91	3,11	0,113	2,8	11,23	7,87	14	32,6	10,3
Гладкокорые	16,67	9,03	2,40	3,17	0,127	2,2	10,05	7,94	3	6,9	2,2
Итого:	15,93	9,17	3,08	3,24	0,107	2,5	10,40	8,60	43	100	31,6
За исключением кандидатов											
Плитчатые	12,37	9,30	3,22	2,77	0,070	2,0	5,04	6,35	41	44,1	30,1
Бороздчатые	11,73	9,04	2,67	2,76	0,060	2,4	5,53	6,31	15	16,1	11
Гладкокорые	11,27	8,88	2,88	2,60	0,063	2,1	4,41	5,61	37	39,8	27,3
Итого:	11,83	9,09	3,00	2,70	0,066	2,1	4,87	6,05	93	100	68,4

или возрастным состоянием. Возрастное состояние (биологический возраст, физиологический возраст, возраст) определяется как физиологическое и биохимическое состояние индивида, отражающее определенный этап онтогенеза. Это — период индивидуального развития. Все особи в популяции остаются в соответствующем возрастном состоянии в течение определенного периода времени, т. е. растения одного и того же календарного возраста могут находиться в разных возрастных состояниях. Особи с одинаковым возрастным статусом функционально схожи, и возрастной статус, а не абсолютный возраст, обычно отражает ее биологическую роль в популяции и в ценозе [35]. Так на рис. 5 видны различия по состоянию коры как в случае с порослевым побегом — стволом (гладкокорая) и его основным стволом (бороздчатая) (см. рис. 5, а), так и при размещении на площади (см. рис. 5, б) (на переднем плане — гладкокорая, за ней — плитчатая).

С применением КОП для определения перспективности развития насаждения выделены две группы деревьев: 1) кандидаты по развитию; 2) за исключением кандидатов (табл. 3).

В соответствии с данными табл. 3 среди кандидатов по развитию самой многочисленной оказалась группа из деревьев с плитчатой корой (60,5 %), а самой малочисленной — группа из

деревьев с гладкой корой (6,9 %). К кандидатам по развитию в целом можно отнести 31,6 % всех наблюдаемых деревьев. Из остального количества деревьев (68,4 %), за исключением кандидатов, к самой малочисленной группе относятся деревья с бороздчатой корой (16,1 %). Показатели, по которым выделяется группа деревьев — кандидатов по развитию — это диаметр ствола $D_{1,3}$, диаметр кроны $D_{кр}$ с соответствующей площадью проекции кроны S_k , площадью роста S_p и объемом ствола V . Превышения показателей у этой группы деревьев по отношению к остальным деревьям по указанным показателям составили:

- по диаметру ствола — 34,7 %;
- по диаметру кроны — 20 %;
- по площади проекции кроны — 42,1 %;
- площади роста — 113,6 %;
- объему ствола — 62,1 %.

Не наблюдалось существенных различий по остальным таксационным показателям: высоте дерева H , высоте прикрепления живой ветки $h_{ж.в}$, расстоянию до третьего соседнего дерева Li .

Весьма интересным следует считать соотношение между группами деревьев как по морфологическим признакам (многовершинности, наличию лишайника), так и показателям, характеризующим генеративную сферу развития (мужскому цветению, семеноношению) (рис. 6).

Т а б л и ц а 4

Характеристика многовершинности, наличия лишайника и показателей репродуктивной сферы с учетом перспективности и состояния коры
Characteristics of multi-toppedness, the presence of lichen and indicators of the reproductive sphere, considering the prospects and condition of the bark

Феномен по коре	Комплексный оценочный показатель, см/см²	Многовершинность		Семеношение		Мужское цветение		Наличие лишайника	
		шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%
Кандидаты по развитию									
Плитчатые	4,62	6	85,7	21	56,8	12	2,2	5	5,7
Бороздчатые	4,83	1	14,3	13	35,1	11	7,8	7	0,0
Гладкокорые	4,17	–	–	3	8,1	–	–	2	4,3
Итого:	4,66	7	100	37	100	23	100	14	100
За исключением кандидатов									
Плитчатые	8,13	7	43,7	18	40,0	10	55,6	8	4,4
Бороздчатые	8,58	2	12,6	7	15,6	5	27,8	3	6,7
Гладкокорые	9,79	7	43,7	20	44,4	3	16,6	7	38,9
Итого:	8,86	16	100	45	100	18	100	18	100

Т а б л и ц а 5

Характеристика групп деревьев по состоянию коры с учетом комплексного оценочного показателя
Characteristics of tree groups by bark condition considering a comprehensive assessment indicator

Феномен по коре	Диаметр на высоте 1,3 м от поверхности земли $D_{1,3}$, см	Высота дерева H , м	Высота крепления живой ветки $h_{ж.в.}$, м	Диаметр кроны $D_{кр}$, м	Объем ствола V , м ³	Расстояние до третьего соседнего дерева Li , м	Площадь роста S_p , м ²	Площадь проекции кроны S_k , м ²	Комплексный оценочный показатель, см/см ²	Количество деревьев N	
										шт.	%
Плитчатые	13,76	9,26	3,23	2,99	0,083	2,12	6,97	7,41	6,77	67	49,3
Бороздчатые	13,66	9,11	2,79	2,93	0,085	2,56	8,28	7,06	6,77	29	21,3
Гладкокорые	11,68	8,89	2,85	2,64	0,068	2,07	4,83	5,78	9,37	40	29,4
Итого:	13,13	9,12	3,04	2,87	0,079	2,20	6,62	6,82	7,53	136	100

Данные табл. 4 позволяют установить следующие соотношения между показателями групп деревьев — кандидатов по развитию и оставшейся части (%):

- по многовершинности — 30,4/69,6;
- семеношению — 45,1/54,9;
- мужскому цветению — 56,1/43,9;
- наличию лишайника — 43,8/56,2.

За исключением признака мужского цветения, группа деревьев — кандидатов по развитию находится в меньшинстве. Это подчеркивает тот факт, что насаждение еще только находится в начале генеративной фазы развития по возрасту и состоянию.

По значениям КОП среди групп феномена по коре (табл. 5) наблюдаем высокий показатель у гладкокорых деревьев (9,37 см/см²), что связано с их отставанием в развитии по времени. Также этим деревьям в целом свойственны заниженные значения практически всех показателей. От общего количества деревьев эта группа составляет 29,4 %, что следует учитывать при проведении рубок ухода в перспективе. Остальные деревья двух групп: плитчатые и бороздчатые не сильно разнятся между собой по показателям. Учитывая значение показателя расстояния до третьего соседнего дерева в группах с учетом феномена по коре, можно сказать

Т а б л и ц а 6

Характеристика групп деревьев по состоянию коры с учетом показателей генеративной сферы, многовершинности, наличия лишайника

Characteristics of tree groups by bark condition, taking into account indicators of the generative sphere, multi-peakedness, and the presence of lichen

Феномен по коре	Многовершинность, шт.	Семеношение, шт.	Мужское цветение, шт.	Наличие лишайника, шт.
Плитчатые	0,19	0,58	0,33	0,19
Бороздчатые	0,1	0,69	0,55	0,34
Гладкокорые	0,18	0,58	0,08	0,23
Итого:	0,18	0,6	0,3	0,24

об отсутствии влияния такового на проявления состояния коры у деревьев.

По соотношению количества деревьев в группах (плитчатые — 49,3 %, бороздчатые — 21,3 % и гладкокорые — 29,4 %) ситуация иная по сравнению с той, что отмечена в работе Н.А. Луганского [13]. Он указал соотношение деревьев с груботрещиноватой корой и чешуйчатотрещиноватых (с учетом бонитета кедровников на Урале в возрасте около 200 лет с участием кедра) — не менее 30 %, которое варьирует от 50 : 50 (Va бонитет) до 86 : 14 (II бонитет). В данном случае к деревьям с груботрещиноватой корой относится группа с бороздчатой корой (21,3 %). Бесспорно, наблюдаемое различие значений связано с возрастом объектов и, как следствие, ожидаемой (объект исследований) и прошедшей (объект из источника) дифференциациями деревьев.

Исходя из данных табл. 6, при пересчете показателей на одно дерево наблюдается практически отсутствие особей с мужским цветением среди гладкокорых деревьев, что подчеркивает заторможенность их развития.

При этом по количеству особей среди деревьев с несколькими вершинами особи с бороздчатой корой самые малочисленные, но по остальным показателям отличаются от средней величины общего итога по группам деревьев превышением на 15 % — по семеношению, на 83 % — по мужскому цветению и на 41,6 % — по наличию лишайника (см. табл. 6). Отличие группы деревьев с бороздчатой корой по наличию лишайника связано с глубокими бороздами для заселения и развития лишайника (см. рис. 6, б).



а



б

Рис. 6. Микростробилы кедра сибирского в культурах (а); лишайник на стволе дерева (б)

Fig. 6. Microstrobos of Siberian cedar in cultures (a); lichen on the trunk of a tree (b)

Выводы

Полученные результаты на момент исследования выявили ход протекания процессов роста и развития насаждения без обострения процесса дифференциации, что является результатом

положительного стечения следующих обстоятельств: плодородия почвы, густоты посадки и размещение рядов по отношению к сторонам света. По изменчивости таксационных признаков (C_v , %) стабильными оказались как диаметр ствола (20,1 %), так и высота дерева (14,2 %) при величине показателя категории санитарного состояния насаждения — I,3, характеризующее насаждение как здоровое.

Установленная многоплановость морфологических характеристик состояния коры кедров сибирского определяется внутренними свойствами организма, так как среди особей одного возрастного состояния в культурах не абсолютный возраст, а возрастное состояние отражает их биологическое значение. С целью выявления жизненного состояния деревьев с учетом феномена коры примененный комплексный оценочный показатель позволил выявить отставание в развитии по времени группы гладкокорых деревьев (9,37 см/см²), что наряду с ним подтверждают заниженные величины всех других показателей. Также указано, что при пересчете показателей на одно дерево наблюдается практически отсутствие особей с мужским цветением среди гладкокорых деревьев.

Значимость самого комплексного оценочного показателя подтверждена его корреляционной связью со многими показателями. Показано, что при определении перспективности развития насаждения среди кандидатов по развитию самой многочисленной оказалась группа из деревьев с плитчатой корой (60,5 %), а самой малочисленной — группа из деревьев с гладкой корой (6,9 %). К кандидатам по развитию в целом можно отнести 31,6 % от всех наблюдаемых деревьев. Превышения этой группы деревьев над остальными деревьями по следующим показателям составили: диаметру ствола — 34,7 %, диаметру кроны — 20 %, площади проекции кроны — 42,1 %, площади роста — 113,6 % и объему ствола — 62,1 %.

Рекомендуется в перспективе при индивидуальном отборе деревьев применять комплексный оценочный показатель и учитывать при селекционном уходе состояние коры дерева, где из гладкокорой группы деревьев намечаются особи для удаления.

Список литературы

- [1] Бобров Е.Г. Лесообразующие хвойные СССР. Л.: Наука, 1978. 190 с.
- [2] Крылов Г.В., Таланцев Н.К., Казакова Н.Ф. Кедр. М.: Лесная пром-сть, 1983. 216 с.
- [3] Непомилуева Н.И. Кедр сибирский на северо-востоке европейской части СССР. Л.: Наука, 1974. 184 с.
- [4] Смолоногов Е.П. Географическая дифференциация урало-западно-сибирских кедровников // Проблемы кедр. Томск: Изд-во Томского научного центра СО АН СССР, 1990. Вып. 3. С. 28–35.
- [5] Григорьев А.И. Некоторые итоги интродукции кедров сибирского в южной лесостепи Омской области // Воспроизводство кедровых лесов на Урале и в Западной Сибири. Свердловск: Изд-во УНЦ АН СССР, 1981. 126 с.
- [6] Зайков Г.И. Опыт создания культур кедров в сибирской лесостепи // Воспроизводство кедровых лесов на Урале и в Западной Сибири. Свердловск: Изд-во УНЦ АН СССР, 1981. 126 с.
- [7] Калущий К.К., Болотов Н.А. Биологические особенности лесной интродукции // Лесная интродукция. Воронеж: Изд-во Центрального научно-исследовательского института лесной генетики и селекции, 1983. С. 4–14.
- [8] Шайхразиев Ш.Ш., Мухаметшина А.Р., Глушко С.Г. К проблеме устойчивости лиственных лесов, произрастающих в условиях республики Татарстан // Вестник Казанского государственного аграрного университета, 2018. Т. 13. № 3 (50). С. 60–64.
- [9] Левин С.В. Адаптационные особенности сосны кедровой сибирской в условиях Воронежской области // Эколого-биологическое благополучие растительного и животного мира: тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф., Благовещенск, 23 сентября 2020 г. Благовещенск: Изд-во ДальГАУ, 2020. С. 23–25.
- [10] Левин С.В. Экологические особенности кедров сибирского в условиях интродукции на территории Воронежской области // Леса России: политика, промышленность, наука, образование. Материалы VI Всерос. науч.-техн. конф., Санкт-Петербург, 24–26 мая 2023 г. СПб.: Изд-во СПбГЛТУ, 2021. Т. 1. С. 253–256.
- [11] Титов Е.В. Платационное лесовыращивание кедровых сосен. Воронеж: Изд-во ВГЛТА, 2004. 165 с.
- [12] Правдин Л.Ф. Селекция и семеноводство кедров сибирского // Плодоношение кедров сибирского в Восточной Сибири: сб. тр. Ин-та леса и древесины, 1963. С. 5–21.
- [13] Луганский Н.А., Абрамова Л.П., Залесов С.В., Павлов А.Н. Рубки ухода в кедровых лесах с применением селекционного метода // ИзВУЗ Лесной журнал, 2008. № 4. С. 7–12.
- [14] Мамаев С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений (на примере семейства Pinaceae на Урале). М.: Наука, 1973. 284 с.
- [15] Семечкин И.В., Поликарпов Н.П., Ирошников А.И. Кедровые леса Сибири. Новосибирск: Наука, 1985. 257 с.
- [16] Думанский А.В., Ишлинский А.Ю. О закономерностях растрескивания коры деревьев // Докл. АН СССР, 1952. Т. 84. № 1. С. 25–33.
- [17] Ирошников А.И. Изменчивость некоторых морфологических признаков и эколого-физиологических свойств кедров сибирского // Селекция древесных пород в Восточной Сибири. М.: Акад. науч.-издательский центр РАН, Наука, 1964. С. 44–57.
- [18] Луганский Н.А. Внутривидовая изменчивость кедров сибирского: дис. ... канд. с.-х. наук: Свердловск, 1961. 282 с.
- [19] Ильичев Ю.Н. Селекция кедров сибирского на смолопродуктивность. Новосибирск: Наука, 1999. 144 с.
- [20] Ирошников А.И., Твеленев М.В. Изучение генофонда, интродукции и селекции кедровых сосен // Лесоведение, 2001. № 4. С. 62–68.

- [21] Дроздов И.И., Янгутлов А.И. Методические рекомендации по изучению лесных культур интродуцированных лесных пород. М.: ВАСХНИЛ, 1984. 41 с.
- [22] Ушаков М.И., Капралов А.В., Денек В.Н., Григорьева А.В., Фомин В.В., Попов А.С. Лесосеменное дело. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2018. Ч. II. 28 с.
- [23] Нагимов З.Я. Оценка методов определения площадей роста деревьев // Леса Урала и хозяйство в них, 1999. Вып. 19. С. 82–98.
- [24] Высоцкий К.К. Закономерности строения смешанных древостоев. М.: Гослесбумиздат, 1962. 177 с.
- [25] Данчева А.В., Залесов С.В. Использование комплексного оценочного показателя при оценке состояния сосняков государственного лесного природного резервата «Семей Орманы» // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2016. Вып. 215. С. 41–54.
DOI: 10.21266/2079-4304. 2016. 215.41-54
- [26] Шевелев С.Л., Шолохова М.Ю., Михайлов П.В., Красиков И.И., Чумаков Р.А. Особенности использования комплексного оценочного показателя при характеристике формирования древостоев лиственницы сибирской // Хвойные бореальной зоны, 2019. Т. XXXVII. № 1. С. 61–67.
- [27] Мамаев С.А. Внутривидовая изменчивость и проблема интродукции древесных растений // Успехи интродукции растений: Сб. науч. тр., посвященный 75-летию со дня рождения академика Н.В. Цицина. М.: Наука, 1973. С. 128–140.
- [28] Некрасов В.И. Принципы создания семенных плантаций интродуцированных древесных пород // Лесное хозяйство, 1978. № 2. С. 64–66.
- [29] Некрасов В.И. Актуальные вопросы развития теории акклиматизации растений. М.: Наука, 1980. 102 с.
- [30] Ирошников А.И. Проблемы изучения и охраны генофонда кедровых сосен и их селекции // Кедрово-широколиственные леса Дальнего Востока. Материалы Международной конференции. США, Портленд, 2000. С. 92–113.
- [31] Дроздов И.И. Культуры хвойных интродуцентов. М.: МЛТИ, 1987. 91 с.
- [32] Лоскутов Р.И. Искусственное восстановление кедра сибирского. М.: Лесная пром-сть, 1971. 105 с.
- [33] Бех И.А., Таран И.В. Сибирское чудо-дерево. Новосибирск: Наука, 1979. 126 с.
- [34] Анучин Н.П. Лесная таксация. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1952. 532 с.
- [35] Федорук А.Т. Краткий курс лекций по экологии. Экология. Минск: Вышэйша школа, 2010. 462 с.

Сведения об авторе

Левин Сергей Валерьевич — канд. с.-х. наук, науч. сотр. отдела опытных испытаний, ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии» (ВНИИЛГИСбиотех), leslesovik63@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.09.2024.

Одобрено после рецензирования 27.01.2025.

Принята к публикации 07.04.2025.

MORPHOLOGICAL CHARACTER VARIABILITY OF SIBERIAN STONE PINE (*PINUS SIBIRICA* DU TOUR.) BARK CONDITION DURING ITS INTRODUCTION IN FOREST-STEPPE CONDITIONS WITHIN VORONEZH REGION

S.V. Levin

All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology, 105, Lomonosov st., 394087, Voronezh, Russia

leslesovik63@yandex.ru

The research data on the introduction of Siberian cedar in the conditions in the Voronezh forest-steppe region are presented. The complete correspondence of the life processes to the conditions of introduction has been determined, namely forest plantation density, orientation to the cardinal directions and soil fertility. It has been established that among individual trees of the same age state in cultures, the age state reveals their biological role but not the absolute age, which reflects the phenomenon of the bark state. According to the values of the complex evaluation index (CPC), among the groups of the phenomenon in the bark, the highest was found in smooth-barked trees (9,37 cm/cm²), which is due to their lag in development over time and is confirmed by underestimated indicators of all taxation indicators values. It was found that when determining the prospects for the development of a plantation, among the candidates for development, the most numerous was a group of trees with a platy bark (60,5 %), and the smallest was a group of trees with smooth bark (6,9 %). In general, 31,6 % of all observed trees can be attributed to candidates for development. According to the indicators that distinguish the group of candidate trees for development: trunk diameter ($D_{1,3}$), crown diameter (D_{cr}) with the corresponding crown projection area (S_k), growth (S_p) and trunk volume (V), the excess over the rest of the trees was: 34,7; 20; 42,1; 113,6 and 62,1 %, respectively. Attention is drawn to the fact that when recalculating the indicators for one tree, there is practically no individuals with male flowering among smooth-barked trees. It is recommended that in the future, when selecting trees individually, a complex evaluation index should be applied and the bark condition of the tree should be considered during selection care, where individuals for removal are selected from the smooth-barked group of trees.

Keywords: Siberian cedar, introduction, crops, taxation indicators, variability, complex assessment indicator, phenomenon of bark condition

Suggested citation: Levin S.V. *O proyavlenii izmenchivosti morfologicheskogo priznaka sostoyaniya kory kedra sibirskogo (Pinus sibirica du Tour.) pri ego introduktsii v usloviyakh lesostepi v predelakh Voronezhskoy oblasti* [Morphological character variability of Siberian stone pine (*Pinus sibirica* Du Tour.) bark condition during its introduction in forest-steppe conditions within Voronezh region]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 4, pp. 64–78. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-64-78

References

- [1] Bobrov Ye.G. *Lesoobrazuyushchiye khvoynnye SSSR* [Forest forming conifers of the USSR]. Leningrad: Nauka, 1978, 190 p.
- [2] Krylov G.V., Talantsev N.K., Kazakova N.F. *Kedr* [Cedar]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest Industry], 1983, 216 p.
- [3] Nepomiluyeva N.I. *Kedr sibirskiy na severo-vostoke yevropeyskoy chasti SSSR* [Siberian cedar in the north-east of the European part of the USSR]. Leningrad: Nauka, 1974, 184 p.
- [4] Smolonogov Ye.P. *Geograficheskaya differentsiatsiya uralo-zapadno-sibirskikh kedrovnikov* [Geographical differentiation of Ural-West Siberian cedar forests]. Problemy kedra: sb. nauch. tr. [Problems of Cedar: Collection of scientific works]. Tomsk: Tomsk Scientific Centre, Siberian Branch of the Academy of Sciences of the USSR, 1990, no. 3, pp. 28–35
- [5] Grigor'yev A.I. *Nekotoryye itogi introduktsii kedra sibirskogo v yuzhnoy lesostepi Omskoy oblasti* [Some results of introduction of Siberian cedar in the southern forest-steppe of Omsk region]. *Vosproizvodstvo kedrovnykh lesov na Urale i v Zapadnoy Sibiri* [Reproduction of cedar forests in the Urals and Western Siberia: collection of scientific papers]. Sverdlovsk: UNC AS USSR, 1981, 126 p.
- [6] Zaykov G.I. *Opyt sozdaniya kul'tur kedra v sibirskoy lesostepi* [Experience of creation of cedar cultures in Siberian forest-steppe] *Vosproizvodstvo kedrovnykh lesov na Urale i v Zapadnoy Sibiri*. Sverdlovsk: UNTS AN SSSR [Reproduction of cedar forests in the Urals and Western Siberia. Collection of articles]. Sverdlovsk: UNC AS USSR, 1981, 126 p.
- [7] Kalutskiy K.K., Bolotov N.A. *Biologicheskiye osobennosti lesnoy introduktsii* [Biological features of forest introduction]. *Lesnaya introduktsiya* [Forest introduction]. Voronezh, 1983, pp. 4–14.
- [8] Shaykhraziyev SH.SH., Mukhametshina A.R., Glushko S.G. *K probleme ustoychivosti listvennichnykh lesov, proizrastayushchikh v usloviyakh respublik tatarstan* [On the problem of sustainability of larch forests growing in the conditions of the Republic of Tatarstan]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Kazan State Agrarian University], 2018, v. 13, no. 3 (50), pp. 60–64.

- [9] Levin S.V. *Adaptatsionnyye osobennosti sosny kedrovoy sibirskoy v usloviyakh Voronezhskoy oblasti* [Adaptation features of Siberian pine in conditions of Voronezh region]. *Ekologo-biologicheskoye blagopoluchiye rastitel'nogo i zhivotnogo mira: tez. dokl. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Ecological and biological well-being of flora and fauna. Matls of Intern. scientific practical conf.]. Blagoveshchensk: DalGAU, 2020, pp. 23–25.
- [10] Levin S.V. *Ekologicheskiye osobennosti kedra sibirskogo v usloviyakh introduksii na territorii Voronezhskoy oblasti* [Ecological features of Siberian cedar in conditions of introduction on the territory of Voronezh region]. *Lesa Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovaniye. Mat-ly VI Vserossiyskoy nauchno-tekhn. konf., [Forests of Russia: politics, industry, science, education. Proceedings of the VI All-Russian scientific and technical conf.].* St. Petersburg, May 24–26, 2023 St. Petersburg: SPbGLTU, 2021, v. 1, pp. 253–256.
- [11] Titov Ye.V. *Plantatsionnoye lesovyrashchivaniye kedrovyykh sosen* [Plantation silviculture of cedar pines]. Voronezh: Voronezh State Forestry Academy, 2004, 165 p.
- [12] Pravdin L.F. *Selektsiya i semenovodstvo kedra sibirskogo* [Selection and seed production of Siberian cedar]. *Plodonosheniye kedra sibirskogo v Vostochnoy Sibiri: sb. tr. In-ta lesa i drevesiny* [Fruit bearing of Siberian cedar in Eastern Siberia: collection of works of the Institute of Forest and Wood], 1963, pp. 5–21.
- [13] Luganskiy N.A., Abramova L.P., Zalesov S.V., Pavlov A.N. *Rubki ukhoda v kedrovyykh lesakh s primeneniye selektsionnogo metoda* [Thinning in cedar forests with the use of selection method]. *Russian Forest Journal*, 2008, no. 4, pp. 7–12.
- [14] Mamayev S.A. *Formy vnutrividovoy izmenchivosti drevesnykh rasteniy (na primere semeystva Pinaceae na Urale)* [Forms of intraspecific variability of woody plants (on the example of the Pinaceae family in the Urals)]. Moscow: Nauka, 1973, 284 p.
- [15] Semechkin I.V., Polikarpov N.P., Iroshnikov A.I. *Kedrovyye lesa Sibiri* [Cedar forests of Siberia]. Novosibirsk, Nauka, 1985, 257 p.
- [16] Dumanskiy A.V., Ishlinskiy A.YU. *O zakonornostyakh rastreskivaniya kory derev'ye* [On regularities of cracking of tree bark]. *Doklady AN SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], Moscow, 1952, v. 84, no. 1, pp. 25–33.
- [17] Iroshnikov A.I. *Izmenchivost' nekotorykh morfologicheskikh priznakov i ekologo-fiziologicheskikh svoystv kedra sibirskogo* [Variability of some morphological traits and ecological-physiological properties of Siberian cedar]. *Selektsiya drevesnykh porod v Vostochnoy Sibiri* [Selection of tree species in Eastern Siberia. Collection of articles]. Moscow: Acad. scientific publishing centre of the Russian Academy of Sciences, Nauka, 1964, pp. 44–57.
- [18] Luganskiy N.A. *Vnutrividovaya izmenchivost' kedra sibirskogo* [Intraspecific variability of Siberian cedar]. Diss Cand. Sci. (Agric.). Sverdlovsk, 1961, 282 p.
- [19] Il'ichev YU.N. *Selektsiya kedra sibirskogo na smoloproduktivnost'* [Selection of Siberian cedar on resin productivity]. Novosibirsk: Nauka. Sib. enterprise RAS, 1999, 144 p.
- [20] Iroshnikov A.I., Tvelenev M.V. *Izucheniye genofonda, introduksii i seleksii kedrovyykh sosen* [Study of gene pool, introduction and selection of cedar pines]. *Lesovedeniye* [Forest Science], 2001, no. 4, pp. 62–68.
- [21] Drozdov I.I., Yangurov A.I. *Metodicheskie rekomendatsii po izucheniyu lesnykh kul'tur introducirovannykh lesnykh porod.* [Methodical recommendations for the study of forest cultures of introduced forest species]. Moscow: VASKHNIL, 1984, 41 p.
- [22] Ushakov M.I., Kapralov A.V., Deneko V.N., Grigorieva A.V., Fomin V.V., Popov A.S. *Lesosemennoe delo* [Forest seed business]. Yekaterinburg: UGLTU, 2018, Part II, 28 p.
- [23] Nagimov Z.YA. *Otsenka metodov opredeleniya ploshchadey rosta derev'ye* [Evaluation of methods for determining the areas of tree growth]. *Lesa Urala i khozyaystvo v nikh* [Ural forests and management in them], 1999, v. 19, pp. 82–98.
- [24] Vysotskiy K.K. *Zakonornosti stroyeniya smeshannykh drevostoyev* [Laws of the structure of mixed stands]. Moscow: Goslesbumizdat, 1962, 177 p.
- [25] Dancheva A.V., Zalesov S.V. *Ispol'zovaniye kompleksnogo otsenoch'nogo pokazatelya pri otsenke sostoyaniya sosnyakov gosudarstvennogo lesnogo prirodnogo rezervata «Semei Ormany»* [Use of complex evaluation indicator in assessing the state of pine forests of the state forest nature reserve «Semei Ormani»]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Proceedings of the St. Petersburg Forestry], 2016, no. 215, pp. 41–54. DOI: 10.21266/2079-4304.2016.215.41-54
- [26] Shevelev S.L., Sholokhova M.YU., Mikhaylov P.V., Krasikov I.I., Chumakov R.A. *Osobennosti ispol'zovaniya kompleksnogo otsenoch'nogo pokazatelya pri kharakteristike formirovaniya drevostoyev listvennitsy sibirskoy* [Peculiarities of the use of complex evaluation index in characterising the formation of stands of Siberian larch]. *Khvoynyye boreal'noy zony* [Conifers of the boreal zone], 2019, v. XXXVII, no. 1, pp. 61–67.
- [27] Mamayev S.A. *Vnutrividovaya izmenchivost' i problema introduksii drevesnykh rasteniy* [Intraspecific variability and the problem of introduction of woody plants]. *Uspekhi introduksii rasteniy: Sb. nauch. tr., posvyashchennyy 75-letiyu so dnya rozhdeniya akademika N.V. Tsitsina* [Successes of plant introduction: Collection of scientific works devoted to the 75th anniversary of the birth of Academician N.V. Tsitsin]. Moscow: Nauka, 1973, pp. 128–140.
- [28] Nekrasov V.I. *Printsipy sozdaniya semennykh plantatsiy introdutsirovannykh drevesnykh porod* [Principles of creation of seed plantations of introduced tree species]. *Lesnoye khozyaystvo* [Forestry], 1978, no. 2, pp. 64–66.
- [29] Nekrasov V.I. *Aktual'nyye voprosy razvitiya teorii akklimatizatsii rasteniy* [Actual questions of development of the theory of acclimatisation of plants]. Moscow: Nauka, 1980, 102p.
- [30] Iroshnikov A.I. *Problemy izucheniya i okhrany genofonda kedrovyykh sosen i ikh seleksii* [Problems of studying and protecting the gene pool of cedar pines and their selection]. *Kedrovo-shirokolistvennyye lesa Dal'nego Vostoka. Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii* [Cedar–broadleaf forests of the Far East. Materials of the International Conference]. USA, Portland, 2000, pp. 2–113.

- [31] Drozdov I.I. *Kul'tury khvoynykh introdutsentov* [Cultures of coniferous introduced species]. Moscow: MLTI, 1987, 91 p.
- [32] Loskutov R.I. *Iskusstvennoye vosstanovleniye kedra sibirskogo* [Artificial restoration of Siberian cedar]. Moscow: Forestry industry, 1971, 105 p.
- [33] Bekh I.A., Taran I.V. *Sibirskoye chudo – derevo* [Siberian miracle – tree]. Novosibirsk: Nauka, 1979, 126 p.
- [34] Anuchin N.P. *Lesnaya taksaciya* [Forest taxation]. Moscow-Leningrad: Goslesbumizdat, 1952, 532 p.
- [35] Fedoruk A.T. *Kratkiy kurs lektsiy po ekologii. Ekologiya* [Short course of lectures on ecology. Ecology]. Minsk: Vysheyschaya shkola, 2010, 462 p.

Author's information

Levin Sergey Valer'evich — Cand. Sci. (Agriculture), Researcher of the Experimental Testing Department of the All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology, leslesovik63@yandex.ru

Received 20.09.2024.

Approved after review 27.01.2025.

Accepted for publication 07.04.2025.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ЯЙЦЕЕДОВ РОДА *TRICHOGRAMMA* ПРОТИВ ЗВЕЗДЧАТОГО ПИЛИЛЬЩИКА-ТКАЧА *ACANTHOLYDA POSTICALIS*

Ю.А. Сергеева✉, С.О. Долмонева, С.А. Родин, А.А. Загоринский

ФБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства»
(ФБУ ВНИИЛМ), Россия, 141202, Московская обл., г. Пушкино, ул. Институтская, д. 15

sergeeva@vniilm.ru

Приведены экспериментальные результаты применения неспециализированной заводской трихограммы против звездчатого пилильщика-ткача в Ростовской и Волгоградской областях. Опробованы разные нормы расхода, способы внесения биоматериала и ранний срок расселения трихограммы. Определено, что возобновления нового поколения заводской трихограммы в опытных участках не произошло, это подтверждено и в лабораторном опыте. Проанализирована эффективность внесения трихограммы при разных уровнях численности звездчатого пилильщика-ткача в сравнении с природным уровнем паразитизма на контрольных участках. Установлен период действия паразитоида на популяцию фитофага, выявлена высокая эффективность применения заводской трихограммы против звездчатого пилильщика-ткача. Целесообразно проведение исследований по подбору эффективных норм расхода и сроков внесения трихограммы в очаги фитофага.

Ключевые слова: защита леса, звездчатый пилильщик-ткач, трихограмма, эффективность

Ссылка для цитирования: Сергеева Ю.А., Долмонева С.О., Родин С.А., Загоринский А.А. Экспериментальное применение яйцеедов рода *Trichogramma* против звездчатого пилильщика-ткача *Acantholyda posticalis* // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 4. С. 79–93.
DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-79-93

Звездчатый пилильщик-ткач *Acantholyda posticalis* (Matsumura 1912) (*Hymenoptera*: *Pamphiliidae*) — широко распространенный вредитель сосны, одной из основных лесобразующих пород в России. Повреждение сосняков звездчатым пилильщиком-ткачом вызывает их ослабление и усыхание. Вспышки массового размножения звездчатого пилильщика-ткача в России периодически возникают на юго-востоке европейской части, в Южном Зауралье, Западной Сибири, Забайкалье. Средняя площадь очагов размножения звездчатого пилильщика-ткача в лесах страны составляет 18,7 тыс. га (минимальная — 4,0 тыс. га в 1989 г., максимальная — 46,2 тыс. га в 2003 г.) [1]. Начиная с 1990 г. очаги массового размножения этого фитофага были впервые зафиксированы на севере Тверской области, во Владимирской области и Республике Марий-Эл [2, 3], а также в Эстонии и Финляндии [4, 5]. В связи с этим вероятно обнаружение очагов пилильщика-ткача в Ленинградской, Новгородской, Псковской областях и в Карелии [4].

Для защиты леса от звездчатого пилильщика-ткача используют химические пестициды [6, 7], однако их применение не всегда допустимо. Например, под запрет попадают водоохранные зоны, другие категории защитных лесов, территории вблизи населенных пунктов и на особо охраняемых природных территориях (ООПТ). Вследствие растянутого лёта имаго звездчатого пилильщика-ткача и откладывания самками яиц в течение месяца, в древостое находятся одновременно и взрослые особи, и яйца, и личинки разных возрастов, поэтому при химической обработке часть популяции всегда выживает. Кроме того, личинка звездчатого пилильщика-ткача обитает в паутином гнезде, которое защищает ее от прямого контакта с инсектицидом. Все это ограничивает эффективность химических обработок, а биологических препаратов для защиты от личинок пилильщиц-ткачей в настоящее время не существует [4].

В условиях интенсивного воздействия человека на окружающую природную среду повышаются требования к качеству мероприятий по сохранению лесов, их биологического разнообразия и повышению устойчивости [8]. Целям защиты леса от вредных насекомых соответствуют биологические методы, позволяющие

минимизировать ущерб для лесных экосистем и их компонентов, наносимый в случае применения других методов. Опыт защиты растений доказал целесообразность и эффективность именно методов биологического контроля [9]. Так, действенным методом защиты леса от вредителей является использование паразитических насекомых для сдерживания роста их численности [10, 11]. Паразитические яйцееды рода *Trichogramma* (трихограмма) широко используются в практике защиты сельскохозяйственных культур на площади более 30 млн га сельскохозяйственных угодий в 30 странах [12]. Существует множество примеров защиты угодий с помощью трихограмм, в частности виноградников, полей помидоров, кукурузы, сахарного тростника, сои, хлопка в Китае, Бразилии, Индии, Африканских странах, клюквы — в США. Трихограмма представляет собой эффективное средство биологической борьбы против европейского кукурузного стеблевого мотылька (кукурузной огневки) по всей Европе и в Северной Америке [13–16]. Против вредителей лесов в некоторых странах применение яйцеедов рода *Trichogramma* носит пока лишь исследовательский характер, хотя в большинстве случаев результаты работ демонстрируют их успешность и перспективность [17–25].

Известно, что в популяциях звездчатого пилильщика-ткача яйцееды рода трихограмма считаются одним из действенных факторов смертности вредителя — отмечалась зараженность яиц этим энтомофагом до 90 % [26]. Есть положительные результаты единично проведенного опыта по переносу зараженных трихограммой яиц из действующего очага в нарастающий [27]. В 2020 г. специалистами ФБУ ВНИИЛМ впервые было выполнено производственное применение неспециализированной заводской трихограммы против звездчатого пилильщика-ткача в Самарской области. Зараженность яиц звездчатым пилильщиком-ткачом в местах выпуска яйцееда составила 0...52,2 % на разных участках (в среднем 46,7 %), однако работы были проведены без выделения контрольного участка, т. е. уровень природного паразитизма не был учтен. Выпуск был выполнен в конце срока лёта имаго фитофага, поэтому в полном объеме оценить эффективность трихограммы на популяцию ткача не удалось. Тем не менее была показана принципиальная возможность применения заводской трихограммы против звездчатого пилильщика-ткача [28, 29].

В настоящее время в России производством энтомофагов, главным образом трихограммы, занимаются около 20 биофабрик: филиалы ФГБУ «Россельхозцентр» по Белгородской

области, Ставропольскому краю, республикам Татарстан и Кабардино-Балкария [30], а также частные производства [31].

Для развития экологически безопасного способа защиты лесных насаждений, расширения арсенала биологических средств по профилактике возникновения и ликвидации очагов звездчатого пилильщика-ткача выполнено экспериментальное применение неспециализированной заводской трихограммы, нарабатываемой в условиях биофабрики (далее — заводской трихограммы) против вредителей сельскохозяйственных культур.

Цель работы

Цель работы — оценка эффективности использования неспециализированной заводской трихограммы против звездчатого пилильщика-ткача для защиты леса.

Материалы и методы

Работа выполнена на основе биоматериала (1 кг яиц зерновой моли *Sitotroga cerealella* (Olivier, 1789) (*Lepidoptera* : *Gelechiidae*) (ситотроги), зараженных тремя видами трихограмм: *T. euproctidis*, *T. evanescens*, *T. cacoecia*), предоставленного ООО «Ситотрога». В 1 г зараженных яиц ситотроги содержится 65...70 тыс. особей трихограммы обоих полов при соотношении 1♀ : 1♂. Доставку биоматериала к местам выпуска осуществляли в автомобильном холодильнике и термоконтейнере с поддержанием температуры +7...9°C.

На участках расселения трихограммы наблюдался массовый лет имаго не только звездчатого, но и красноголового пилильщика-ткача *Acantholyda erythrocephala* (Linnaeus, 1758) (*Hymenoptera* : *Pamphiliidae*). Звездчатый и красноголовый пилильщики-ткачи имеют сходную биологию и общих энтомофагов [4], поэтому при проведении полевых работ яйца красноголового пилильщика-ткача также подлежали сбору и анализу, поскольку после выпуска трихограмма начнет заражать и их.

До начала выпуска трихограммы на опытных участках были собраны ветви с яйцами пилильщиков-ткачей, в лабораторных условиях проведено их заражение заводской трихограммой. Для этого были взяты две навески по 0,3 г зараженных яиц ситотроги — из партии, выпущенной в природу. К находящимся в стеклянных садках ветвям с яйцами пилильщиков-ткачей обоих видов выпускали имаго трихограммы. Срок развития собранных яиц ткачей после откладки самками составлял 3–4 сут.

Т а б л и ц а 1

Характеристика опытных участков и нормы внесения трихограммы**Characteristics of trial plots and application rates of trichogramma**

Номер опытного участка	Расположение участка	Квартал; выдел	Краткое такса- ционное описа- ние	Пло- щадь, га	Среднее число личинок пилильщика-ткача на 1 м ²		Норма расхода трихограммы	
					звездча- того	красно- голового	всего, г	в сред- нем, г/га
I	Ростовская область Шолоховское лесничество Вешенское участковое лесничество	60; 8	10С, 23, 0,5, III	6,9	4	5	250	36
II		61; 2	10С, 19, 0,5, III	49,0	3	5	250	5
Кон- трольный участок		59; 1	10С, 20, 0,4, IV	15,0	2	4	—	—
III	Волгоградская область Иловлинское лесничество Иловлинское участковое лесничество	84; 20	10С, 40, 1, III	46,0	116	7	500	11
Кон- трольный участок	Не входит в лесной фонд (полезащитная лесополоса)	—	10С, 30, 1, III	6,0	—	—	—	—

Ежедневно энтомофага подкармливали 15%-м раствором меда. После гибели яйцеда яйца ткачей содержали в садках 20 сут. для выведения имаго трихограммы нового поколения.

Расселение трихограммы проведено в 2023 г.: 3 мая в Ростовской области и 4 мая в Волгоградской области — в самом начале периода откладки яиц самками ткачей.

При распределении норм расхода трихограммы на опытных участках мы ознакомились с нормами, рекомендуемыми в сельском хозяйстве (2–5 г/га), при 2–3-х кратных выпусках указанного количества. Однако высота растений и, соответственно, зона поиска для паразитоида в лесу существенно больше. Из литературных источников известно, что ввиду слабой поисковой способности трихограммы требуется внесение большего количества паразитоида при низкой численности вредителя [32, 33]. Так, нормы расхода трихограммы против еловой листовёртки в Канаде составляли от 15 до 350 г/га [18, 19].

Норма расхода трихограммы была дифференцирована по участкам. В Ростовской области при низкой численности организма-мишени (угроза объедания 10...15 %) использовали как завышенную (1,2 млн самок на 1 га), так и заниженную нормы расхода (165 тыс. самок на 1 га) в насаждениях со сходными параметрами и запасу вредителя в них. В Волгоградской области в лесных культурах с полнотой 1 и угрозой объедания личинками звездчатого пилильщика-ткача 100 % хвои, внесли более 380 тыс. самок трихограммы на 1 га. В качестве кон-

троля выбрали участки сосновых древостоев на удалении не менее 500 м от мест выпуска (табл. 1). В таксационном описании указаны: состав, возраст, полнота, бонитет; все участки являются лесными культурами. Приведено число реактивированных личинок по данным филиала ФБУ «Рослесозащита» — «ЦЗЛ Волгоградской области».

Оценка угрозы объедания сосны звездчатым пилильщиком-ткачом проведена на основе среднего числа реактивированных личинок на 1 м² и возраста насаждений по таблице, разработанной В.Е. Федоряком [34].

Расселение трихограммы выполнено в первой половине дня, при ясной сухой погоде, температуре воздуха 22...24 °С и скорости ветра 10...12 м/с с порывами до 20 м/с. Внесение зараженных яиц ситотроги выполняли рассеиванием через каждые 20 м по 1–2 г в каждой точке выпуска. Начало маршрута с подветренной стороны. В Волгоградской области для сохранности биоматериала использовали специальные контейнеры (100 шт.), выполненные из лиственных пород, имеющие отверстия для вылета (рис. 1). В каждый контейнер помещали 1,5 г биоматериала и подвешивали на ветвях (рис. 2), располагали по ходовым линиям с расстоянием 40 м между ними и вывешивали через каждые 20 м по ходовой линии. Развешивание контейнеров проведено на площади 6 га.

Для оценки эффективности применения заводской трихограммы на опытных участках 29



а



б

Рис. 1. Зараженные трихограммой яйца ситотроги в транспортировочной трубе (а) и подготовленные контейнеры (б)

Fig. 1. Trichogramma-infested eggs of *Sitotroga* spp. in transport tube (а) and prepared containers (б)



Рис. 2. Размещение контейнеров с трихограммой в насаждении

Fig. 2. Placement of Trichogramma containers in the plantation

и 30 мая 2023 г. проводился сбор кладок яиц звездчатого и красноголового пилильщикоткачей. Кладки собраны в каждом экспериментальном участке непосредственно в местах внесения зараженных трихограммой яиц ситотроги, а также на расстоянии до 500 м от места внесения.

В эти же сроки выполнен сбор ветвей с яйцами ткачей на контрольных участках — как для получения данных по зараженности популяций вредителей природной трихограммой, так и для выведения имаго.

В Волгоградской области сбор выполняли способом случайной выборки хвои с яйцами

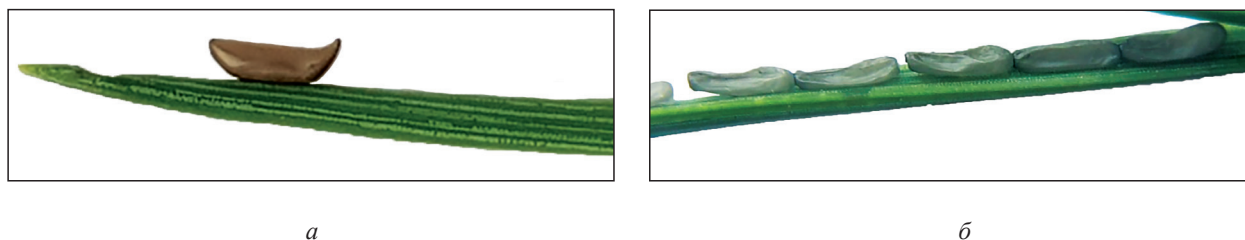


Рис. 3. Вид яиц звездчатого пилильщика-ткача (а) и красноголового пилильщика-ткача (б) после отрождения личинок

Fig. 3. View of eggs of pine web-spinning sawfly (a) and pine falsefly (b) after hatching of larvae



Рис. 4. Вид яиц звездчатого пилильщика-ткача (а) и красноголового пилильщика-ткача (б), зараженных трихограммой

Fig. 4. View of pine web-spinning sawfly's eggs (a) and pine falsefly (b) infested with *Trichogramma* spp

ткача в нижних частях крон, а также срезкой трех ветвей из средней части кроны (на трех модельных деревьях) на участке выпуска и на контрольном. В Ростовской области проводили срезку ветвей из нижней, средней и верхней частей крон — с трех деревьев на каждом участке, где расселяли трихограмму, а также на удалении 100, 200, 300 и 400 м от них.

Все собранные кладки ткачей и ветви были этикетированы, помещены в мешки и контейнеры, доставлены в лабораторию биологических методов защиты леса ФБУ ВНИИЛМ, где была проведена выборка хвои с яйцами ткача и под биноклем определена их зараженность трихограммой (рис. 3, 4). По данным зараженности яиц пилильщико-

ткачей на модельных деревьях опытного и контрольного участков получены средние показатели эффективности выпуска заводской трихограммы.

Эффективность с поправкой на контрольный вариант вычислена по формуле Шнайдера — Орелли [35]

$$C_n = \left(\frac{T - S}{100 - S} \right) 100,$$

где C_n — эффективность (процент гибели вредителя);

T — доля (%) погибших особей вредителя на опытном участке;

S — доля (%) погибших особей вредителя в контрольном варианте.

Достоверность различий доли зараженных трихограммой яиц пилильщико-ткачей на ветвях модельных деревьев в опытных участках и в контрольных вариантах оценивалась по t -критерию Стьюдента [36] при числе степеней свободы 16 ($n + n - 2$).

Результаты и обсуждение

В лабораторном опыте установлено, что за неимением альтернативных хозяев заводская трихограмма заразила яйца ткачей, в результате 100 % яиц звездчатого и 91,7 % красноголового пилильщико-ткачей погибли (табл. 2).

Однако вследствие отсутствия физиологической приспособленности к несвойственным заводской трихограмме видам фитофагов, в яйцах ткачей не произошло развития личинок паразитоида, поскольку не только каждый вид трихограммы, но и ее географическая форма имеет свой круг насекомых-хозяев [33]. Одновременно определили срок отрождения трихограммы из зараженных яиц ситотроги — через 36 ч. Срок жизни трихограммы в лабораторных условиях составил 8...10 сут.

На участках расселения трихограммы в Ростовской области угроза объедания сосны звездчатым пилильщиком-ткачом составляла 10 %, в Волгоградской области — 290 %. Оценочные учеты имаго в кронах показали, что доля красноголового пилильщика-ткача в общем комплексе пилильщико-ткачей не превысила 10 % в Волгоградской области и составила 60 % в Ростовской области.

Гибель яиц звездчатого пилильщика-ткача в местах выпуска заводской трихограммы в Волгоградской области составила: 26,4...54,1 % (в контрольном варианте: 8,5...14,5 %), в Ростовской области: кв. 60 — 8,3...16,7 %, кв. 61 — 0...33,3 % (в контрольном варианте: 4,5...14,3 %) (табл. 3 и 4).

Сравнением вычисленного (фактического) t -критерия Стьюдента с табличным коэффициентом установлена достоверность различий в зараженности трихограммой яиц ткачей на опытных участках и в контрольном варианте при числе степеней свободы 16 ($n + n - 2$) (табл. 5).

Из приведенных в табл. 5 данных следует, что в Ростовской области на участке I при низкой численности звездчатого пилильщика-ткача с угрозой объедания 10 % использование завышенной нормы расхода трихограммы (36 г/га) показало низкую эффективность (3,9 % с поправкой на контрольный вариант). Доля зараженных яиц на участке II (со сходной угрозой объедания) при использовании заниженной (5 г/га) нормы расхода показало эффективность с поправкой на контрольный вариант 28,5 %.

Т а б л и ц а 2

Состояние яиц пилильщико-ткачей после заражения трихограммой в лабораторных условиях

Condition of pine web-spinning sawfly eggs after *Trichogramma* infestation under laboratory conditions

Насекомое-хозяин	Число яиц в опыте, шт.	Состояние яиц, %		
		Здоровые	Погибшие	Отродилась трихограмма
Звездчатый пилильщик-ткач	41	0	100	0
Красноголовый пилильщик-ткач	60	1,7	98,3	0

На основе статистической обработки установлено, что при низкой численности звездчатого пилильщика-ткача в насаждении различия с контрольным вариантом по участкам I и II не достоверны независимо от нормы внесения. В то время как разница с контрольным вариантом по доле зараженных яиц красноголового пилильщика-ткача на этих участках является существенной, с уровнем вероятности 95 %. Очевидно, на эффективность трихограммы влияет также способ откладки яиц пилильщиками-ткачами: у звездчатого — одиночно, у красноголового — группами. Известно, что у трихограммы, являющейся полифагом, поисковая способность невысока. Лишь после встречи с первыми яйцами хозяина активность паразитического яйцеда усиливается и увеличивается тщательность поиска, т. е. при групповой откладке яиц обнаружение хозяина облегчается [33].

Из литературных данных известно, что увеличение активности трихограммы происходит при повышении концентрации яиц вредителя, повышение или понижение нормы выпусков не дает должного эффекта [33]. Трихограмма может показать высокую эффективность лишь при значительной плотности хозяина [32].

В Волгоградской области на участке III результаты зараженности звездчатого пилильщика-ткача показали, что при угрозе объедания около 300 %, достоверность различий в обработанном трихограммой и контрольном участке существенна, при вероятности 80 %. Средняя доля зараженных яиц относительно общего их запаса за период лёта ткачей, составляет по звездчатому 35 % в местах выпуска и 12 % в контрольном варианте; по красноголовому — 26 % и 11 % соответственно. При этом различия в зараженности красноголового пилильщика-ткача на этом участке с контролем не достоверны.

Т а б л и ц а 3

**Зараженность трихограммой яиц пилильщиков-ткачей по учетам
на модельных деревьях в Ростовской области**

**Trichogramma infestation of pine web-spinning sawfly's eggs according to counts
on model trees in Rostov region**

Номер опытного участка	Номер дерева	Ярус кроны	Состояние яиц по видам пилильщиков-ткачей							
			Звездчатый пилильщик-ткач				Красноголовый пилильщик-ткач			
			здоровые		зараженные		здоровые		зараженные	
			шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%
I	1	Верхний	2	66,7	1	33,3	4	80,0	1	20,0
		Средний	2	100	0	0	5	71,4	2	28,6
		Нижний	1	100	0	0	7	70,0	3	30,0
		Итого:	5	83,3	1	16,7	16	72,7	6	27,3
	2	Верхний	6	100	0	0	8	100	0	0
		Средний	1	100	0	0	7	70,0	3	30,0
		Нижний	4	80,0	1	20,0	7	70,0	3	30,0
		Итого:	11	91,7	1	8,3	22	78,6	6	21,4
	3	Верхний	2	86,7	1	33,3	4	80,0	1	20,0
		Средний	5	100	0	0	5	83,3	1	16,7
		Нижний	3	100	0	0	9	81,2	2	18,2
		Итого:	10	90,9	1	9,1	18	81,8	4	18,2
II	1	Верхний	0	0	0	0	1	25,0	3	75,0
		Средний	0	0	0	0	5	100	0	0
		Нижний	2	66,7	1	33,3	4	57,1	3	42,9
		Итого:	2	66,7	1	33,3	10	62,5	6	37,5
	2	Верхний	0	0	0	0	6	66,7	3	33,3
		Средний	0	0	0	0	5	71,4	2	28,6
		Нижний	2	66,7	1	33,3	2	66,7	1	33,3
		Итого:	2	66,7	1	33,3	13	68,4	6	31,6
	3	Верхний	0	0	0	0	7	70,0	3	30,0
		Средний	0	0	0	0	7	77,8	2	22,2
		Нижний	0	0	0	0	6	85,7	1	14,3
		Итого:	0	0	0	0	20	76,9	6	23,1
Контрольный вариант	1	Верхний	9	100	0	0	3	76,5	1	23,5
		Средний	7	87,5	1	12,5	5	83,3	1	16,6
		Нижний	6	100	0	0	4	100	0	0
		Итого:	22	95,5	1	4,5	12	85,7	2	14,3
	2	Верхний	0	0	0	0	6	85,7	1	14,3
		Средний	0	0	0	0	6	100	0	0
		Нижний	0	0	0	0	5	83,3	1	16,7
		Итого:	0	0	0	0	17	63,2	2	11,8
	3	Верхний	2	66,7	1	33,3	0	0	0	0
		Средний	2	100	0	0	4	100	0	0
		Нижний	2	100	0	0	3	75,0	1	25,0
		Итого:	6	85,7	1	14,3	7	87,5	1	12,5

Т а б л и ц а 4

**Зараженность трихограммой яиц пилильщиков-ткачей по учетам
на модельных деревьях в Волгоградской области**

**Trichogramma infestation of pine web-spinning sawfly's eggs based
on counts on model trees in Volgograd Oblast**

Номер дерева	Номер ветви	Состояние яиц по видам пилильщиков-ткачей							
		Звездчатый пилильщик-ткач				Красноголовый пилильщик-ткач			
		здоровые		зараженные		здоровые		зараженные	
		шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%
Участок внесения трихограммы в контейнерах									
1	1	37	82,2	8	17,8	4	100	0	0
	2	59	69,4	26	30,6	2	50,0	2	50,0
	3	64	63,4	37	36,6	0	0	0	0
Итого:		160	69,3	71	30,7	6	75,0	2	25,0
Участок внесения трихограммы распылением									
2	1	26	70,3	11	29,7	3	100	0	0
	2	24	77,4	7	22,6	3	75,0	1	25,0
	3	28	73,7	10	26,3	0	0	0	0
Итого:		78	73,6	28	26,4	6	85,7	1	14,3
3	1	14	40,0	21	60,0	1	20,0	4	80,0
	2	28	49,1	29	50,9	6	60,0	4	40,0
	3	3	50,0	3	50,0	17	89,5	2	10,5
Итого:		45	45,9	53	54,1	24	70,6	10	29,4
Контрольный вариант									
1	1	42	84,0	12	16,0	25	82,8	3	17,2
	2	99	86,1	5	13,9	2	100	0	0
	3	66	85,7	8	14,3	2	100	0	0
Итого:		207	85,5	35	14,5	29	90,6	3	9,4
2	1	14	87,5	2	12,5	0	0	0	0
	2	32	94,1	2	5,9	0	0	0	0
	3	51	91,1	5	8,9	0	0	0	0
Итого:		97	91,5	9	8,5	0	0	0	0
3	1	113	91,9	10	8,1	19	66,7	2	33,3
	2	0	0	3	100	24	92,3	2	7,7
	3	13	92,9	1	7,1	0	0	2	100
Итого:		126	90,0	14	10,0	43	87,8	6	12,2

Эффективность трихограммы при способе выпуска в контейнерах была на 3–4 % ниже, чем при рассеивании — по обоим видам ткачей (табл. 6).

Анализ биоматериала в контейнерах, собранных в даты учетов эффективности трихограммы, показал, что лишь 50 % имаго яйцеедов отродилось из зараженных яиц ситотроги в результате слеживания и слипания. Однако доли зараженных яиц практически равны на участках с разными способами внесения.

Следовательно, нормы расхода трихограммы могут быть скорректированы к уменьшению.

Проведены учеты по оценке расселения трихограммы от мест выпуска на трех ветвях в верхнем, среднем и нижнем ярусах кроны (табл. 7).

Полученные данные показали, что расселения трихограммы из мест выпуска не произошло. Из собранных яиц ткачей на участках внесения заводской трихограммы не отмечено отрождения имаго этого энтомофага, следовательно, заражение яиц ткачей происходило только в период присутствия яйцееда в древостое, энтомофаг действует как «живой инсектицид» и расчет на дальнейшее развитие и распространение трихограммы в опытных участках не оправдался. В связи с этим доля паразитизма на опытных участках, рассчитанная относительно общего запаса яиц в древостое, не отвечает на вопрос об эффективности действия заводской трихограммы.

Т а б л и ц а 5

Средняя эффективность трихограммы и достоверность различий зараженности на опытных участках и в контроле

Trichogramma efficacy and reliability of differences in infestation in experimental plots and in the control

Опытный участок	Всего яиц, шт.		Средняя доля паразитированных яиц, %		Достоверность различий ($t_{\text{факт}} > t_{\text{табл}}$ при уровне вероятности P)	
	Звездчатый пилильщик- ткач	Красноголовый пилильщик- ткач	Звездчатый пилильщик- ткач	Красноголовый пилильщик- ткач	Звездчатый пилильщик- ткач	Красноголовый пилильщик- ткач
Ростовская область						
Контрольный вариант	30	41	6,7	12,2	—	
I	29	72	10,3	22,2	0,71 > 0,69 $P_{0,5}$	2,2 > 2,1 $P_{0,05}$
С поправкой на контрольный вариант			3,9	11,4		
II	3	61	33,3	29,5	0,36 > 0,26 $P_{0,8}$	2,5 > 2,1 $P_{0,05}$
С поправкой на контрольный вариант			28,5	19,7		
Волгоградская область						
Контрольный вариант	488	81	11,9	11,1	—	
III	435	49	34,9	26,5	1,39 > 1,34 $P_{0,2}$	0,63 > 0,5 $P_{0,6}$
С поправкой на контрольный вариант			26,1	17,3		

Т а б л и ц а 6

Зараженность трихограммой яиц пилильщиков-ткачей по учетам в нижней части кроны в зависимости от способа внесения

Trichogramma infestation of pine web-spinning sawfly's eggs as measured in the lower part of the crown, depending on the method of application

Номер по порядку	Способ внесения трихограммы	Состояние яиц по видам пилильщиков-ткачей							
		Звездчатый пилильщик-ткач				Красноголовый пилильщик-ткач			
		здоровые		зараженные		здоровые		зараженные	
		шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%
1	Рассеивание	143	57,9	99	42,1	27	71,1	11	28,9
2	В контейнерах	99	60,9	39	39,4	18	75,0	6	25,0
Контрольный вариант	–	1037	85,3	178	14,7	49	87,5	7	12,5

Т а б л и ц а 7

Зараженность трихограммой яиц пилильщиков-ткачей на удалении от места выпуска

Trichogramma infestation of pine web-spinning sawfly's eggs at a distance from the release site

Номер по порядку	Удаление от места выпуска, м	Состояние яиц по видам пилильщиков-ткачей							
		Звездчатый пилильщик-ткач				Красноголовый пилильщик-ткач			
		здоровые		зараженные		здоровые		зараженные	
		шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%
1	100	16	88,9	2	11,1	56	87,5	8	12,5
2	200	11	91,7	1	8,3	20	95,2	1	4,8
3	300	7	87,5	1	12,5	47	92,2	4	7,8
4	400	27	96,4	1	3,6	53	85,5	9	14,5
5	200	47	90,4	5	9,6	5	100	0	0
6	400	33	89,2	4	10,8	7	87,5	1	12,5
Примечание. По номерам 5 и 6 учет проведен методом случайной выборки яиц ткачей в нижней части кроны.									

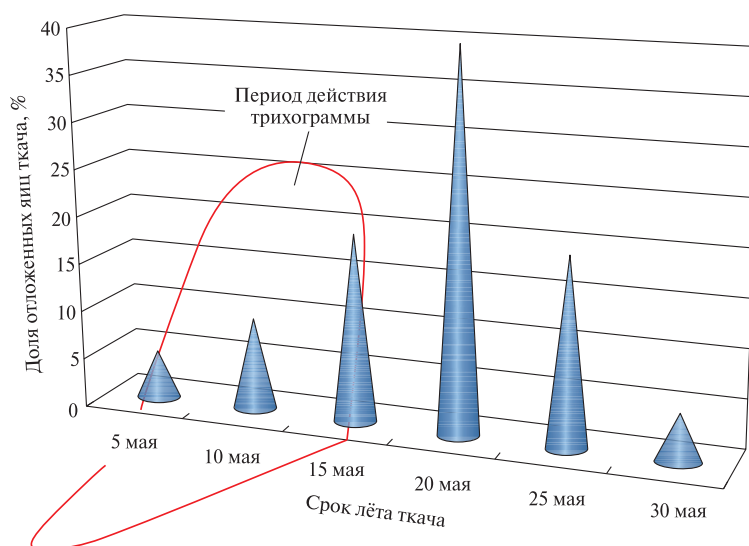


Рис. 5. Схема действия трихограммы на популяцию звездчатого пилильщика-ткача после выпуска

Fig. 5. Scheme of trichogramme action on the population of pine web-spinning sawfly after release

На основе анализа литературных данных о периоде лёта звездчатого пилильщика-ткача [37, 38] составлена схема действия заводской неспециализированной трихограммы на часть популяции звездчатого пилильщика-ткача в ранний срок выпуска (рис. 5).

Как следует из рис. 5, при выпуске, проведенном в начале лёта организма-мишени, только 25 % яиц ткача могли попасть под действие выпущенной трихограммы. Расчет показал (см. табл. 5), что погибло практически 100 % яиц вредителя, имевшихся в насаждениях в период присутствия энтомофага в древостое (8...10 сут.). Следовательно, расселение заводской трихограммы оказалось высоко эффективным, что позволяет продолжить исследования по ее применению для защиты сосняков от звездчатого пилильщика-ткача.

Применение трихограммы позволит осуществлять меры защиты леса как для профилактики роста численности звездчатого пилильщика-ткача, так и по ликвидации уже сформировавшихся очагов. Это позволит исключить использование пестицидов для защиты сосняков от звездчатого пилильщика-ткача до 50 %, а также даст возможность проводить работы по ограничению численности звездчатого пилильщика-ткача в водоохранных зонах, в других категориях защитных лесов, вблизи населенных пунктов и на особо охраняемых природных территориях.

Выводы

1. Экспериментальное применение неспециализированной заводской трихограммы пока-

зало высокую эффективность использования паразитоида для ограничения численности звездчатого пилильщика-ткача.

2. Период действия трихограммы на популяцию звездчатого пилильщика-ткача ограничен сроком присутствия паразитоида в древостое, развития следующих поколений яйцееда не происходит.

3. Целесообразность применения трихограммы при низкой численности звездчатого пилильщика-ткача требует более глубоких исследований.

4. Для использования яйцеедов рода *Trichogramma* практике защиты леса следует продолжить исследования по подбору эффективных норм расхода, сроков и кратности внесения трихограммы в очаги звездчатого пилильщика-ткача.

5. Установлена возможность использования трихограммы против красноголового пилильщика-ткача.

Благодарности

Авторы признательны специалистам Волгоградского филиала ФБУ «Рослесозащита» за помощь в организации полевых исследований.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ФБУ ВНИИЛМ на проведение прикладных научных исследований № 053-00006-23-00.

Список литературы

- [1] Обзор санитарного и лесопатологического состояния лесов Российской Федерации за 2022 год. Пушкино: ФБУ «Рослесозащита», 2023. 327 с.

- [2] Коломиец Н.Г. Звездчатый пилильщик-ткач. Новосибирск: Наука, 1967. 136 с.
- [3] Гниненко Ю.И., Маслов А.Д., Федотов М.А., Чернышов А.Я., Каупуш К.Р. Звездчатый пилильщик-ткач и меры борьбы с ним в Тверской обл. // Лесное хозяйство, 2003. № 3. С. 43–44.
- [4] Гниненко Ю.И., Серый Г.А., Бондаренко Е.Ю. Звездчатый пилильщик-ткач: вредоносность, лесопатологические обследования в очагах и меры защиты. Пушкино: Изд-во ВНИИЛМ, 2015. 60 с.
- [5] Voolma K., Hiiesaar K., Williams I. H., Ploomi A., Jõgar K. Cold hardiness in the pre-imaginal stages of the great web-spinning pine-sawfly *Acantholyda posticalis* // Agricultural and Forest Entomology, 2016, no. 18, pp. 432–436. <http://dx.doi.org/10.1111/afe.12172>
- [6] Ляшенко Л.И., Андреева Г.И. Димилин против вредителей леса // Защита растений, 1979. № 6. С. 21–23.
- [7] Давиденко Л.К. Перспективные препараты в борьбе со звездчатым пилильщиком-ткачом // Надзор за вредителями и болезнями леса и совершенствование мер борьбы с ними: Тезисы докл. науч.-техн. совещ. Пушкино, 17–19 сентября 1981 г. М.: Изд-во ВНИИЛМ, 1981. С. 52–54.
- [8] Мартынюк А.А. О концептуальных подходах к новой редакции Лесного кодекса Российской Федерации // Лесохозяйственная информация, 2020. № 2. С. 5–24. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2020.2.01
- [9] Беднова О.В. Биологический метод защиты леса. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023. 140 с.
- [10] Воронцов А.И. Перспективы использования энтомофагов для защиты леса // Биологическая и интегрированная борьба с вредителями в лесных биоценозах: материалы симп., 3–8 сентября 1989 г., Боржоми. М.: б. и., 1989. С. 20–26.
- [11] Цанков Г. Исследование и применение энтомофагов в биологической борьбе с вредителями лесных биоценозов // Биологическая и интегрированная борьба с вредителями в лесных биоценозах: материалы симп., 3–8 сентября 1989 г., Боржоми. М.: б. и., 1989. С. 7–21.
- [12] Ramzan S., Ahsin M., Maan N.A., Ali I. Use of *Trichogramma chilonis* as biological control / Agriculture Research Institute (AARI), Faisalabad. URL: <https://agrihunt.com/articles/pesticide-industry/use-of-trichogramma-chilonis-as-biological-control/> (дата обращения 28.03.2024).
- [13] Thomson L., Bennett D., Glenn D.A., Hoffmann A. Developing *Trichogramma* as a pest management tool // Predators and parasitoids. Eds. O. Koul, G.S. Dhaliwal, 2003, 208 p. DOI:10.1201/9780203302569.ch4
- [14] Smith S.M. Biological control with *Trichogramma*: advances, successes, and potential of their use // Annual review of entomology, 1996, no. 41 (1), pp. 375–406. DOI:10.1146/annurev.ento.41.1.375
- [15] Liu F.-H., Smith S.M. Measurement and Selection of Parasitoid Quality for Mass-Reared *Trichogramma minutum* Riley Used in Inundative Release // Biocontrol Science and Technology, 2000, no. 10 (1), pp. 3–13. doi.org/10.1080/09583150029332
- [16] Xu W., Wen X.Y., Hou Y.Y., Desneux N., Ali A., Zang L.S. Suitability of Chinese oak silkworm eggs for the multigenerational rearing of the parasitoid *Trichogramma leucaniae* // PLoS One, 2020, v. 15(4), p. e0231098. DOI:10.1371/journal.pone.0231098
- [17] Smith S.M., Strom K.B. Oviposition by the forest tent caterpillar (Lepidoptera:Lasiocampidae) and acceptability of its eggs to *Trichogramma minutum* (Hymenoptera: Trichogrammatidae) // Environmental Entomology, 1993, v. 22, no. 6, pp. 1375–1382. DOI:10.1093/ee/22.6.1375
- [18] Smith S.M., Carrow J.R., Laing J.E. Inundative release of the egg parasitoid, *Trichogramma minutum* (Hymenoptera: Trichogrammatidae), against forest insect pests such as the spruce budworm, *Choristoneura fumiferana* (Lepidoptera: Tortricidae) the Ontario project 1982–1986. Ottawa: The Entomological Society of Canada, 1990, 87 p.
- [19] Smith S.M., Hubbes M., Carrow J.R. Ground release of *Trichogramma minutum* Riley (Hymenoptera: Trichogrammatidae) against the spruce budworm, *Choristoneura fumiferana* (Lepidoptera: Tortricidae) // The Canadian Entomologist, 1987, v. 119, no. 3, pp. 251–263. DOI:10.4039/Ent119251-3
- [20] Martel V., Johns R., Jochems-Tanguay L., Jean F. The Use of UAS to Release the Egg Parasitoid *Trichogramma* spp. (Hymenoptera: Trichogrammatidae) Against an Agricultural and a Forest Pest in Canada // J. of Economic Entomology, 2021, v. 114, no. 5, pp. 1867–1881. DOI:10.1093/jee/toaa325
- [21] Roques A. The larch cone fly in the French Alps // Dynamics of forest insect population. Patterns, Causes, Implications / Ed. by A.A. Berryman. Boston: Springer MA, 1988, pp. 2–28.
- [22] Zang L.-S., Wang S., Zhang F., Desneux N. Biological Control with *Trichogramma* in China: History, Present Status, and Perspectives // Annual Review of Entomology, 2020, v. 66, pp. 463–484. DOI:10.1146/annurev-ento-060120-091620
- [23] Xu Y.X., Li B.Q. Alternative hosts of *Trichogramma dendrolimi* Matsumura in different habitats (Hymenoptera: Trichogrammatidae) // Entomologia Sinica, 1994, v. 1(3), pp. 259–263. DOI: 10.1111/j.1744-7917.1994.tb00252.x
- [24] Philip M. M., Orri D. B. Operational Considerations for Augmentation of *Trichogramma exiguum* (Hymenoptera: Trichogrammatidae) for Suppression of *Rhyacionia frustrana* (Lepidoptera: Tortricidae) in *Pinus taeda* Plantations // J. of Economic Entomology, 2008, v. 101, no. 2, pp. 421–429. DOI: 10.1603/0022-0493(2008)101[421:ocfaot]2.0.co;2
- [25] Kenis M., Kloosterman K.. European parasitoids of the pine false webworm (*Acantholyda erythrocephala* (L.)) and their potential for biological control in North America // Proceedings: Integrated management and dynamics of forest defoliating insects / Eds. A.M. Liebholt, M.L. McManus, I.S. Otvos, S.L.C. Fothergill. Victoria, British Columbia, Canada, 1999, pp. 65–73.
- [26] Гниненко Ю.И., Симонова Т.И. Роль патогенов и энтомофагов звездчатого и красноголового пилильщика-ткачей в очагах массового размножения // ИзВУЗ Лесной журнал, 2001. № 5–6. С. 16–23.
- [27] Гниненко Ю.И. Роль яйцедов в очагах ткача-пилильщика в Казахстане // II Всесоюз. науч.-технич. конф. «Охрана лесных экосистем и рациональное использование лесных ресурсов»: тез. докл. Ч. 1. М., 1991. С. 103–104.
- [28] Гниненко Ю.И., Раков А. Г., Гимранов Р. И., Гниненко А. Ю. Опыт производственного применения трихограммы в очагах массового размножения звездчатого пилильщика-ткача // Мониторинг и

- биологические методы контроля вредителей и патогенов древесных растений: от теории к практике: материалы III Всерос. конф. с междунар. участием. Красноярск, 11–15 апреля 2022 г. М.: Изд-во Института леса СО РАН, 2022. С. 47–48.
- [29] Гниненко Ю.И., Раков А.Г., Гимранов Р.И. Первый опыт широкомасштабного применения трихограммы для защиты леса от звездчатого пилильщика-ткача в России // Совет ботанических садов стран СНГ при международной ассоциации академий наук: информ. бюлл. Вып. 16 (39). Пушкино: Изд-во ВНИИЛМ, 2022. С. 81–87. DOI: 10.35102/cbgcis.2022.34.81.011
- [30] Энтомофаги: производство и применение в России. URL: <https://agriecomission.com/base/entomofagi-proizvodstvo-i-primeneniye-v-rossii?ysclid=lmg7h51grt284617704> (дата обращения 25.03.2024).
- [31] Нехимическая защита / АГРО XXI–2022. URL: <https://finance.rambler.ru/economics/48628853-nehimicheskaya-zaschita/?ysclid=lnwtsgop44435522179> (дата обращения 25.03.2024).
- [32] Крушев Л.Т. Биологические методы защиты леса от вредителей. М.: Лесная пром-сть, 1973. 192 с.
- [33] Щепетильникова В.А. Применение трихограммы в СССР // Биологические средства защиты растений. М.: Колос, 1974. С. 138–158.
- [34] Федоряк В. Е. Звездчатый ткач. Алма-Ата: Кайнар, 1970. 60 с.
- [35] Гниненко Ю.И., Сергеева Ю.А. Оценка эффективности применения инсектицидов для защиты лесов. Пушкино: Изд-во ВНИИЛМ, 2015. 40 с.
- [36] Гар К.А. Методы испытания токсичности и эффективности инсектицидов (под ред. Э.Э Савдарга). М.: Изд-во с/х литературы, журн. и плакатов, 1963. 288 с.
- [37] Серый Г.А. К биологии звездчатого пилильщика-ткача *Acantholyda posticalis* (Matsumura, 1912) (Hymenoptera, Pamphiliidae) в условиях Волгоградской области // Энтомологические и паразитологические исследования в Поволжье, 2017. Вып. 14. С. 57–66.
- [38] Малый Л.П. Биологические и экологические особенности звездчатого пилильщика-ткача (*Acantholyda stellata* Christ) в Белоруссии и меры борьбы с ним: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Гомель, 1972. 21 с.

Сведения об авторах

Сергеева Юлия Анатольевна — канд. биол. наук, зав. лабораторией биологических методов защиты леса Отдела защиты леса — Центра приоритетных биотехнологий в защите леса, ФБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства» (ФБУ ВНИИЛМ), sergeeva@vniilm.ru

Долмонега Сергей Октавианович — ст. науч. сотр. лаборатории биологических методов защиты леса Отдела защиты леса — Центра приоритетных биотехнологий в защите леса, ФБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства» (ФБУ ВНИИЛМ), dolmonego@vniilm.ru

Родин Сергей Анатольевич — д-р. с.-х. наук, академик РАН, и. о. директора ФБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства» (ФБУ ВНИИЛМ), rodin@vniilm.ru

Загоринский Андрей Александрович — науч. сотр. лаборатории биологических методов защиты леса Отдела защиты леса — Центра приоритетных биотехнологий в защите леса, ФБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства» (ФБУ ВНИИЛМ), zagorinsky@mail.ru

Поступила в редакцию 02.05.2024.

Одобрено после рецензирования 06.02.2025.

Принята к публикации 04.06.2025.

EXPERIMENTAL APPLICATION OF EGG PARASITIDS *TRICHOGRAMMA* GENUS AGAINST PINE WEB-SPINNING SAWFLY *ACANTHOLYDA POSTICALIS*

Yu.A. Sergeeva, S.O. Dolmonego, S.A. Rodin, A.A. Zagorinsky

All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, 15, Institutskaya st., 141202, Pushkino, Moscow reg., Russia

sergeeva@vniilm.ru

An experimental application of a non-specialized *Trichogramma* sp. produced at the factory (factory *Trichogramma*) was carried out to develop an environmentally safe method of protecting forest plantations, expanding the arsenal of biological means to prevent the occurrence and elimination of foci of the pine web-spinning sawfly. The release of the *Trichogramma* sp. was carried out at the beginning of the egg-laying period by females' pine web-spinning sawfly in the Rostov and Volgograd regions on the basis of biomaterial (grain moth eggs infected with *Trichogramma*) provided by a private manufacturer. Different consumption rates and methods of applying biomaterial have been tested (uniform ground dispersion and placement in containers). The death of the eggs of pine web-spinning sawfly in the places of application of the factory *Trichogramma* was at the experimental site in the Volgograd region: 26,4...54,1 % (in the control: 8,5...14,5 %). In the Rostov region, 8,3...16,7 %, and 0...33,3 % in different plots (in the control: 4,5...14,3 %). Based on statistical processing of data, it was found that with a low pest population in the Rostov region, where the threat of pine defoliating by the pest is 10 %, differences with the control in trichogram efficiency are not reliable when using both overestimated and underestimated biomaterial consumption rates. At the experimental site in the Volgograd region, with a threat of defoliating of about 300 %, the reliability of differences in the effectiveness of the *Trichogramma* sp. in the treated and control areas is significant. The resumption of a new generation of the factory *Trichogramma* was not noted in the experimental sites, which was confirmed in laboratory experience. Calculation of the stock of eggs of the pine web-spinning sawfly in experimental sites during the operation of the factory *Trichogramma* and its comparison with experimental data on the effectiveness of its application showed that 100 % of the pest eggs available in the plantations at that time died. Therefore, the use of a factory *Trichogramma* against a pine web-spinning sawfly has shown high efficiency. It is advisable to conduct research on the selection of effective consumption rates and timing of the introduction of a *Trichogramma* sp. into the foci of the phytophage.

Keywords: forest protection, pine web-spinning sawfly, *Trichogramma*, efficiency

Suggested citation: Sergeeva Yu.A., Dolmonego S.O., Rodin S.A., Zagorinskiy A.A. *Eksperimental'noe primeneniye yaytseedov roda Trichogramma protiv zvezdchatogo pilil'shchika-tkacha Acantholyda posticalis* [Experimental application of egg parasitoids *Trichogramma* genus against pine web-spinning sawfly *Acantholyda posticalis*]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 4, pp. 79–93. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-79-93

References

- [1] *Obzor sanitarnogo i lesopatologicheskogo sostoyaniya lesov Rossiyskoy Federatsii za 2022 god* [Review of the sanitary and forest pathology status of the forests of the Russian Federation for 2022]. Pushkino: FBU «Roslesozashchita», 2023, 327 p.
- [2] Kolomiets N.G. *Zvezdchatyy pilil'shchik-tkach* [Pine web-spinning sawfly]. Novosibirsk: Nauka, 1967, p. 136.
- [3] Gninenko Yu.I., Maslov A.D., Fedotov M.A., Chernyshov A.Ya., Kaupush K.R. *Zvezdchatyy pilil'shchik-tkach i mery bor'by s nim v Tverskoy obl.* [Pine web-spinning sawfly and measures to combat it in the Tver region]. *Lesnoe khozyaystvo* [Forestry], 2003, no. 3, pp. 43–44.
- [4] Gninenko Yu.I., Seryy G.A., Bondarenko E.Yu. *Zvezdchatyy pilil'shchik-tkach: vreditel'stvo, lesopatologicheskie obsledovaniya v ochagakh i mery zashchity* [Pine web-spinning sawfly: its hazard, forest pathology surveys in its mass outbreaks, and protection operations]. Pushkino: VNIILM, 2015, 60 p.
- [5] Voolma K., Hiiesaar K., Williams I. H., Ploomi A., Jõgar K. Cold hardiness in the pre-imaginal stages of the great web-spinning pine-sawfly *Acantholyda posticalis*. *Agricultural and Forest Entomology*, 2016, no. 18, pp. 432–436. <http://dx.doi.org/10.1111/afe.12172>
- [6] Lyashenko L.I., Andreeva G.I. *Dimilin protiv vreditel'ey lesa* [Dimilin against forest pests]. *Zashchita rasteniy* [Plant Protection], 1979, no. 6, pp. 21–23.
- [7] Davidenko L.K. *Perspektivnye preparaty v bor'be so zvezdchatym pilil'shchikom-tkachom* [Promising drugs in the fight against pine web-spinning sawfly]. *Nadzor za vreditelyami i boleznyami lesa i sovershenstvovanie mer bor'by s nimi: Tezisy dokl. nauch.-tekhn. soveshch.* [Surveillance of forest pests and diseases and improvement of measures to combat them: Abstracts of the report of a scientific and technical meeting]. Pushkino, September 17–19, 1981. Moscow: VNIILM, 1981, pp. 52–54.
- [8] Martynyuk A.A. *O kontseptual'nykh podkhodakh k novoy redaktsii Lesnogo kodeksa Rossiyskoy Federatsii* [Concept approaches to the Russian Federation forest code new version]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 2020, no. 2, pp. 5–24. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2020.2.01.

- [9] Bednova O.V. *Biologicheskiiy metod zashchity lesa* [Biological method of forest protection]. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2023, 140 p.
- [10] Vorontsov A.I. *Perspektivy ispol'zovaniya entomofagov dlya zashchity lesa* [Prospects for the use of entomophages for forest protection]. *Biologicheskaya i integrirovannaya bor'ba s vreditelyami v lesnykh biotsenozakh: mater. simpoz., [Biological and integrated pest control in forest biocenoses: simpos. mater.]* September 3–8, 1989, Borjomi. Moscow, 1989, pp. 20–26.
- [11] Tsankov G. *Issledovanie i primeneniye entomofagov v biologicheskoy bor'be s vreditelyami lesnykh biotsenozov* [Research and application of entomophages in biological control of pests of forest biocenoses]. *Biologicheskaya i integrirovannaya bor'ba s vreditelyami v lesnykh biotsenozakh: mater. simpoz. Biologicheskaya i integrirovannaya bor'ba s vreditelyami v lesnykh biotsenozakh: mater. simpoz. [Biological and integrated pest control in forest biocenoses: simpos. mater.]*, September 3–8, 1989, Borjomi. Moscow, 1989, pp. 7–21.
- [12] Ramzan S., Ahsin M., Maan N.A., Ali I. Use of *Trichogramma chilonis* as biological control / Agriculture Research Institute (AARI), Faisalabad. Available at: <https://agrihunt.com/articles/pesticide-industry/use-of-trichogramma-chilonis-as-biological-control/> (accessed 28.03.2024).
- [13] Thomson L., Bennett D., Glenn D.A., Hoffmann A. Developing *Trichogramma* as a pest management tool. *Predators and parasitoids*. Eds. O. Koul, G.S. Dhaliwal, 2003, 208 p. DOI:10.1201/9780203302569.ch4
- [14] Smith S.M. Biological control with *Trichogramma*: advances, successes, and potential of their use. *Annual review of entomology*, 1996, no. 41 (1), pp. 375–406. DOI:10.1146/annurev.ento.41.1.375
- [15] Liu F.-H., Smith S.M. Measurement and Selection of Parasitoid Quality for Mass-Reared *Trichogramma minutum* Riley Used in Inundative Release. *Biocontrol Science and Technology*, 2000, no. 10 (1), pp. 3–13. doi.org/10.1080/09583150029332
- [16] Xu W., Wen X.Y., Hou Y.Y., Desneux N., Ali A., Zang L.S. Suitability of Chinese oak silkworm eggs for the multigenerational rearing of the parasitoid *Trichogramma leucaniae*. *PLoS One*, 2020, v. 15(4), p. e0231098. DOI:10.1371/journal.pone.0231098
- [17] Smith S.M., Strom K.B. Oviposition by the forest tent caterpillar (Lepidoptera: Lasiocampidae) and acceptability of its eggs to *Trichogramma minutum* (Hymenoptera: Trichogrammatidae). *Environmental Entomology*, 1993, v. 22, no. 6, pp. 1375–1382. DOI:10.1093/ee/22.6.1375
- [18] Smith S.M., Carrow J.R., Laing J.E. Inundative release of the egg parasitoid, *Trichogramma minutum* (Hymenoptera: Trichogrammatidae), against forest insect pests such as the spruce budworm, *Choristoneura fumiferana* (Lepidoptera: Tortricidae) the Ontario project 1982–1986. Ottawa: The Entomological Society of Canada, 1990, 87 p.
- [19] Smith S.M., Hubbes M., Carrow J.R. Ground release of *Trichogramma minutum* Riley (Hymenoptera: Trichogrammatidae) against the spruce budworm, *Choristoneura fumiferana* (Lepidoptera: Tortricidae). *The Canadian Entomologist*, 1987, v. 119, no. 3, pp. 251–263. DOI:10.4039/Ent119251-3
- [20] Martel V., Johns R., Jochems-Tanguay L., Jean F. The Use of UAS to Release the Egg Parasitoid *Trichogramma* spp. (Hymenoptera: Trichogrammatidae) Against an Agricultural and a Forest Pest in Canada. *J. of Economic Entomology*, 2021, v. 114, no. 5, pp. 1867–1881. DOI:10.1093/jee/toaa325
- [21] Roques A. The larch cone fly in the French Alps // *Dynamics of forest insect population. Patterns, Causes, Implications* / Ed. by A.A. Berryman. Boston: Springer MA, 1988, pp. 2–28.
- [22] Zang L.-S., Wang S., Zhang F., Desneux N. Biological Control with *Trichogramma* in China: History, Present Status, and Perspectives. *Annual Review of Entomology*, 2020, v. 66, pp. 463–484. DOI: 10.1146/annurev-ento-060120-091620
- [23] Xu Y.X., Li B.Q. Alternative hosts of *Trichogramma dendrolimi* Matsumura in different habitats (Hymenoptera: Trichogrammatidae). *Entomologia Sinica*, 1994, v. 1(3), pp. 259–263. DOI: 10.1111/j.1744-7917.1994.tb00252.x
- [24] Philip M. M., Orri D. B. Operational Considerations for Augmentation of *Trichogramma exiguum* (Hymenoptera: Trichogrammatidae) for Suppression of *Rhyacionia frustrana* (Lepidoptera: Tortricidae) in *Pinus taeda* Plantations. *J. of Economic Entomology*, 2008, v. 101, no. 2, pp. 421–429 DOI: 10.1603/0022-0493(2008)101[421:ocfaot]2.0.co;2
- [25] Kenis M., Kloosterman K.. European parasitoids of the pine false webworm (*Acantholyda erythrocephala* (L.)) and their potential for biological control in North America. *Proceedings: Integrated management and dynamics of forest defoliating insects* / Eds. A.M. Liebhold, M.L. McManus, I.S. Otvos, S.L.C. Fosbroke. Victoria, British Columbia, Canada, 1999, pp. 65–73.
- [26] Gninenko Yu.I., Simonova T.I. *Rol' patogenov i entomofagov zvezdchatogo i krasnogolovogo pilil'shchikov-tkachey v ochagakh massovogo razmnozheniya* [Role of pathogenes and parasites of saw flies in the centers of mass reproduction]. *Russian Lesnoy zhurnal*, 2001, no 5–6, pp. 16–23.
- [27] Gninenko Yu.I. *Rol' yaysedov v ochagakh tkacha-pilil'shchika v Kazakhstane* [The role of egg parasitoid in the pine web-spinning sawfly foci in Kazakhstan]. II Vsesoyuznaya nauch.-prakt. konf. «Okhrana lesnykh ekosistem i ratsional'noe ispol'zovanie lesnykh resursov»: tez. dokl. [II All-Union scientific-practical conf. «Protection of forest ecosystems and rational use of forest resources»: report summary] Part 1. Moscow, 1991, pp. 103–104.
- [28] Gninenko Yu.I., Rakov A. G., Gimranov R. I., Gninenko A. Yu. *Opyt proizvodstvennogo primeneniya trikhogrammy v ochagakh massovogo razmnozheniya zvezdchatogo pilil'shchika-tkacha* [Experience of industrial application of *Trichogramma* in foci of mass reproduction of the pine web-spinning sawfly]. *Monitoring i biologicheskie metody kontrolya vreditely i patogenov drevesnykh rasteniy: ot teorii k praktike: mater. III Vseros. konf. s mezhdunar. uchastiem [Monitoring and biological methods of control of pests and pathogens of woody plants: from theory to practice: Proc. III All-Russian Conf. with international participation]*. Moscow, April 11–15, 2022, Moscow–Krasnoyarsk, 2022, pp. 47–48.

- [29] Gninenko Yu.I., Rakov A.G., Gimranov R.I. *Pervyy opyt shirokomasshtabnogo primeneniya trikhogrammy dlya zashchity lesa ot zvezdchatogo pilil'shchika-tkacha v Rossii* [The first experience of large-scale use of Trichogramma to protect forests from the stellar sawfly-weaver in Russia]. *Sovet botanicheskikh sadov stran SNG pri mezhdunarodnoy assotsiatsii akademiy nauk: Inform. byull. Vyp. 16 (39)* [Council of Botanical Gardens of the CIS Countries under the International Association of Academies of Sciences: newsletter issue 16 (39)]. Pushkino: VNIILM, 2022, pp. 81–87. DOI: 10.35102/cbgcis.2022.34.81.011
- [30] *Entomofagi: proizvodstvo i primeneniye v Rossii* [Entomophages: production and application in Russia]. Available at: <https://agriecommission.com/base/entomofagi-proizvodstvo-i-primeneniye-v-rossii?ysclid=lmg7h51rrr284617704> (accessed 25.03.2024).
- [31] *Nekhimicheskaya zashchita AGRO XXI–2022* [Non-chemical protection AGRO XXI–2022]. Available at: <https://finance.rambler.ru/economics/48628853-nehimicheskaya-zashchita/?ysclid=lnwtsgop44435522179> (accessed 25.03.2024).
- [32] Krushev L.T. *Biologicheskie metody zashchity lesa ot vreditel'ey* [Biological methods of protecting forests from pests]. Moscow: Forest industry, 1973, 192 p.
- [33] Shchepetil'nikova V.A. *Primeneniye trikhogrammy v SSSR. Biologicheskie sredstva zashchity rasteniy* [Application of Trichogramma in the USSR]. *Biologicheskie sredstva zashchity rasteniy* [Biological plant protection products]. Moscow: Kolos, 1974, pp. 138–158.
- [34] Fedoryak V.E. *Zvezdchatyy tkach* [The pine web-spinning sawfly]. Alma-Ata: Kaynar, 1970, 60 p.
- [35] Gninenko Yu.I., Sergeeva Yu.A. *Otsenka effektivnosti primeneniya insektitsidov dlya zashchity lesov* [Assessment of insecticide application efficiency in forest protection]. Pushkino: VNIILM, 2015, 40 p.
- [36] Gar K.A. *Metody ispytaniya toksichnosti i effektivnosti insektitsidov (pod red. E.E. Savzdarga)* [Methods for testing the toxicity and effectiveness of insecticides (edited by E.E. Savzdarg)]. Moscow: Publishing house of agricultural literature, journal and posters, 1963, 288 p.
- [37] Seryy G.A. *K biologii zvezdchatogo pilil'shchika-tkacha Acantholyda posticalis (Matsumura, 1912) (Hymenoptera, Pamphiliidae) v usloviyakh Volgogradskoy oblasti*. [The biology of pine web spinning sawfly *Acantholyda posticalis* (Matsumura, 1912) (Hymenoptera, Pamphiliidae) in the conditions of the Volgograd province]. *Entomologicheskie i parazitologicheskie issledovaniya v Povolzh'e* [Entomological and parasitological studies in the Volga region], 2017, iss. 14, pp. 57–66.
- [38] Malyy L. P. *Biologicheskie i ekologicheskie osobennosti zvezdchatogo pilil'shchika-tkacha (Acantholyda stellata Christ) v Belorussii i mery bor'by s nim* [Biological and ecological features of the pine web-spinning sawfly (*Acantholyda stellata* Christ) in Belarus and measures to combat it]. Abstract Dis. Cand. Sci. (Biol.). Gomel, 1972, 21 p.

Acknowledgments

The authors are grateful to the specialists of the Volgograd branch of FBU 'Roslesozaschita' for their assistance in the organisation of field studies.

The work was carried out under the theme of the state task of FBU VNIILM for applied scientific research No. 053-00006-23-00.

Authors' information

Sergeeva Yuliya Anatol'evna — Cand. Sci (Biology), Head of the Laboratory of Biological Methods of Forest Protection of the Forest Protection Department – Center for Priority Biotechnologies in Forest Protection, All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, sergeeva@vniilm.ru

Dolmonego Sergey Oktavianovich — Senior Research Scientist at the Laboratory of Biological Methods of Forest Protection of the Forest Protection Department – Center for Priority Biotechnologies in Forest Protection, All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, dolmonego@vniilm.ru

Rodin Sergey Anatol'evich — Dr. Sci. (Agriculture), Full member of the Russian Academy of Sciences, Acting Director of the All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, info@vniilm.ru

Zagorinskiy Andrey Aleksandrovich — Research Scientist at the Laboratory of Biological Methods of Forest Protection of the Forest Protection Department – Center for Priority Biotechnologies in Forest Protection, All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, zagorinsky@mail.ru

Received 02.05.2024.

Approved after review 06.02.2025.

Accepted for publication 04.06.2025.

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

ИЗМЕНЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ПАСТ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОДЕРЖАНИЯ В НИХ ВОДЫ И ИСХОДНОЙ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЕННЫХ ОБРАЗЦОВ

Г.Н. Федотов¹✉, Д.А. Тарасенко¹, И.В. Горепекин^{1,2}, Ю.П. Батырев³

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

²Евразийский центр по продовольственной безопасности (Аграрный центр МГУ), Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12

³ФГАОУ 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

Изучено влияние высушивания почв и влажности, до которой увлажняли почвенные образцы, а также механического воздействия на пасты на их вязкость. Целью исследования являлось изучение и объяснение наблюдаемых явлений с позиций физической и гелевой моделей почв. Исследования проводили на образцах, отобранных из гумусово-аккумулятивных горизонтов чернозема, дерново-подзолистой и серой лесной почв. Вязкость почвенных паст определяли при помощи вибрационного вискозиметра, а для изучения размера почвенных частиц в пастах использовали лазерный дифрактометр. Установлено, что при росте величины механических воздействий на почвенные пасты по достижении своего для каждой почвы предела происходит увеличение вязкости почвенных паст, называемое в коллоидной химии реопексией. Показано, что реопексия характеризуется ростом размера частиц в почвенных пастах. Обнаружено, что влажность, которую почвенный образец имел перед приготовлением пасты, влияет на вязкость паст сложным образом: для изученных образцов почв наблюдаются два максимума вязкости паст. Один из них близок к почвенной гидрологической константе влажности разрыва капилляров, а второй — к наименьшей влагоемкости.

Ключевые слова: реопексия почвенных паст, размер частиц в почвенных пастах, влажность разрыва капилляров, наименьшая влагоемкость

Ссылка для цитирования: Федотов Г.Н., Тарасенко Д.А., Горепекин И.В., Батырев Ю.П. Изменение вязкости паст в зависимости от содержания в них воды и исходной влажности почвенных образцов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 4. С. 94–103. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-94-103

Для объяснения изменений в физических свойствах почв при высушивании принято использовать трехфазную модель ее структурной организации [1]. В основе трехфазной модели лежит представление о постоянстве твердой фазы и подвижности жидкой.

Высушивание почв в трехфазной модели сопровождается удалением воды из капилляров и сцеплением почвенных частиц, которые необратимо меняют тип взаимодействия: с коагуляционных на конденсационные и кристаллизационные связи [1, 2].

Процесс высушивания подробно изучен для глинистых минералов. При высокой скорости высыхания они неравномерно деформируются [3, 4]. Это способствует развитию трещин. Более низкая скорость сушки приводит к большей вариации распределения пор по размерам [3].

Наряду с трехфазной моделью в настоящее время для объяснения экспериментальных результатов стали использовать гелевую модель почв. Она основана на том, что почвенные отдельные частицы состоят из более мелких частиц, покрытых и связанных между собой почвенными органоминеральными гелями [5, 6]. В состав гелей входят минеральные коллоиды [7], образующиеся при выветривании [8], которые стабилизируются гуминовыми веществами [9–12].

Гуминовые вещества имеют многоуровневую структурную организацию: первичные частицы-молекулы гуминовых веществ размером 2...10 нм объединяются во фрактальные кластеры (Ф-кластеры) размером 100...200 нм [13–15]. Возникновение Ф-кластеров и их объединение с образованием органической составляющей гелей происходит благодаря мозаичной гидрофильно-гидрофобной поверхности частиц-молекул гуминовых веществ [16].

Гелевая модель почв послужила основанием для введения не только понятия «гелевый слой», но и связанного с ним представления о кинетически несвободной воде [17] — воде, включенной в гели. Высушивание почв в гелевой модели приводит к удалению обоих типов влаги: кинетически свободной воды в капиллярах вне гелей и связанной воды, включенной в гели. Потеря воды гелями приводит к изменению их структуры — уплотнению и усадке [6]. Из проведенного сравнения высушивания почв с позиций трехфазной и гелевой моделей почв следует, что, несмотря на различные подходы, обе модели сходны в том, что при высушивании почв усиливаются органо-минеральные взаимодействия. Это согласуется с данными других исследователей [18].

Рассмотрим с позиций двух моделей процесс увлажнения почв. С позиции трехфазной модели основные изменения при увлажнении почв связаны с изменением их объема, который определяется содержанием воды, соотношением пор по размерам, формой пор и емкостью катионного обмена. Например, чем больше влажность образца и способность глинистых минералов к набуханию, тем больше объем образующегося порового пространства [19]. Кристаллизационные и конденсационные связи, которые возникли на этапе высушивания, не сменяются полностью на коагуляционные, поэтому изменения физических свойств почв в трехфазной модели носят необратимый характер.

Гелевая модель почв не отрицает роли содержания воды, соотношения порового пространства и типа глинистых минералов в изменении физических свойств почв, происходящем при увлажнении. Она дополняет эти представления, делая акцент на коллоидной фракции частиц глинистых минералов и гуминовых веществ, которые при взаимодействии образуют гелевые структуры, способные к набуханию.

Одним из приемов изучения структуры почвенных частиц является вискозиметрия. В физике почв этот метод применяют для изучения почвенных паст [20–24]. Исследования по изучению вязкости часто проводят на воздушно-сухих образцах почв, увлажненных в течение одних суток [25, 26]. С позиции трехфазной модели вязкость почвенных паст определяется взаимодействием между частицами твердой фазы в воде, а в гелевой модели — соотношением кинетически свободной и связанной воды в почвах [17].

Цель работы

Цель работы — изучение влияния влажности высушенных до воздушно-сухого состояния и вновь увлажненных почв на вязкость приго-

товленных из них паст, попытка объяснения наблюдаемых явлений с позиций физической и гелевой моделей почв.

Объекты и методы

В качестве объектов исследования использовали отобранные из гумусоаккумулятивных горизонтов образцы почв зонального ряда:

- дерново-подзолистой (Московская область);
- серой лесной (Тульская область);
- чернозема выщелоченного (Орловская область).

Гранулометрический состав дерново-подзолистой почвы соответствовал легкосуглинистому, серой лесной — среднесуглинистому, чернозема — тяжелосуглинистому.

Определение вязкости почвенных паст. Нерастертые образцы почв были предварительно высушены до воздушно-сухого состояния, опять увлажнены до разных влажностей и выдержаны в герметично закрытой емкости при температуре 26...28 °C не менее двух недель.

Измерение влажности почв проводили на влагомере ОHAUS MB25.

Пасты готовили, добавляя воду к почвам и перемешивая их в течение 1 мин с помощью мешалки MLW MR25 при скорости 200 и 1200 об./мин.

Содержание воды в пастах для каждой используемой почвы подбирали экспериментально, для того, чтобы вязкость паст находилась в наиболее чувствительном диапазоне работы вискозиметра. Для дерново-подзолистой почвы это соответствовало 37 %, для серой-лесной — 47, для чернозема — 57 %.

Для определения вязкости паст использовали вибрационный вискозиметр SV-10. Принцип работы прибора основан на поддержании амплитуды вынужденных колебаний чувствительного элемента (камертона), помещенного в вязкую среду, за счет изменения силы тока. Время измерения 15 с. Амплитуда колебаний камертона 2 мм.

Определение размера частиц в почвенных пастах методом дифрактометрии. Суспензии готовили, добавляя 10 г пасты к 250 мл воды и перемешивая суспензию 20 мин. Затем суспензию центрифугировали 10 мин при скорости 2000 об./мин, чтобы избавиться от минеральных частиц. После центрифугирования для определения размера частиц использовали лазерный дифрактометр.

Определение наименьшей влагоемкости почв. При определении наименьшей влагоемкости использовали алюминиевые трубки

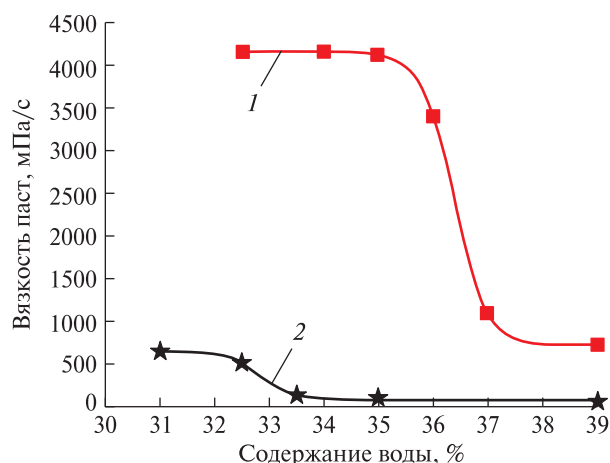


Рис. 1. Вязкость почвенных паст, приготовленных из разных образцов дерново-подзолистой почвы, в зависимости от содержания в них воды: 1 — исходная; 2 — воздушно-сухая

Fig. 1. Viscosity of soil pastes prepared from different samples of sod-podzolic soil depending on their water content: 1 — initial; 2 — air-dry

диаметром 40 мм и длиной 100 мм. Насыпной образец помещали в трубку и осуществляли виброуплотнение. Затем насыщали образцы водой снизу до полной влагоемкости в течение одних суток. После этого образцы помещали на влажный песок на 3 сут. для стекания гравитационной влаги [27]. Определение проводили в трехкратной повторности.

Результаты и обсуждение

В ходе экспериментальных работ получили результаты по вязкости почвенных паст, приготовленных из почв, не подвергавшихся высушиванию (исходных) и высушенных до воздушно-сухого состояния (рис. 1). Вязкость паст измеряли сразу после внесения в образцы воды и перемешивания мешалкой при скорости 200 об./мин.

При содержании воды в пастах на уровне 39 % вязкость пасты из исходной почвы составляла порядка 750 мПа/с, а из воздушно-сухой — 100 мПа/с. С уменьшением содержания воды вязкость обоих образцов резко увеличивалась по достижении порогового значения: для образца из исходной почвы — 37 %, для воздушно-сухого — 33,5 %. Для образца из исходной почвы скачок вязкости изменялся с 1000 мПа/с до более 4000 мПа/с, для воздушно-сухого — с 100 мПа/с до 700 мПа/с. Характерно, что при равных содержаниях воды в пастах почвы, не подвергавшиеся высушиванию, имели большую вязкость по сравнению с воздушно-сухими (см. рис. 1).

Получаемые на вибрационном вискозиметре результаты можно трактовать с помощью уравнения Эйнштейна для вязкости суспензий [28]

$$\eta = \eta_0 (1 + 2,5\phi),$$

где η — вязкость суспензии;

η_0 — вязкость растворителя;

ϕ — объемная доля твердой фазы;

2,5 — коэффициент для сферических твердых частиц.

Это уравнение применяется при изучении вязкости суспензий гуминовых веществ [29].

Из физического смысла этой формулы следует, что вязкость почвенных паст определяется объемной долей в них твердой фазы или обратной величиной — объемной долей кинетически свободной воды. Следует обратить внимание, что размер твердых частиц в данной зависимости напрямую не фигурирует и может оказывать влияние на вязкость паст только опосредованно через объемную долю кинетически свободной воды.

Для паст из исходной и воздушно-сухой почвы при одинаковом содержании воды, например 35 %, массовая доля твердой фазы не отличается. Хотя различия в вязкости паст свидетельствуют об обратном: объемные доли твердой фазы и кинетически свободной воды в них разные. Для исходной почвы вязкость превышает 4000 мПа/с, а для воздушно-сухой находится на уровне 100 мПа/с.

С позиций физической модели почв и набухания глинистых минералов в дерново-подзолистой почве объяснить эти результаты достаточно сложно, так как состав минералов исходной и воздушно-сухой почв идентичен.

С позиции гелевой модели почв возможностей для объяснения значительно больше, поскольку увеличение вязкости может быть связано с уменьшением доли свободной воды при набухании почвенных гелей. Вода входит в гели, теряет подвижность и формально увеличивает объем твердой фазы почв. Аналогичный подход применяют, объясняя изменение вязкости полиэлектролитов [28]. Минимальный объем молекулы в состоянии клубка имеют в изоэлектрической точке. Минимальной объем соответствует наименьшей вязкости. При появлении избытка положительных или отрицательных зарядов клубки разбухают и включают в свой состав свободную до этого времени воду. Это приводит к увеличению вязкости.

Данные растровой электронной микроскопии, представленные в работе [6], это подтверждают: фрактальные (Ф-кластеры) из гуминовых веществ и надмолекулярные образования из них, составляющие почвенные гели, при

высушивании взаимопроникают одно в другое и увеличиваются в размерах. Это приводит к уменьшению суммарного внутреннего объема гелей, способного удерживать воду, что объясняет низкие значения вязкости воздушно-сухих образцов почв.

В целях лучшего понимания полученных результатов и происходящих в почвенных пастах процессов на следующем этапе исследования было решено уточнить, как механическое воздействие (перемешивание паст) влияет на их вязкость. Для этого перед измерением пасты обрабатывали на мешалке MLW MR25 при различной скорости: от 200 до 1200 об./мин.

Из представленных данных следует (рис. 2), что по достижении определенной интенсивности механического воздействия на пасты их вязкость изменяется. Для дерново-подзолистой почвы это воздействие достигается при скорости 400 об./мин, для серой лесной почвы и чернозема — 200 об./мин. Увеличение вязкости паст при усилении механического воздействия свидетельствует о явлении реопексии, которое ранее было отмечено для паст из дерново-подзолистых почв и черноземов [30].

Существующее объяснение реопексии в трехфазной модели заключается в высокой доле конденсационно-кристаллизационных связей внутри агрегатов [13]. Однако этот тип связей начинает преобладать в почвах при высушивании, когда они сменяют коагуляционные контакты. Тогда неясно, почему на образцах, не подвергавшихся высушиванию, мы получаем результаты, свидетельствующие о реопексии.

С позиции гелевой модели можно предложить другое объяснение реопексии. Почвенные органоминеральные гели состоят из «кирпичиков» — надмолекулярных образований из глинистых минералов и гуминовых веществ [6]. Эти органоминеральные образования связаны между собой благодаря различным типам связей [11, 31]: электростатических взаимодействий, сил Ван-дер-Ваальса, гидрофобных сил, *H*-связывания, образования катионных мостиков, хелатирования поверхностных ионов и лигандного обмена.

Механическое воздействие мешалки работает в сторону разрыва этих связей. Можно ожидать, что по достижении критического значения числа оборотов надмолекулярные образования будут отделяться одно от другого и вновь соединяться при выключении мешалки. Процесс их объединения будет сопровождаться связыванием свободной воды.

Большим плюсом гелевой модели является возможность экспериментальной проверки предлагаемого с ее позиций объяснения. В указанном случае это подтверждают данные

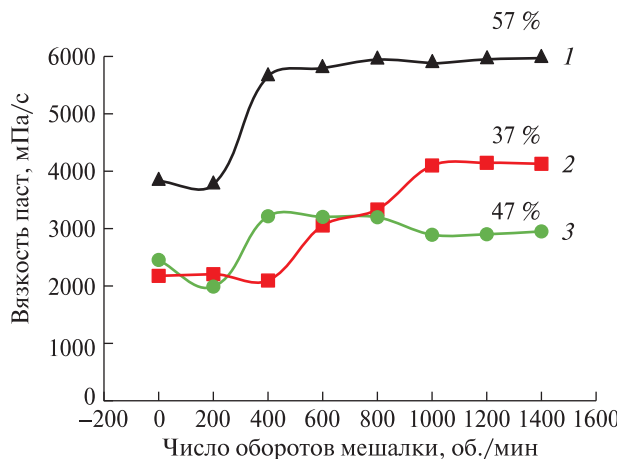


Рис. 2. Влияние величины механического воздействия на вязкость паст, приготовленных из образцов исходных почв: чернозема (1); дерново-подзолистой (2); серой лесной (3) (в процентах указано содержание воды в пастах)

Fig. 2. Effect of the magnitude of mechanical impact on the paste's viscosity prepared from samples of initial soils: chernozem (1); sod-podzolic (2); grey forest (3) (the percentage indicates the water content in the pastes)

лазерной дифрактометрии — размер частиц в пастах, обработанных при скорости 1200 об./мин, заметно возрастает по сравнению со скоростью 200 об./мин [32]. Кроме того, образующиеся фрагменты гелей взаимодействуют с достаточно крупными 100...150 мкм почвенными частицами пасты, увеличивая их размеры. Исходя из этого можно заключить, что вязкость почвенных паст определяется долей свободной воды, которая остается в пастах после набухания почвенных гелей. С точки зрения механизма значение полученных результатов заключается в том, что перемешивание паст приводит к разрушению, перегруппировке и самоорганизации в ней коллоидных частиц, являющихся строительными элементами, из которых строятся почвенные гели.

При рассмотрении практической составляющей полученных по реопексии результатов можно сделать вывод о том, что почвы могут функционировать как реопексные системы.

На следующем этапе исследования изучено влияние влажности воздушно-сухих почвенных образцов на реологические свойства полученных из них почвенных паст. Образцы увлажняли до влажности 37 % для дерново-подзолистой почвы и 57 % для чернозема, выдерживали во влажном состоянии в течение 14 дней, после чего готовили пасты с добавлением воды. Пасты перемешивали при скорости 200 и 1200 об./мин и определяли их вязкость.

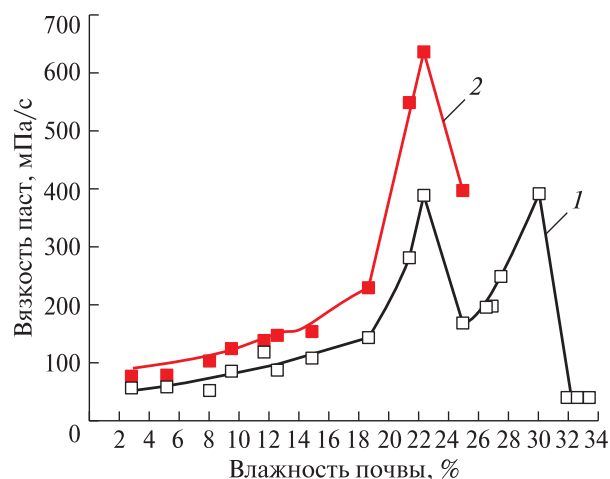


Рис. 3. Изменение вязкости паст с содержанием воды 37 %, приготовленных из образцов дерново-подзолистой почвы разных влажностей: 1 — обработка пасты 1 мин на мешалке при скорости 200 об./мин; 2 — обработка пасты 1 мин при скорости 1200 об./мин

Fig. 3. Variation of pastes viscosity with water content of 37 %, prepared from samples of sod-podzolic soil of different moisture contents: 1 — paste processing for 1 min on a stirrer at a speed of 200 rpm; 2 — paste processing for 1 min at a speed of 1200 rpm

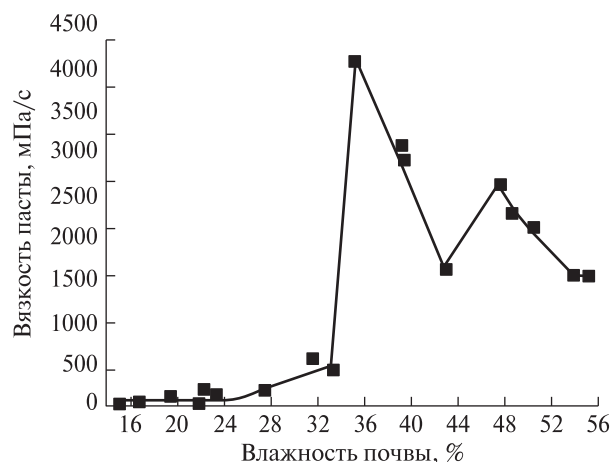


Рис. 4. Изменение вязкости паст с содержанием воды 57 %, приготовленных из образцов чернозема разной влажности

Fig. 4. Variation of pastes viscosity with water content of 57 %, prepared from samples of chernozem of different moisture content

Эксперименты показали, что вязкость всех исследованных почвенных паст имеет два ярко выраженных максимума: для дерново-подзолистой почвы — при влажности 22 и 31 %, для чернозема — при 34 и 48 % (рис. 3, 4). Усиление интенсивности перемешивания паст приводит

к увеличению их вязкости (реопексия), при этом максимумы сохраняются и становятся более выраженными. Эти экстремумы вязкости не связаны с прочностью частиц, поскольку измельчение частиц не влияет на их объем, а увеличение вязкости обусловлено ростом доли твердой фазы [17].

С точки зрения влияния гуминовых веществ на вязкость паст можно предположить, что наличие двух максимумов связано с различными структурными состояниями гуминовых веществ в растворах. Оно основано на существовании в растворах различных форм гуминовых веществ [33–35]: частиц-молекул, надмолекулярных образований, мицелл. Установлены значения критической концентрации, при которых происходит переход между этими структурными состояниями:

- критическая концентрация гуминовых веществ в растворе, выше которой происходит объединение частиц-молекул гуминовых веществ в Ф-кластеры, составляет порядка десятков миллиграммов на литр [35];

- критическая концентрация агрегации, выше которой гуминовые вещества находятся в растворе в виде агрегатов, т. е. надмолекулярных образований, составляет сотни миллиграммов на литр;

- критическая концентрация мицеллообразования, выше которой гуминовые вещества находятся в растворе в виде мицелл, составляет единицы граммов на литр [34].

Критические концентрации, приведенные выше, объясняются влиянием итоговых значений на состав гуминовых веществ, водородный показатель (pH) растворов, содержание в них многозарядных катионов и других примесей [34].

В почвах в интервале между влажностью разрыва капилляров и наименьшей влагоемкостью концентрация гуминовых веществ в пересчете на имеющуюся в почве воду составляет около 100 г/л. С позиции приведенных выше значений критической концентрации гуминовые вещества должны существовать в виде мицелл. Увеличение количества воды в почвах может влиять на состояние системы «вода — гуминовые вещества» в сторону разбавления и перехода от мицелл к надмолекулярным образованиям и далее к Ф-кластерам. Подобные изменения должны отражаться на размере почвенных частиц, покрытых органоминеральными гелями.

В целях проверки корректности данного объяснения на образцах чернозема в точках с влажностью, соответствующей максимуму и минимуму вязкости почвенных паст, с помощью лазерного дифрактометра был определен

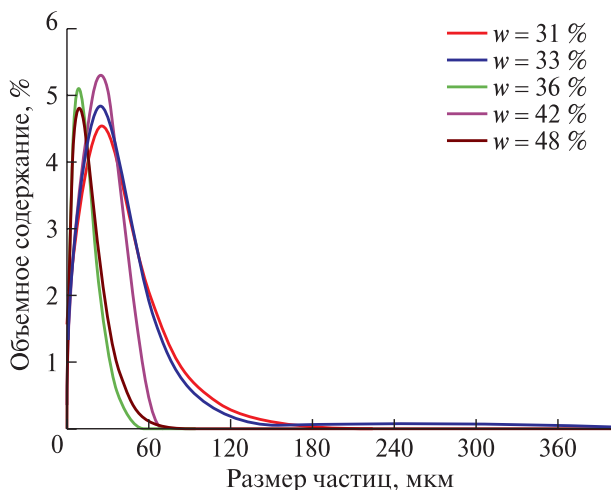


Рис. 5. Влияние влажности почв на распределение частиц по размеру в образцах чернозема

Fig. 5. Influence of soil moisture on particle size distribution in chernozem samples

размер органоминеральных частиц, приготовленных из образцов, взятых в точках экстремумов (рис. 5). Полученные данные показали, что в точках, соответствующих максимуму вязкости (36 и 48 %), размер органоминеральных частиц заметно меньше по сравнению с точками, соответствующими минимуму вязкости. Это свидетельствует о структурных перестройках, которые сопровождаются распадом и образованием новых органоминеральных частиц. Возникновение напряжения в веществах в результате избыточного поглощения воды хорошо известно и ведет к распаду таких образований до частиц меньших размеров с более равновесной структурой [36–39]. При влажности 31...33 % в черноземе имеются наиболее крупные среди изученных органоминеральных частиц (см. рис. 4). С ростом влажности почв до 36 % они распадаются и образуют частицы меньшего размера. Этот процесс сопровождается включением свободной воды и повышением вязкости паст. Дальнейшее увеличение влажности до 42 % ведет к набуханию этих частиц и увеличению их размера. Когда напряжение, вызванное набуханием, приводит к новому распаду частиц, они вновь собираются, однако их размер при этом уменьшается. Процесс нового объединения сопровождается включением в состав образующихся органоминеральных частиц кинетически свободной воды, что приводит к увеличению вязкости паст. Количество таких циклов ограничено, с одной стороны, количеством форм гуминовых веществ: мицелл — надмолекулярных образований — Ф-кластеров, с другой — избыток свободной воды может

сглаживать значения экстремумов вязкости, делая их достоверно неразличимыми.

Предлагаемое объяснение основано на включении кинетически свободной воды в состав почвенных гелей, что объясняет повышение вязкости паст в солевых растворах и явление реопексии, показанное в работе [32]. Однако точные границы критических концентраций гуминовых веществ пока остаются неясными. В связи с этим приведенный механизм имеет общий характер и нуждается в дальнейшем уточнении.

Выводы

1. При высушивании почв Ф-кластеры гуминовых веществ, являющиеся основой почвенных гелей, взаимопроникают один в другой, при этом прочность связей между ними возрастает и они включают в свой состав меньше воды.

2. При росте механических воздействий на почвенные пасты по достижении своего для каждой почвы предела происходит увеличение вязкости почвенных паст, называемое в коллоидной химии реопексией, возникающей вследствие роста размера частиц в почвенных пастах с включением в них кинетически свободной воды.

3. При изучении влияния влажности почвенных образцов на вязкость приготавливаемых из них паст для всех изученных образцов почв установлено существование двух скачков вязкости паст, один из которых близок к влажности разрыва капилляров, а второй — к наименьшей влагоемкости.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 22-14-00107.

Список литературы

- [1] Шеин Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во МГУ, 2005. 430 с.
- [2] Николаева И.В., Початкова Т.Н., Манучаров А.С. Влияние азотных удобрений и известкования на реологические свойства дерново-подзолистых почв // Вестник Алтайского государственного аграрного университета, 2008. № 2. С. 31–35.
- [3] Kong L., Kong L.W., Wang M., Guo A.G., Wang Y. Effect of drying environment on engineering properties of an expansive soil and its microstructure // J. of Mountain Science, 2017, v. 14, pp. 1194–1201.
- [4] Tang C.S., Cui Y.J., Shi B., Tang A.M., Liu C. Desiccation and cracking behaviour of clay layer from slurry state under wetting–drying cycles // Geoderma, 2011, v. 166, no. 1, pp. 111–118.
- [5] Тюлин А.Ф. Органоминеральные коллоиды в почве, их генезис и значение для корневого питания высших растений. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 52 с.

- [6] Федотов Г.Н., Шеин Е.В., Ушкова Д.А. Салимгареева О.А., Горепекин И.В., Потапов Д.И. Надмолекулярные образования из молекул гуминовых веществ и их фрактальная организация // Почвоведение, 2023. № 8. С. 903–910.
- [7] Lehmann P., Leshchinsky B., Gupta S., Mirus B.B., Bickel S., Lu N., Or D. Clays are not created equal: How clay mineral type affects soil parameterization // *Geophysical Research Letters*, 2021, t. 48, no. 20, p. e2021GL095311.
- [8] Cronan C.S., Cronan C.S. Mineral Weathering // *Ecosystem Biogeochemistry: Element Cycling in the Forest Landscape*, 2018, pp. 87–100.
- [9] Di Iorio E., Circelli L., Angelico R., Torrent J., Tan W., Colombo C. Environmental implications of interaction between humic substances and iron oxide nanoparticles: A review // *Chemosphere*, 2022, v. 303, p. 135172.
- [10] Kurochkina G.N. The effect of humic acid adsorption on the coagulation stability of soil suspensions // *Eurasian Soil Science*, 2020, v. 53, pp. 62–72.
- [11] Philippe A., Schaumann G.E. Interactions of dissolved organic matter with natural and engineered inorganic colloids: a review // *Environmental science & technology*, 2014, v. 48, no. 16, pp. 8946–8962.
- [12] Xu Z., Niu Z., Pan D., Zhao X., Wei X., Li X., Wu W. Mechanisms of bentonite colloid aggregation, retention, and release in saturated porous media: role of counter ions and humic acid // *Science of The Total Environment*, 2021, v. 793, p. 148545.
- [13] Angelico R., Colombo C., Di Iorio E., Brtnický M., Fojt J., Conte P. Humic substances: from supramolecular aggregation to fractal conformation – Is there time for a new paradigm? // *Applied Sciences*, 2023, v. 13, no. 4, p. 2236.
- [14] Osterberg R., Mortensen K. Fractal dimension of humic acids. A small angle neutron scattering study // *European Biophysics J.*, 1992, v. 21(3), pp. 163–167.
- [15] Wilkinson K.J., Senesi N. Biophysical Chemistry of Fractal Structures and Processes in Environmental Systems. John Wiley & Sons, 2008, 323 p.
- [16] Милановский Е.Ю. Гумусовые вещества почв как природные гидрофобно-гидрофильные соединения. М.: ГЕОС, 2009. 186 с.
- [17] Шоба С.А., Потапов Д.И., Горепекин И.В., Ушкова Д.А., Грачева Т.А., Федотов Г.Н. Состояние почвенных гелей при разной пробоподготовке к вискозиметрии образцов дерново-подзолистой почвы // Доклады Российской академии наук. Науки о жизни, 2022. Т. 504. С. 240–244.
- [18] Kaiser M., Kleber M., Berhe A.A. How air-drying and rewetting modify soil organic matter characteristics: an assessment to improve data interpretation and inference // *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, v. 80, pp. 324–340.
- [19] Estabragh A.R., Parsaei B., Javadi A.A. Laboratory investigation of the effect of cyclic wetting and drying on the behaviour of an expansive soil // *Soils and foundations*, 2015, v. 55, no. 2, pp. 304–314.
- [20] Аbruкова Л.П. Кинетика процессов тиксотропного структурообразования в почвенных суспензиях // Почвоведение, 1970. № 3. С. 104–114.
- [21] Горькова И.М. Физико-химические исследования дисперсных осадочных пород в строительных целях. М.: Стройиздат, 1975. 151 с.
- [22] Манучаров А.С. К использованию реологических исследований в почвоведении // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение, 1983. № 3. С. 40–56.
- [23] Baumgarten W. Soil microstructural stability as influenced by physicochemical parameters and its environmental relevance on multiple scales. Habilitation thesis, Kiel University, 2013, 263 p.
- [24] Lal R. Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality and sustainability // *Soil Tillage Res.*, 1993, v. 27, pp. 1–8.
- [25] Хайдапова Д.Д., Мищенко А.В., Карпова Д.В. Реологические свойства почв как одна из характеристик физической среды обитания растений // *Агрофизика*, 2022. № 1. С. 17–21.
- [26] Честнова В.В. Реологические свойства черноземов типичных курской области: взаимосвязь с физическими свойствами и основной гидрофизической характеристикой: дис. ... канд. биол. наук. М.: МГУ, 2017. 116 с.
- [27] Методическое руководство по изучению почвенной структуры / под ред. И.Б. Ревута, А.А. Роде. Л.: Колос, 1969. 528 с.
- [28] Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. М.: Химия, 1982. 463 с.
- [29] Kawahigashi M., Sumida H., Yamamoto K. Size and shape of soil humic acids estimated by viscosity and molecular weight // *J. of colloid and interface science*, 2005, v. 284, no. 2, pp. 463–469.
- [30] Умарова А.Б., Бутылкина М.А., Сусленкова М.М., Александрова М.С., Ежелев З.С., Хмелева М.В., Шхапацев А.К., Гасина А.И. Агрегатная структура естественных и пахотных почв разного генезиса: морфологические и реологические характеристики // Почвоведение, 2021. Т. 55. № 9. С. 1019–1032.
- [31] Galicia-Andrés E., Oostenbrink C., Gerzabek M.H., Tunega D. On the adsorption mechanism of humic substances on kaolinite and their microscopic structure // *Minerals*, 2021, v. 11, no. 10, p. 1138.
- [32] Fedotov G.N., Shoba S.A., Ushkova D.A., Gorepekin I.V., Sukharev A.I., Potapov D.I. Three-Phase and Gel Models of Soils in the Analysis of Experimental Results // *Doklady Earth Sciences*, 2024, v. 515, pp. 453–457.
- [33] Линкевич Е.В., Юдина Н.В., Савельева А.В. Формирование гуминовых коллоидов в зависимости от pH среды водных растворов // Журнал физической химии, 2020. Т. 94. № 4. С. 568–573.
- [34] Тарасевич Ю.И., Доленко С.А., Трифонова М.Ю., Алексеенко Е.Ю. Ассоциация и коллоидно-химические свойства гуминовых кислот в водных растворах // Коллоидный журнал, 2013. Т. 75. № 2. С. 230–236.
- [35] Fasurová N., Cechlovská H., Kucerik J. A comparative study of South Moravian lignite and standard IHSS humic acids, optical and colloidal properties // *Petroleum & coal*, 2006, v. 48, no. 2, pp. 24–32.
- [36] Волкова Н.Н., Джардималиева Г.И., Крисюк Б.Э., Чуканов Н.В., Шершнев В.А., Шилов Г.В. Механохимическое разрушение кристаллогидратов ацетилендикарбоксилатов кобальта и цинка при дегидратации // Известия Академии наук. Серия химическая, 2016. № 8. С. 2025–2033.
- [37] Мифтахова Н.Ш., Петрова Т.П. Рахматуллина И.Ф. Кристаллы. Кристаллогидраты. Казань: Изд-во Казанского государственного технологического университета, 2006. 24 с.
- [38] Спецов Е.А., Александрова Ю.В., Мальцева Н.В., Власов Е.А. Исследование влияния механохимического активирования на свойства гиббсита // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета), 2013. № 18 (44). С. 008–010.
- [39] Chen X., Wu Q., Gao J., Tang Y. Hydration characteristics and mechanism analysis of β -calcium sulfate hemihydrate // *Construction and Building Materials*, 2021, v. 296, p. 123714.

Сведения об авторах

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

Тарасенко Дарья Александровна — студент, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», ushkova_dasha@mail.ru

Горепекин Иван Владимирович — канд. биол. наук, науч. сотр. факультета почвоведения МГУ, науч. сотр. Евразийского центра по продовольственной безопасности МГУ, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», decembrist96@yandex.ru

Батырев Юрий Павлович — канд. техн. наук, доцент, ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), batyrev@bmstu.ru

Поступила в редакцию 17.10.2024.

Одобрено после рецензирования 21.11.2024.

Принята к публикации 26.05.2025.

CHANGE IN PASTE VISCOSITY DEPENDING ON WATER CONTENT AND INITIAL MOISTURE CONTENT OF SOIL SAMPLES

G.N. Fedotov¹✉, D.A. Tarasenko¹, I.V. Gorepekin^{1, 2}, Yu.P. Batyrev³

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

²Eurasian Center for Food Security of Lomonosov Moscow State University, GSP-1, 1, p. 12, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia

³BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

gennadiy.fedotov@gmail.com

The effect of soil drying and the humidity to which soil samples were moistened, as well as the mechanical effect of pastes on their viscosity, was studied. The purpose of the study was to explain the observed phenomena from the standpoint of physical and gel models of soils. The studies were carried out on samples taken from humus-accumulative horizons of chernozem, sod-podzolic and gray forest soils. The viscosity of the soil pastes was determined by using a vibrating viscometer, and a laser diffractometer was used to study the size of the soil particles in the pastes. It has been established that with an increase in the magnitude of mechanical effects on soil pastes, upon reaching its limit for each soil, an increase in the viscosity of soil pastes occurs, called rheopexy in colloidal chemistry. It has been shown that rheopexy is characterized by an increase in the particle size in soil pastes. It was found that the moisture content of the soil sample before the preparation of the paste affects the viscosity of pastes in a complex way: for the studied soil samples, two maximum viscosities of pastes are observed. One of them is close to the soil hydrological moisture constant of capillary rupture, and the second is close to the lowest moisture capacity.

Keywords: reopexy of soil pastes, particle size in soil pastes, point of limited availability of water, lowest moisture capacity

Suggested citation: Fedotov G.N., Tarasenko D.A., Gorepekin I.V., Batyrev Yu.P. *Izmenenie vyazkosti past v zavisimosti ot sodержaniya v nikh vody i iskhodnoy vlazhnosti pochvennykh obraztsov* [Change in paste viscosity depending on water content and initial moisture content of soil samples]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 4, pp. 94–103. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-94-103

References

- [1] Shein E.V. *Kurs fiziki pochv* [Course in Soil Physics]. Moscow: Moscow University Press, 2005, 430 p.
- [2] Nikolaeva I.V., Pochatkova T.N., Manucharov A.S. *Vliyanie azotnykh udobreniy i izvestkovaniya na reologicheskie svoystva dernovo-podzolistykh pochv* [Effect of Nitrogen Fertilizers and Liming on the Rheological Properties of Sod-Podzolic Soils]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Altai State Agrarian University], 2008, no. 2, pp. 31–35.

- [3] Kong L., Kong L.W., Wang M., Guo A.G., Wang Y. Effect of drying environment on engineering properties of an expansive soil and its microstructure. *J. of Mountain Science*, 2017, v. 14, pp. 1194–1201.
- [4] Tang C.S., Cui Y.J., Shi B., Tang A.M., Liu C. Desiccation and cracking behaviour of clay layer from slurry state under wetting–drying cycles // *Geoderma*, 2011, v. 166, no. 1, pp. 111–118.
- [5] Tyulin A.F. Organomineral'nye kolloidy v pochve, ikh genesis i znachenie dlya korneвого pitaniya vysshikh rasteniy [Organomineral colloids in soil, their genesis and significance for root nutrition of higher plants]. Moscow: AN SSSR [USSR Academy of Sciences], 1958, 52 p.
- [6] Fedotov G.N., Shein E.V., Ushkova D.A., Salimgareeva O.A., Gorepekin I.V., Potapov D.I. *Nadmolekulyarnye obrazovaniya iz molekul guminovykh veshchestv i ikh fraktal'naya organizatsiya* [Supramolecular formations from humic substance molecules and their fractal organization]. *Pochvovedenie* [Soil Science], 2023, no. 8, pp. 903–910.
- [7] Lehmann P., Leshchinsky B., Gupta S., Mirus B.B., Bickel S., Lu N., Or D. Clays are not created equal: How clay mineral type affects soil parameterization. *Geophysical Research Letters*, 2021, t. 48, no. 20, p. e2021GL095311.
- [8] Cronan C.S., Cronan C.S. Mineral Weathering // *Ecosystem Biogeochemistry: Element Cycling in the Forest Landscape*, 2018, pp. 87–100.
- [9] Di Iorio E., Circelli L., Angelico R., Torrent J., Tan W., Colombo C. Environmental implications of interaction between humic substances and iron oxide nanoparticles: A review // *Chemosphere*, 2022, v. 303, p. 135172.
- [10] Kurochkina G.N. The effect of humic acid adsorption on the coagulation stability of soil suspensions // *Eurasian Soil Science*, 2020, v. 53, pp. 62–72.
- [11] Philippe A., Schaumann G.E. Interactions of dissolved organic matter with natural and engineered inorganic colloids: a review // *Environmental science & technology*, 2014, v. 48, no. 16, pp. 8946–8962.
- [12] Xu Z., Niu Z., Pan D., Zhao X., Wei X., Li X., Wu W. Mechanisms of bentonite colloid aggregation, retention, and release in saturated porous media: role of counter ions and humic acid // *Science of The Total Environment*, 2021, v. 793, p. 148545.
- [13] Angelico R., Colombo C., Di Iorio E., Brtnický M., Fojt J., Conte P. Humic substances: from supramolecular aggregation to fractal conformation – Is there time for a new paradigm? // *Applied Sciences*, 2023, v. 13, no. 4, p. 2236.
- [14] Osterberg R., Mortensen K. Fractal dimension of humic acids. A small angle neutron scattering study // *European Biophysics J.*, 1992, v. 21(3), pp. 163–167.
- [15] Wilkinson K.J., Senesi N. *Biophysical Chemistry of Fractal Structures and Processes in Environmental Systems*. John-Wiley & Sons, 2008, 323 p.
- [16] Milanovskiy E.Yu. *Gumusovye veshchestva pochv kak prirodnye gidrofobno-gidrofil'nye soedineniya* [Humic substances of soils as natural hydrophobic-hydrophilic compounds]. Moscow: GEOS, 2009, 186 p.
- [17] Shoba S.A., Potapov D.I., Gorepekin I.V., Ushkova D.A., Gracheva T.A., Fedotov G.N. *Sostoyaniye pochvennykh geley pri raznoy probopodgotovke k viskozimetrii obraztsov dervno-podzolistoy pochvy* [The state of soil gels with different sample preparation for viscometry of sod-podzolic soil samples]. *Doklady Rossiyskoy akademii nauk. Nauki o zhizni* [Reports of the Russian Academy of Sciences. Life Sciences], 2022, v. 504, pp. 240–244.
- [18] Kaiser M., Kleber M., Berhe A.A. How air-drying and rewetting modify soil organic matter characteristics: an assessment to improve data interpretation and inference. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, v. 80, pp. 324–340.
- [19] Estabragh A.R., Parsaei B., Javadi A.A. Laboratory investigation of the effect of cyclic wetting and drying on the behaviour of an expansive soil // *Soils and foundations*, 2015, v. 55, no. 2, pp. 304–314.
- [20] Abrukova L.P. *Kinetika protsessov tikotropnogo strukturoobrazovaniya v pochvennykh suspenziyakh* [Kinetics of thixotropic structure formation processes in soil suspensions]. *Pochvovedenie* [Soil Science], 1970, no. 3, pp. 104–114.
- [21] Gor'kova I.M. *Fiziko-khimicheskie issledovaniya dispersnykh osadochnykh porod v stroitel'nykh tselyakh* [Physico-chemical studies of dispersed sedimentary rocks for construction purposes]. Moscow: Stroyizdat, 1975, 151 p.
- [22] Manucharov A.S. *K ispol'zovaniyu reologicheskikh issledovaniy v pochvovedenii* [On the use of rheological studies in soil science]. *Vestnik Moskovskogo un-ta. Ser. 17. Pochvovedenie* [Bulletin of the Moscow University. Series 17. Soil Science], 1983, no. 3, pp. 40–56.
- [23] Baumgarten W. Soil microstructural stability as influenced by physicochemical parameters and its environmental relevance on multiple scales. *Habilitation thesis*, Kiel University, 2013, 263 p.
- [24] Lal R. Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality and sustainability // *Soil Tillage Res.*, 1993, v. 27, pp. 1–8.
- [25] Khaydapova D.D., Mishchenko A.V., Karpova D.V. *Reologicheskie svoystva pochv kak odna iz kharakteristik fizicheskoy sredy obitaniya rasteniy* [Rheological properties of soils as one of the characteristics of the physical habitat of plants]. *Agrofizika* [Agrophysics], 2022, no. 1, pp. 17–21.
- [26] Chestnova V.V. *Reologicheskie svoystva chernozemov tipichnykh kurskoy oblasti: vzaimosvyaz' s fizicheskimi svoystvami i osnovnoy gidrofizicheskoy kharakteristikoy* [Rheological properties of typical chernozems in the Kursk region: relationship with physical properties and basic hydrophysical characteristics]. *Dis. Cand. Sci. (Biol.)*. Moscow: Moscow State University, 2017, 116 p.
- [27] *Metodicheskoe rukovodstvo po izucheniyu pochvennoy struktury* [Methodological guide to the study of soil structure]. Ed. I.B. Revuta, A.A. Rode. Leningrad: Kolos, 1969, 528 p.
- [28] Frolov Yu.G. *Kurs kolloidnoy khimii* [Colloid chemistry course]. Moscow: Khimiya, 1982, 463 p.
- [29] Kawahigashi M., Sumida H., Yamamoto K. Size and shape of soil humic acids estimated by viscosity and molecular weight // *J. of colloid and interface science*, 2005, v. 284, no. 2, pp. 463–469.
- [30] Umarova A.B., Butylkina M.A., Suslenkova M.M., Aleksandrova M.S., Ezhelev Z.S., Khmeleva M.V., Shkhatpatsev A.K., Gasina A.I. *Agregatnaya struktura estestvennykh i pakhotnykh pochv raznogo genezisa: morfologicheskie i reologicheskie kharakteristiki* [Aggregate structure of natural and arable soils of different genesis: morphological and rheological characteristics]. *Pochvovedenie* [Soil Science], 2021, v. 55, no. 9, pp. 1019–1032.

- [31] Galicia-Andrés E., Oostenbrink C., Gerzabek M.H., Tunega D. On the adsorption mechanism of humic substances on kaolinite and their microscopic structure // *Minerals*, 2021, v. 11, no. 10, p. 1138.
- [32] Fedotov G.N., Shoba S.A., Ushkova D.A., Gorepekin I.V., Sukharev A.I., Potapov D.I. Three-Phase and Gel Models of Soils in the Analysis of Experimental Results // *Doklady Earth Sciences*, 2024, v. 515, pp. 453–457.
- [33] Linkevich E.V., Yudina N.V., Savel'eva A.V. *Formirovanie guminovykh kolloidov v zavisimosti ot rN sredy vodnykh rastvorov* [Formation of humic colloids depending on the pH of aqueous solutions]. *Zhurnal fizicheskoy khimii* [J. of Physical Chemistry], 2020, v. 94, no. 4, pp. 568–573.
- [34] Tarasevich Yu.I., Dolenko S.A., Trifonova M.Yu., Alekseenko E.Yu. *Assotsiatsiya i kolloidno-khimicheskie svoystva guminovykh kislot v vodnykh rastvorakh* [Association and colloid-chemical properties of humic acids in aqueous solutions]. *Kolloidnyy zhurnal* [Colloid Journal], 2013, v. 75, no. 2, pp. 230–236.
- [35] Fasurová N., Cechlovská H., Kucerik J. A comparative study of South Moravian lignite and standard IHSS humic acids, optical and colloidal properties // *Petroleum & coal*, 2006, v. 48, no. 2, pp. 24–32.
- [36] Volkova N.N., Dzhardimalieva G.I., Krisyuk B.E., Chukanov N.V., Shershnev V.A., Shilov G.V. *Mekhanokhimicheskoe razrushenie kristallogidratov atsetilendikarboksilatov kobal'ta i tsinka pri degidratatsii* [Mechanochemical destruction of crystalline hydrates of cobalt and zinc acetylenedicarboxylates during dehydration]. *Izvestiya Akademii nauk. Seriya khimicheskaya* [Bulletin of the Academy of Sciences. Chemical Series], 2016, no. 8, pp. 2025–2033.
- [37] Miftakhova N.Sh., Petrova T.P., Rakhmatullina I.F. *Kristally. Kristallogidraty* [Crystals. Crystal hydrates]. Kazan: Kazan State Technological University, 2006, 24 p.
- [38] Spetsov E.A., Aleksandrova Yu.V., Mal'tseva N.V., Vlasov E.A. *Issledovanie vliyaniya mekhanokhimicheskogo aktivirovaniya na svoystva gibbsita* [Study of the influence of mechanochemical activation on the properties of gibbsite]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta)* [Bulletin of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)], 2013, no. 18 (44), pp. 008–010.
- [39] Chen X., Wu Q., Gao J., Tang Y. Hydration characteristics and mechanism analysis of β -calcium sulfate hemihydrate // *Construction and Building Materials*, 2021, v. 296, p. 123714.

The work was carried out within the framework of the RNF project No. 22-14-00107.

Authors' information

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

Tarasenko Dar'ya Aleksandrovna — Engineer of the Faculty of Soil Science of Lomonosov Moscow State University, ushkova_dasha@mail.ru

Gorepekin Ivan Vladimirovich — Cand. Sci. (Biology), Researcher of the Eurasian Center for Food Security of Lomonosov Moscow State University, Researcher of the Faculty of Soil Science of Lomonosov Moscow State University, decembrist96@yandex.ru

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

Received 17.10.2024.

Approved after review 21.11.2024.

Accepted for publication 26.05.2025.

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

ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИКОНДЕНСАЦИОННЫХ СОПОЛИИМИДОВ

А.Н. Иванкин✉, А.Н. Зарубина, А.С. Кулезнев

ФГАОУ 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@inbox.ru

Описана методология получения термостойких органорастворимых и термоплавких сополиимидов для последующего использования в качестве укрепляющих связующих компонентов в технологии получения композиционных материалов на основе целлюлозосодержащих компонентов древесного происхождения. Показано, что в качестве сырья для получения сополиимидов в составе композиционных материалов возможно использование 3,6-диаминоакридина; 9,9-бис-(*p*-аминофенил)флуорена, диангидрида 2,2-бис-(3,4-дикарбоксифенил)-1,1,1,3,3,3-гексафторпропана и диангидрида 3,3',4,4'-тетракарбоксидифенилоксида. Представлена оптимальная методика синтеза сополиимидов различного состава с молекулярной массой 20...180 кДа. Показано, что для получения древесно-полимерных композитов с удовлетворительными свойствами в матрицу полученных сополиимидов целесообразно вносить древесную пыль с частицами средним диаметром 0,5...1,1 мм с последующим получением целевого продукта в виде пленок, которые можно формировать методом полива из раствора. Определена растворимость полученных полимерных материалов в тетрагидрофуране, циклогексаноне, хлороформе, дихлорэтано, тетрагидроэтано, диметилформамиде, диметилацетамиде, диметилсульфоксиде, толуоле, нитрометане и ацетонитриле. Физико-механические испытания показали, что величина разрушающего напряжения при растяжении полученных пленок находилась в пределах от 140 МПа для пленки толщиной 0,2 мм до 210 МПа для пленки толщиной 0,5 мм, а относительное удлинение при разрыве составляло 5...36 %. Термомеханические испытания показали достаточно высокую термостойкость полученных сополиимидов и композитов на их основе. Установлено, что рабочий температурный интервал полученных продуктов без нарушений формы и внутренней структуры материала сохранялся до температуры 300...320 °С. Синтезированные сополимеры и композиты на их основе могут быть использованы в качестве термо-теплостойких материалов.

Ключевые слова: сополиимиды, термостойкие полимеры, композиционные материалы

Ссылка для цитирования: Иванкин А.Н., Зарубина А.Н., Кулезнев А.С. Древесно-полимерные композиты на основе поликонденсационных сополиимидов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 4. С. 104–113. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-104-113

Древесно-полимерные композиты в настоящее время являются одним из наиболее перспективных классов современных материалов, отличающихся экономичностью производства, технологичностью переработки, а также высокими эксплуатационными характеристиками с широким диапазоном применения [1].

Распространение технологий получения древесно-полимерных композитов связано в первую очередь с перспективами деревянного домостроения, для которого необходимы экологичные материалы, не требующие дополнительной обработки и имеющие более длительный срок службы, чем древесина. При использовании таких материалов решается задача сохранения леса от вырубки за счет более

эффективного использования древесных отходов и получения продукта, который минимизирует вред окружающей среде [2].

Современные технологии получения древесно-полимерных композитов постепенно вытесняют деловую древесину даже в уличном строительстве, а относительная дешевизна таких материалов позволяет, например, изготавливать из них сваи и опоры для причалов и пирсов, находящихся в агрессивной морской воде. Распространение технологий получения древесно-полимерных композитов в значительной степени связано с развитием экструзионных и экстрактивных технологий переработки синтетических полимеров, позволяющих формировать продукт с равномерно диспергированным наполнителем в связующей полимерной матрице [3, 4].

Фактически древесно-полимерные композиты представляют собой материал, в котором

измельченные компоненты древесины диспергированы в полимерном связующем. Свойства такого материала во многом зависят от полимерной матрицы. Относительно дешевые первоначально используемые полимеры типа фенол- или мочевиноформальдегидные смолы по многим характеристикам не удовлетворяют современным требованиям, предъявляемым в частности к экологичности материалов. В настоящее время успехи химии высокомолекулярных соединений дают возможность получать новые полимеры, которые можно использовать в качестве связующих древесных отходов. В качестве таких перспективных материалов можно рассматривать растворимые и термопластичные сополиимиды [5–7].

Термопласты — важный класс полимеров, используемых для создания композитных материалов, поскольку технологии переработки экструзией или литьем под давлением позволяют создавать детали сложной формы из рецептур с диспергированным наполнителем в условиях минимальной обработки при реализации конструктивных задач [8, 9].

Полиимиды как гетероциклические термопластичные высокомолекулярные соединения, относятся к сверхтермостойким полимерам, поэтому их применение в составе древесно-полимерных композитов может существенно расширить температурный интервал эксплуатации целлюлозосодержащих компонентов. Благодаря своим эксплуатационным характеристикам, термопластичные полиимиды являются наиболее перспективными термопластами для различного рода композитов. В сравнении с уже имеющимися крупнотоннажными промышленными полимерами типа полистирола они обладают повышенными показателями термостойкости, улучшенными механическими свойствами, сохраняющимися даже при высоких температурах, а также высокой устойчивостью к воздействию агрессивных сред, в том числе кислот, щелочей, а также воздействию излучений [10–12].

Полиимиды можно рассматривать как достаточно термостойкие полимеры, которые имеют термореактивную полимерную матрицу с очень низкой ползучестью и высокой прочностью на растяжение, причем эти базовые свойства сохраняются при длительном использовании при температурах до 230...250 °С, а при кратковременных температурных воздействиях могут сохраняться даже при 500...700 °С. Такие температуры не достижимы при использовании обычных древесных материалов.

К полиимидам относятся полимерные соединения, имеющие имидные циклы. Моле-

кулярные цепи полиимидов кроме имидных звеньев содержат также ароматические ядра, связанные гетероатомом или атомом углерода, что в ряде случаев придает уникальность их физико-химическим свойствам. Синтез и исследование новых полиимидов представляют повышенный интерес, в частности, особое внимание привлекает синтез сополиимидов, поскольку нерегулярность строения полимерной цепи, придающая полимеру аморфное строение, присутствие полярных ответвлений и наличие подвижных шарнирных групп в строении мономеров, например простой эфирной связи или кето-группы, повышают растворимость полиимида, а также снижают рабочие температуры переработки, что по сравнению с жесткоцепными полиимидами может существенно уменьшить затраты на получение материалов на основе таких сополимеров. Это становится существенным преимуществом при их производстве в промышленном масштабе [13–15].

Важной проблемой использования полиимидов для получения высокодисперсных композиционных материалов является их перерабатываемость в изделия из раствора или расплава, так как рассматриваемые соединения относятся к полимерам с высокой жесткостью цепи и сильными межмолекулярными взаимодействиями полярных групп [16–19].

Известно, что для осуществления эффективной переработки полимерных систем молекулярная масса составляющего полимера не может быть слишком высокой, а для сохранения базовых свойств полимера не должно происходить серьезного снижения молекулярной массы при переработке. В связи с этим актуальной задачей в области получения современных композитов является создание легкоперерабатываемых полиимидов. Такие полиимиды должны обладать хорошей растворимостью в органических растворителях, относительно небольшой температурой плавления, а также термической устойчивостью при длительном нагревании [20, 21].

В настоящее время известно несколько торговых марок промышленных полиимидов, в частности, Ultem, Kapton, P84 и некоторые другие. Из этих промышленных полиимидов изготавливают высокопрочные и термостойкие пленки, волокна, электроизоляцию, конструкционные детали и фильтрационные мембраны [22–26].

Свойств выпускаемых промышленных полиимидов недостаточно для получения специальных полимерных материалов. Поэтому повышенный интерес вызывают сополиимиды с нерегулярным статистическим распределением звеньев различной химической природы,

поскольку нерегулярность строения полимерной цепи придает сополимеру аморфное строение, а присутствие полярных ответвлений и наличие подвижных шарнирных групп в строении исходных мономеров, например простой эфирной связи или кетонных групп, повышают растворимость полимерного продукта, а также снижают рабочие значения температуры переработки, что по сравнению с классическими жесткоцепными полиимидами может существенно уменьшить затраты на получение материалов на основе полиимидов с улучшенными свойствами [27, 28].

Отметим, что наличие молекулярных, так называемых «шарнирных» групп, только в диангидридном фрагменте в структуре сополиимида может лишь несколько повысить эластичность полимера, слабо влияя на жесткость и хрупкость, а введение «молекулярных шарниров» только в диаминные фрагменты позволяет получать прочные и эластичные пленки, у которых отсутствует определенный интервал температуры размягчения. В связи с этим для получения легкоперерабатываемых полиимидов целесообразно применять различные мономеры, содержащие в себе «шарнирные» группы и в диангидриде, и в диамине, что может существенно увеличить гибкость молекулярной цепи, которая оказывает влияние на растворимость и прочность полимера. Используя различные диангидриды и диамины и получая таким образом сополиимиды, можно в большей степени влиять на показатели растворимости, прочности и другие физико-химические свойства полиимидов, а также получать материалы с более низкой плотностью.

Последние исследования показывают, что перспективными являются сополиимиды, имеющие в своем строении большое количество шарнирных групп или имеющие «подвески» на ароматических ядрах, которые при наличии реакционноспособных групп могут подвергаться модификации для повышения растворимости и последующего использования при упрочнении каркасных композитов. Синтез таких полиимидов представляет определенный интерес [29].

Цель работы

Цель работы — разработка методологии получения термостойких органорастворимых и термопластичных сополиимидов для последующего использования в качестве укрепляющих связующих компонентов в технологии получения композиционных материалов на основе целлюлозосодержащих компонентов древесного происхождения.

Материалы и методы

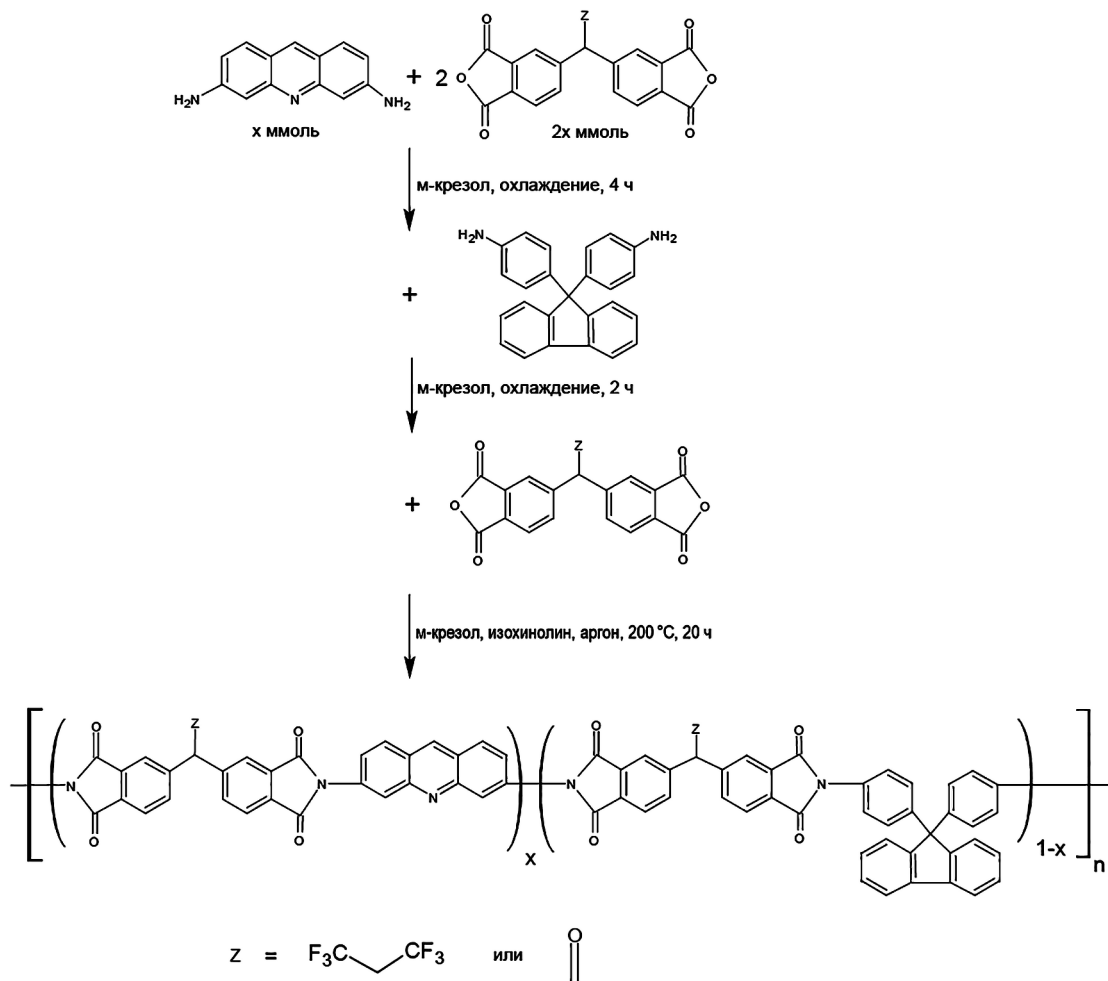
В качестве реактивов использовали следующие соединения: 3,6-диаминоакридин (акридин); 9,9-бис-(*n*-аминофенил)флуорен (FDPA); диангидрид 2,2-бис-(3,4-дикарбоксифенил)-1,1,1,3,3,3-гексафторпропана (6FDA); диангидрид 3,3',4,4'-тетракарбоксидифенилоксида (BTDA) м-крезол; изохинолин; N-метил-2-пирролидон; N,N-диметилформамид; N,N-диметилацетамид; диметилсульфоксид; хлороформ; циклогексанон; тетрагидрофуран; дихлорэтан; 1,1,2,2-тетрахлорэтан; толуол; нитрометан; ацетонитрил квалификации ч.д.а. производства компаний Merck и Serva (Germany).

Синтез полиамидокислот проводили в инертной атмосфере при пониженной температуре в различных органических растворителях, поскольку при нормальной и более высокой температуре полиамидокислоты нестабильны, а процесс дальнейшей циклизации проводили при повышенной температуре в течение нескольких часов.

Сополиимиды в виде сополимеров (СПЛ) были синтезированы поликонденсацией двух диаминов: акридина и FDPA с диангидридом 6FDA или BTDA (рисунок).

Молярное количество диангидрида 6FDA (или BTDA) поддерживали постоянным, а количества двух диаминов акридина и FDPA варьировали, сохраняя при этом общее молярное число двух диаминов равным количеству диангидрида. Сополиимиды, полученные из различных сомономеров, были названы как AFFx (сополиимиды акридин-FDPA-6FDA) и AFBx (сополиимиды акридин-FBPA-BTDA), где x (x = 0; 1; 3; 5; 10; 15 и 20) — молярный процент содержания акридина от суммы количества двух диаминов.

Например, сополимер СПИ-5 марки AFF5 синтезировали в трехгорлой колбе вместимостью 50 мл, оснащенной магнитной мешалкой, термометром и трубкой для подачи аргона. Вводили акридин в количестве 10,5 мг (0,05 ммоль) и 2 мл м-крезола. После полного растворения диаминов добавляли 44,4 мг (0,10 ммоль) 6FDA. Реакционную смесь перемешивали в течение 4 ч при комнатной температуре. Затем добавляли 330,8 мг (0,95 ммоль) FDPA и реакционную смесь перемешивали еще 2 ч. Наконец, загружали 6FDA в количестве 399,8 мг (0,90 ммоль), добавляли 4 мл м-крезола и 0,2 мл изохинолина. Реакционную смесь перемешивали, нагревали до 200 °С и продували слабым током аргона в течение примерно 20 ч, затем постепенно (в течение 1 ч) охлаждали до ком-



Общая схема процесса получения сополиимида
General process scheme for obtaining copolyimide

натной температуры. Во время охлаждения смесь разбавляли м-крезолом для сохранения реакционной смеси в приемлемом текучем состоянии. Полимерный продукт выделяли путем осаждения, добавляя 300 мл метанола. Осадок отфильтровывали и подвергали экстрагированию метанолом в экстракционном аппарате Сокслета в течение 24 ч. После сушки в вакууме при температуре 80 °C в течение 4 ч и при температуре 260 °C в течение 6 ч, сополиимид СПИ-5 был получен в виде серого порошка с выходом 93,5 %.

Другие сополиимиды AFFx и AFBx с индексами $x = 0; 1; 3; 5; 10; 15$ и 20 (табл. 1) были получены по методике, описанной для получения сополиимида СПИ-5, путем изменения молярных соотношений акридина с FDPA от 1:99 до 20:80. Выход продукта по реакции поликонденсации составлял 90...95 %. С увеличением содержания акридина в полиимидах цвет продуктов изменялся от бело-серого до коричневого.

Растворимость полученных сополиимидов изучали в среде N-метил-2-пирролидона, N,N-диметилформамида, N,N-диметилацетамида, диметилсульфоксида, хлороформа, циклогексанона, тетрагидрофурана, дихлорэтана, 1,1,2,2-тетрахлорэтана, толуола, нитрометана и ацетонитрила.

Пленки из сополиимидов получали поливом из растворов с последующей сушкой до постоянной массы, с толщиной после высушивания до 0,5 мм.

Древесно-полимерные композиты получали путем смешения 10...50 % по отношению к массе СПЛ древесной пыли с частицами измельченной древесины средним диаметром 0,5...1,1 мм с последующим формованием пленок различной толщины поливом из суспензионного раствора.

Прочностные характеристики полученных образцов пленок размером 15×250 мм и средней толщиной 0,2 мм изучали с использованием разрывной машины Instron 3369 (USA) по стандартной методике [27].

Т а б л и ц а 1

**Растворимость сополиимидов, полученных на основе диангидридов
карбоновых кислот в органических растворителях**

Solubility of copolyimides based on dianhydrides of carboxylic acids in organic solvents

Растворитель	Растворимость									
	FF0	AFF1	AFF5	AFF10	AFF20	AFB0	AFB1	AFB5	AFB10	AFB20
Тетрагидрофуран	+	+	+	+	+	±	±	±	±	±
Циклогексанон	+	+	+	+	+	±	±	±	±	±
Хлороформ	+	+	+	+	+	+	+	±	±	±
Дихлорэтан	+	+	+	+	+	+	+	+	±	±
Тетрахлорэтан	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Диметилформамид	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Диметилацетамид	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Диметилсульфоксид	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Толуол	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Нитрометан	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ацетонитрил	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. + растворяется; — не растворяется; ± растворяется частично.

Молекулярную массу СПЛ оценивали вискозиметрически из 1 % раствора в диметилформамиде по уравнению Марка — Куна — Хаувинка $[\eta] = 1,5 \cdot 10^{-3} M^{0,5}$ [30].

Термические свойства сополиимидов определяли с помощью термогравиметрического анализа (ТГА) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Термическую стабильность сополиимидов оценивали с помощью измерений ТГА кривых в атмосфере азота при скорости нагрева 10 °С/мин.

Результаты и обсуждение

На схеме (см. рисунок) представлен общий алгоритм синтеза полимерных продуктов. Как видно из схемы, акридин взаимодействует с диангидридом BTDA, затем в среде м-крезола протекает поликонденсация с FDPA. В результате сложного механизма сополиконденсации образуется продукт — сополиимид, представляющий собой СПЛ с большим содержанием ароматических звеньев. Для синтеза целевых продуктов, содержащих смесь диангидридов тетракарбоновых кислот, была использована методика получения продукта с применением одного из двух диангидридов, однако с поправками на количественный состав смеси диангидридов, взятых в различных соотношениях, описанные в литературе [31–35].

Результаты вискозиметрических испытаний для оценки величины молекулярной массы полученных полимеров показали, что синтезированные полимерные продукты имели молекулярную массу в интервале от 20 до 180 кДа в зависимости от времени выдержки реакционной смеси при температуре 200 °С

в токе инертного газа. Минимальное значение указанной молекулярной массы было характерно для соответствующей выдержки в течение менее 2...4 ч, в то время как прогрев реакционной смеси и ведение процесса сополиконденсации в течение 20 ч позволяло получать продукты с максимальным значением молекулярной массы сополиимидов.

Благодаря наличию полярных фторированных группировок (см. табл. 1), полученный продукт стал полностью растворяться в тех растворителях, в которых ранее проявлялась только частичная растворимость, независимо от соотношения диаминных фрагментов. Из-за такого эффекта появляется возможность формования и исследования пленок полученных сополиимидов.

Процесс получения пленок из суспензии СПЛ с древесным наполнителем путем высушивания имеет свои особенности. Свойства получаемой пленки после испарения растворителя можно варьировать за счет изменения концентрации компонентов, типа растворителя и температуры сушки. При этом появляется возможность регулирования физико-механических и электрохимических свойств продукта.

Полиимиды, так же, как и сополиимиды, относятся к классу термостойких СПЛ. По устойчивости к воздействию высоких температур они превосходят многие синтетические полимеры (табл. 2).

Полиимиды позиционируются среди известных полимерных материалов как достаточно термостойкие соединения, значительно превосходящие природные биополимеры. Термогравиметрические испытания показали, что для полученных сополиимидов можно заключить, что рабочий температурный интервал без нару-

Т а б л и ц а 2

Температуры плавления и воспламенения основных природных и синтетических полимеров

Melting and ignition temperatures of the main natural and synthetic polymers

Полимерный материал	Температура плавления, °С	Температура воспламенения, °С
ABS-пластик	88...125	416
Акрилат	91...125	560
Целлюлоза	49...121	475...540
Нейлон	160...275	424...532
Поликарбонат	140...150	580
Полиэфир	220...268	432...488
Полиэтилен низкого давления	107...124	349
Полиэтилен высокого давления	122...137	350
Полипропилен	158...168	570
Полистирол	100...120	488...496
Полиуретан	85...121	416
Политетрафторэтилен (фторопласт F4)	327	530
Полиимид	170... 410	450...560
Поливинилхлорид	75...110	435...557
Шерсть	–	228...230
Хлопок	–	250
Резина	–	260...316

шений формы и внутренней структуры полимеров находится без изменений до температуры 300...320 °С, что может быть использовано при создании соответствующих композитов, работающих в условиях повышенных тепловых нагрузок.

При более высоких значениях температуры у полученных сополиимидов наблюдался эффект размягчающего плавления и перехода в высокоэластическое состояние, что позволяет осуществлять их переработку методом экструзии или вальцевания.

Температурная устойчивость является важной характеристикой СПЛ, которая во многом определяет пути возможного использования полимера. Так, определение разрушающего напряжения при растяжении σ_p пленок полученных полимеров, в зависимости от толщины пленки находилось в пределах от $\sigma_p = 140$ МПа для пленки толщиной 0,2 мм до $\sigma_p = 210$ МПа для пленки толщиной 0,5 мм, а относительное удлинение при разрыве составляло 5...36 %. На величину значений данных физико-механических параметров в значительной степени влияло то, из какого растворителя приготавливали пленки, тем самым потенциально варьируя

микропористость полимерной системы. Наличие частиц древесного наполнителя в составе древесно-полимерного композита приводило к общему упрочнению системы, при этом значение разрушающего напряжения при растяжении σ_p для таких композиционных пленок, в зависимости от состава системы, на 5...58 % превышало значения σ_p , наблюдаемые для аналогов исходных СПЛ без наполнителя.

Содержание наполнителя в количестве до 35 % практически никак не сказывалось на термостойкости композита по сравнению с базовым СПЛ.

Выводы

Полученные древесно-полимерные композиты можно рассматривать как перспективную основу для организации защитных пленочных покрытий, а также их использования в качестве конструкционных материалов для изготовления электронных печатных плат и корпусов, например, электрохимических устройств.

Список литературы

- [1] Глухих В.В., Мухин Н.М., Шкуро А.Е., Бурындин В.Г. Получение и применение изделий из древесно-полимерных композитов с термопластичными полимерными матрицами. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2014. 85 с.
- [2] Schwarzkopf M.J., Burnard M.D. Wood-plastic composites-performance and environmental impacts // Environmental Impacts of Traditional and Innovative Forest-based Bioproducts. Book VII, Springer, 2016, pp. 19–43. DOI: 10.1007/978-981-10-0655-5_2
- [3] Abeykoon C. Sensing technologies for process monitoring in polymer extrusion: A comprehensive review on past, present and future aspects // Measurement: Sensors, 2022, v. 22, no. 8, 100381. DOI: doi.org/10.1016/j.measen.2022.100381
- [4] Nguyen B.K., Abeykoon C., McMillan A., Energy efficiency in extrusion-related polymer processing: A review of state of the art and potential efficiency improvements // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, v. 147, no. 9, 111219. DOI: doi.org/10.1016/j.rser.2021.111219
- [5] Sasthav J.R., Harris F.W. Internal plasticization of polyimides with alkyl 3,5-diaminobenzoate compounds // Polymer, 2021, v. 36, no. 26, pp. 4911–4917. DOI: doi.org/10.1016/0032-3861(96)81615-6
- [6] Rozhanskii I., Okuyama K., Goto K. Synthesis and properties of polyimides derived from isomeric biphenyltetracarboxylic dianhydrides // Polymer, 2000, v. 41, no. 19, pp. 7057–7065. DOI: doi.org/10.1016/S0032-3861(00)00068-9
- [7] Lia D.J., Wang K.L., Huang Y.C., Lee K.R., Lai J.Y., Ha C.D. Advanced polyimide materials: Syntheses, physical properties and applications // Progress in Polymer Science, 2012, v. 37, no. 7, pp. 907–974. DOI: doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.02.005

- [8] Mustafa C., Emre A. Characterization of carbon fiber-reinforced thermoplastic and thermosetting polyimide matrix composites manufactured by using various synthesized PI precursor resins // *Composites. Part B: Engineering*, 2022, v. 231, no. 12, 109559. DOI: doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109559
- [9] Wenli Y., Wu W., Hu X., Lin G., Guo J., Qu H., Zhao L. 3D printing of carbon nanotubes reinforced thermoplastic polyimide composites with controllable mechanical and electrical performance // *Composites Science and Technology*, 2019, v. 182, no. 9, 107671. DOI: doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.05.028
- [10] Zuo H., Chen Y., Qian G., Yao F., Li H., Dong J., Zhao X., Zhang Q. Effect of simultaneously introduced bulky pendent group and amide unit on optical transparency and dimensional stability of polyimide film // *European Polymer Journal*, 2022, v. 173, no. 6, 111317. DOI: doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2022.111317
- [11] Storozhuk I.P., Pavlyukovich N.G., Kotyukova A.L., Polezhaev A.V. Application of polybutadiene-poly(tetramethyleneoxide) block copolymers to modify adhesive compositions // *Polymer Science D*, 2021, v. 14, no. 4, pp. 504–507.
- [12] Ramgobin A., Fontaine G., Bourbigot S. Investigation of the thermal stability and fire behavior of high performance polymer: A case study of polyimide // *Fire Safety J.*, 2021, v. 120, no. 3, 103060. DOI: doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103060
- [13] Hatami M. Production of polyimide ceria nanocomposites by development of molecular hook technology in nano-sonochemistry // *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, v. 44, no. 6, pp. 261–271. DOI: doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.02.032
- [14] Al Dawhi Z.A., Bin Sharfan I.I., Abdulhamid M.A. Carboxyl-functionalized polyimides for efficient bisphenol A removal: Influence of wettability and porosity on adsorption capacity // *Chemosphere*, 2023, v. 313, no. 2, 137347. DOI: doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137347
- [15] Storozhuk I.P., Pavlyukovich N.G., Korobkina A.V., Kagramanov G.G. Polyarylate-poly(ethylene oxide) block copolymers for membrane separation of carbon dioxide from gas mixtures // *Membranes and Membrane Technologies*, 2020, v. 2, no. 2, pp. 71–75.
- [16] Рыбин Б.М. Технология и оборудование для защитно-декоративных покрытий древесины и древесных материалов. М: МГУЛ, 2003. 568 с.
- [17] Bejan A.C., Constantin C.P., Damaceanu M.D. Evidence of diimide structure variation on overall performance of electro(fluoro)chromic devices integrating versatile triphenylamine-based polyimides // *Materials today: Chemistry*, 2022, v. 26, no. 12, 101100. DOI: doi.org/10.1016/j.mtchem.2022.101100
- [18] Pietsch M., Rodlmeier T., Schliske S., Zimmermann J., Romero-Nieto C., Hernandez-Sosa G. Inkjet-printed polymer-based electrochromic and electrofluorochromic dual-mode displays // *J. of Materials Chemistry*, 2019, v. 7, no. 23, pp. 7121–7127. DOI: doi.org/10.1039/C9TC01344J
- [19] Yen H.J., Liou G.S. Electrofluorochromic devices with the highest contrast ratio based on aggregation-enhanced emission (AEE)-Active cyanotriphenylamine-based polymers // *Chemical Communications*, 2013, v. 49, no. 84, p. 9797. DOI: doi.org/10.1039/c3cc45838e
- [20] Lin D., Jiang M., Qi S., Wu D. Macromolecular structural evolution of polyimide chains during large-ratio uniaxial fiber orientation process revealed by molecular dynamics simulation // *Chemical Physics Letters*, 2020, v. 756, no. 10, 137847. DOI: doi.org/10.1016/j.cplett.2020.137847
- [21] Ivankin A.N., Zarubina A.N., Kuleznev A.S., Kochetkov V.A., Ustyugov A.V. A polyelectrolyte sealant for fuel cells based on grafted fluorocopolymers // *Polymer Science D*, 2022, v. 15, no. 4, pp. 608–612.
- [22] Liu F., Huang S., Yang B. Direct fabrication of single-phase multiferroic films on polyimide substrates for flexible memory // *Thin Solid Films*, 2022, v. 758, no. 9, 139424. DOI: doi.org/10.1016/j.tsf.2022.139424
- [23] Lee T.H., Lee B.K., Jun C.Y. Interface engineering in MOF-crosslinked polyimide mixed matrix membranes for enhanced propylene/propane separation performance and plasticization resistance // *J. of Membrane Science*, 2023, v. 667, no. 2, 121182. DOI: doi.org/10.1016/j.memsci.2022.121182
- [24] Topuz F., Abdulhamid M.A., Szekeley G. Superoleophilic oil-adsorbing membranes based on porous and nonporous fluorinated polyimides for the rapid remediation of oil spills // *Chemical Engineering J.*, 2022, v. 449, no. 12, 137821. DOI: doi.org/10.1016/j.cej.2022.137821
- [25] Shah S.A., Idrees R., Saeed S. A critical review on polyimide derived carbon materials for high-performance supercapacitor electrodes // *J. of Energy Storage*, 2022, v. 55C, no. 11, 105667. DOI: doi.org/10.1016/j.est.2022.105667
- [26] Luo Y., Ni L., Shen L., Sun T., Liang M., Liu P., Zou H., Zhou S. Fabrication of rigid polyimide foams by adopting active crosslinking strategy // *Polymer*, 2022, v. 256(11), 125220. DOI: doi.org/10.1016/j.polymer.2022.125220
- [27] Gorbacheva G.A., Ivankin A.N., Sanaev V.G., Ageev A.K., Kiryukhin D.P., Kichigina G.A., Kushch P.P., Badamshina E.R. Surface modification of cellulose-containing materials with solutions of tetrafluoroethylene telomers // *Russian J. of Applied Chemistry*, 2017, v. 90, no. 8, pp. 1365–1371. DOI: doi.org/10.1134/S1070427217080286
- [28] Butnaru I., Constantin C.P., Damaceanu M.D. Optimization of triphenylamine-based polyimide structure towards molecular sensors for selective detection of heavy/transition metal ions // *J. of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2023, v. 435, no. 2, 114271. DOI: doi.org/10.1016/j.jphotochem.2022.114271
- [29] Neluyb V.A., Malysheva G.V., Komarov I.A. New technologies for producing multifunctional reinforced carbon plastics // *Materials Science Forum*, 2021, no. 1037, pp. 196–202.
- [30] Korshak V.V., Pavlova S.A., Boiko L.V., Babchinitser T.M., Vinogradova S.V., Vygodskii Y.S., Golubeva N.A. Viscometric and electron-microscope study of the polypyromellitimide of anilinephthalein // *Polymer Science U.S.S.R.*, 1970, v. 12, no. 1, pp. 63–72. DOI: doi.org/10.1016/0032-3950(70)90277-7
- [31] Shahrivari S., Kowsari E., Shockravi A., Ehsani A. Synthesis of different new copolyimides and influence of different molar ratios of diamines and dianhydride on pseudocapacitance performance of p-type conductive polymer // *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2019, v. 837, no. 3, pp. 123–136. DOI: doi.org/10.1016/j.jelechem.2019.02.024

- [32] Zhang F., Li N., Zhang S., Li S. Ionomers based on multisulfonated perylene dianhydride: Synthesis and properties of water resistant sulfonated polyimides // *Journal of Power Sources*, 2010, v. 195, no. 8, pp. 2159–2165. DOI: doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.10.026
- [33] Wu G., Qi S., Tian G., Wu D. Preparation and characterization of low thermoplastic copolyimide resins based on the structural design of block sequence // *European Polymer Journal*. 2023, v. 195, no. 8, 112249. DOI: doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2023.112249
- [34] Choi M., Do J.Y. Synthesis of perylene dianhydride-incorporated main chain polyimides and sequential structural transformation through a dipolar cycloaddition // *Reactive and Functional Polymers*, 2014, v. 84, no. 11, pp. 37–44. DOI: doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2014.08.
- [35] Chuchalov A.V., Bayminov B.B., Folomin A.D., Zabegeeva O.N., Godovikov I.A., Kononova E.G., Kosolapov A.F., Semjonov S.L., Vygodskii Y.S., Sapozhnikov D.A. Autocatalytic one-step high-temperature synthesis of carboxylated polyimides for in-situ high performance applications // *Chemical Engineering Journal*, 2023, v. 472, no. 7, 144902. DOI: doi.org/10.1016/j.cej.2023.144902

Сведения об авторах

Иванкин Андрей Николаевич — д-р хим. наук, академик МАН ВШ, профессор, ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), aivankin@inbox.ru

Зарубина Анжелла Николаевна — канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой химии и химических технологий лесного комплекса, ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), zarubina@bmstu.ru

Кулезнев Алексей Сергеевич — магистрант, ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), kuleznev00@bmstu.ru

Поступила в редакцию 27.03.2024.

Одобрено после рецензирования 20.11.2024.

Принята к публикации 25.03.2025.

WOOD-POLYMER COMPOSITES BASED ON POLYCONDENSATION COPOLYIMIDES

A.N. Ivankin[✉], A.N. Zarubina, A.S. Kuleznev

BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

aivankin@inbox.ru

The paper describes a methodology for obtaining heat-resistant organosoluble and hot-melt copolyimides for subsequent use as reinforcing binders in the technology of obtaining composite materials based on cellulose-containing components of wood origin. It is shown that 3,6-diaminoacridine; 9,9-bis-(p-aminophenyl) fluorene, 2,2-bis-(3,4-dicarboxyphenyl)-1,1,1,3,3,3-hexafluoropropane dianhydride and 3,3',4,4'-tetracarboxydiphenyl oxide dianhydride can be used as raw materials for obtaining copolyimides in composite materials. An optimal method for synthesizing copolyimides of various compositions with a molecular weight of 20...180 kDa is presented. It is shown that in order to obtain wood-polymer composites with satisfactory properties, it is advisable to add wood dust with particles of an average diameter of 0,5...1,1 mm to the matrix of the obtained copolyimides, followed by obtaining the target product in the form of films that can be formed by casting from a solution. The solubility of the obtained polymeric materials in tetrahydrofuran, cyclohexanone, chloroform, dichloroethane, tetrachloroethane, dimethylformamide, dimethylacetamide, dimethylsulfoxide, toluene, nitromethane and acetonitrile was determined. Physicomechanical tests showed that the magnitude of the tensile stress at break of the obtained films was in the range from 140 MPa for a film 0,2 mm thick to 210 MPa for a film 0,5 mm thick, and the relative elongation at break was 5...36 %. Thermomechanical tests showed a sufficiently high heat resistance of the obtained copolyimides and composites based on them. It was established that the working temperature range of the obtained products was maintained without any damage to the shape and internal structure of the material up to a temperature of 300...320 °C. The synthesized copolymers and composites based on them can be used as heat-resistant materials.

Keywords: copolyimides, heat-resistant polymers, composite materials

Suggested citation: Ivankin A.N., Zarubina A.N., Kuleznev A.S. *Drevesno-polimernye kompozity na osnove polikondensatsionnykh sopoliimidov* [Wood-polymer composites based on polycondensation copolyimides]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 4, pp. 104–113. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-104-113

References

- [1] Glukhikh V.V., Mukhin N.M., Shkuro A.E., Buryndin V.G. *Poluchenie i primeneniye izdeliy iz drevsesno-polimernykh kompozitov s termoplastichnymi polimernymi matritsami* [Obtaining and application of products from wood-polymer composites with thermoplastic polymer matrices]. Ekaterinburg: Ural State Forest Engineering University Publ., 2014, 85 p.
- [2] Schwarzkopf M.J., Burnard M.D. Wood-plastic composites-performance and environmental impacts. *Environmental Impacts of Traditional and Innovative Forest-based Bioproducts*. Book VII, Springer, 2016, pp. 19–43. DOI: 10.1007/978-981-10-0655-5_2
- [3] Abeykoon C. Sensing technologies for process monitoring in polymer extrusion: A comprehensive review on past, present and future aspects. *Measurement: Sensors*, 2022, v. 22, no. 8, p. 100381. DOI: doi.org/10.1016/j.measen.2022.100381
- [4] Nguyen B.K., Abeykoon C., McMillan A., Energy efficiency in extrusion-related polymer processing: A review of state of the art and potential efficiency improvements. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, v. 147, no. 9, 111219. DOI: doi.org/10.1016/j.rser.2021.111219
- [5] Sasthav J.R., Harris F.W. Internal plasticization of polyimides with alkyl 3,5-diaminobenzoate compounds. *Polymer*, 2021, v. 36, no. 26, pp. 4911–4917. DOI: doi.org/10.1016/0032-3861(96)81615-6
- [6] Rozhanskii I., Okuyama K., Goto K. Synthesis and properties of polyimides derived from isomeric biphenyltetracarboxylic dianhydrides. *Polymer*, 2000, v. 41, no. 19, pp. 7057–7065. DOI: doi.org/10.1016/S0032-3861(00)00068-9
- [7] Lia D.J., Wang K.L., Huang Y.C., Lee K.R., Lai J.Y., Ha C.D. Advanced polyimide materials: Syntheses, physical properties and applications. *Progress in Polymer Science*, 2012, v. 37, no. 7, pp. 907–974. DOI: doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.02.005
- [8] Mustafa C., Emre A. Characterization of carbon fiber-reinforced thermoplastic and thermosetting polyimide matrix composites manufactured by using various synthesized PI precursor resins. *Composites. Part B: Engineering*, 2022, v. 231, no. 12, p. 109559. DOI: doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109559
- [9] Wenli Y., Wu W., Hu X., Lin G., Guo J., Qu H., Zhao L. 3D printing of carbon nanotubes reinforced thermoplastic polyimide composites with controllable mechanical and electrical performance. *Composites Science and Technology*, 2019, v. 182, no. 9, p. 107671. DOI: doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.05.028
- [10] Zuo H., Chen Y., Qian G., Yao F., Li H., Dong J., Zhao X., Zhang Q. Effect of simultaneously introduced bulky pendent group and amide unit on optical transparency and dimensional stability of polyimide film. *European Polymer Journal*, 2022, v. 173, no. 6, 111317. DOI: doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2022.111317
- [11] Storozhuk I.P., Pavlyukovich N.G., Kotyukova A.L., Polezhaev A.V. Application of polybutadiene–poly(tetramethyleneoxide) block copolymers to modify adhesive compositions. *Polymer Science D*, 2021, v. 14, no. 4, pp. 504–507.
- [12] Ramgobin A., Fontaine G., Bourbigot S. Investigation of the thermal stability and fire behavior of high performance polymer: A case study of polyimide. *Fire Safety J.*, 2021, v. 120, no. 3, 103060. DOI: doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103060
- [13] Hatami M. Production of polyimide ceria nanocomposites by development of molecular hook technology in nano-sonochemistry. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, v. 44, no. 6, pp. 261–271. DOI: doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.02.032
- [14] Al Dawhi Z.A., Bin Sharfan I.I., Abdulhamid M.A. Carboxyl-functionalized polyimides for efficient bisphenol A removal: Influence of wettability and porosity on adsorption capacity. *Chemosphere*, 2023, v. 313, no. 2, 137347. DOI: doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137347
- [15] Storozhuk I.P., Pavlyukovich N.G., Korobkina A.V., Kagramanov G.G. Polyarylate–poly(ethylene oxide) block copolymers for membrane separation of carbon dioxide from gas mixtures. *Membranes and Membrane Technologies*, 2020, v. 2, no. 2, pp. 71–75.
- [16] Rybin B.M. *Tekhnologiya i oborudovaniye dlya zashchitno-dekorativnykh pokrytiy drevsesiny i drevsesnykh materialov* [Technology and equipment for protective and decorative coatings of wood and wood materials]. Moscow: MSFU, 2003, 568 p.
- [17] Bejan A.C., Constantin C.P., Damaceanu M.D. Evidence of diimide structure variation on overall performance of electro(fluoro)chromic devices integrating versatile triphenylamine-based polyimides. *Materialstoday: Chemistry*, 2022, v. 26, no. 12, 101100. DOI: doi.org/10.1016/j.mtchem.2022.101100
- [18] Pietsch M., Rodlmeier T., Schlisske S., Zimmermann J., Romero-Nieto C., Hernandez-Sosa G. Inkjet-printed polymer-based electrochromic and electrofluoro-chromic dual-mode displays. *J. of Materials Chemistry*, 2019, v. 7, no. 23, pp. 7121–7127. DOI: doi.org/10.1039/C9TC01344J
- [19] Yen H.J., Liou G.S. Electrofluoro-chromic devices with the highest contrast ratio based on aggregation-enhanced emission (AEE)-Active cyanotriphenylamine-based polymers. *Chemical Communications*, 2013, v. 49, no. 84, 9797. DOI: doi.org/10.1039/c3cc45838e
- [20] Lin D., Jiang M., Qi S., Wu D. Macromolecular structural evolution of polyimide chains during large-ratio uniaxial fiber orientation process revealed by molecular dynamics simulation. *Chemical Physics Letters*, 2020, v. 756, no. 10, 137847. DOI: doi.org/10.1016/j.cplett.2020.137847
- [21] Ivankin A.N., Zarubina A.N., Kulezenov A.S., Kochetkov V.A., Ustyugov A.V. A polyelectrolyte sealant for fuel cells based on grafted fluorocopolymers. *Polymer Science D*, 2022, v. 15, no. 4, pp. 608–612.
- [22] Liu F., Huang S., Yang B. Direct fabrication of single-phase multiferroic films on polyimide substrates for flexible memory. *Thin Solid Films*, 2022, v. 758, no. 9, 139424. DOI: doi.org/10.1016/j.tsf.2022.139424

- [23] Lee T.H., Lee B.K., Jun C.Y. Interface engineering in MOF-crosslinked polyimide mixed matrix membranes for enhanced propylene/propane separation performance and plasticization resistance. *J. of Membrane Science*, 2023, v. 667, no. 2, 121182. DOI: doi.org/10.1016/j.memsci.2022.121182
- [24] Topuz F., Abdulhamid M.A., Szekely G. Superoleophilic oil-adsorbing membranes based on porous and nonporous fluorinated polyimides for the rapid remediation of oil spills. *Chemical Engineering J.*, 2022, v. 449, no. 12, 137821. DOI: doi.org/10.1016/j.cej.2022.137821
- [25] Shah S.A., Idrees R., Saeed S. A critical review on polyimide derived carbon materials for high-performance supercapacitor electrodes. *J. of Energy Storage*, 2022, v. 55C, no. 11, 105667. DOI: doi.org/10.1016/j.est.2022.105667
- [26] Luo Y., Ni L., Shen L., Sun T., Liang M., Liu P., Zou H., Zhou S. Fabrication of rigid polyimide foams by adopting active crosslinking strategy. *Polymer*, 2022, v. 256(11), 125220. DOI: doi.org/10.1016/j.polymer.2022.125220
- [27] Gorbacheva G.A., Ivankin A.N., Sanaev V.G., Ageev A.K., Kiryukhin D.P., Kichigina G.A., Kushch P.P., Badamshina E.R. Surface modification of cellulose-containing materials with solutions of tetrafluoroethylene telomers. *Russian J. of Applied Chemistry*, 2017, v. 90, no. 8, pp. 1365–1371. DOI: doi.org/10.1134/S1070427217080286
- [28] Butnaru I., Constantin C.P., Damaceanu M.D. Optimization of triphenylamine-based polyimide structure towards molecular sensors for selective detection of heavy/transition metal ions. *J. of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2023, v. 435, no. 2, 114271. DOI: doi.org/10.1016/j.jphotochem.2022.114271
- [29] Neluyb V.A., Malysheva G.V., Komarov I.A. New technologies for producing multifunctional reinforced carbon plastics. *Materials Science Forum*, 2021, no. 1037, pp. 196–202.
- [30] Korshak V.V., Pavlova S.A., Boiko L.V., Babchinitser T.M., Vinogradova S.V., Vygodskii Y.S., Golubeva N.A. Viscometric and electron-microscope study of the polypyromellitimide of anilinephthalein. *Polymer Science U.S.S.R.*, 1970, v. 12, no. 1, pp. 63–72. DOI: doi.org/10.1016/0032-3950(70)90277-7
- [31] Shahrivari S., Kowsari E., Shockravi A., Ehsani A. Synthesis of different new copolyimides and influence of different molar ratios of diamines and dianhydride on pseudocapacitance performance of p-type conductive polymer. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2019, v.837, no. 3, pp. 123–136. DOI: doi.org/10.1016/j.jelechem.2019.02.024
- [32] Zhang F., Li N., Zhang S., Li S. Ionomers based on multisulfonated perylene dianhydride: Synthesis and properties of water resistant sulfonated polyimides. *Journal of Power Sources*, 2010, v. 195, no. 8, pp. 2159–2165. DOI: doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.10.026
- [33] Wu G., Qi S., Tian G., Wu D. Preparation and characterization of low thermoplastic copolyimide resins based on the structural design of block sequence. *European Polymer Journal*. 2023, v. 195, no. 8, 112249. DOI: doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2023.112249
- [34] Choi M., Do J.Y. Synthesis of perylene dianhydride-incorporated main chain polyimides and sequential structural transformation through a dipolar cycloaddition. *Reactive and Functional Polymers*, 2014, v. 84, no. 11, pp. 37–44. DOI: doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2014.08.
- [35] Chuchalov A.V., Bayminov B.B., Folomin A.D., Zabegaeva O.N., Godovikov I.A., Kononova E.G., Kosolapov A.F., Semjonov S.L., Vygodskii Y.S., Sapozhnikov D.A. Autocatalytic one-step high-temperature synthesis of carboxylated polyimides for in-situ high performance applications. *Chemical Engineering Journal*, 2023, v. 472, no. 7, 144902. DOI: doi.org/10.1016/j.cej.2023.144902

Authors' information

Ivankin Andrey Nikolayevich — Dr. Sci. (Chem.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), aivankin@inbox.ru

Zarubina Angella Nikolaevna — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Department of Chemistry and Chemical Technologies of the Forest Complex of the BMSTU (Mytishchi branch), zarubina@bmstu.ru

Kuleznev Aleksey Sergeevich — student of the BMSTU (Mytishchi branch), kuleznev00@bmstu.ru

Received 27.03.2024.

Approved after review 20.11.2024.

Accepted for publication 25.03.2025.

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

НАЗАД В БУДУЩЕЕ ИЛИ ВОЗВРАЩАЯСЬ К ДЕРЕВЯННЫМ НЕБОСКРЕБАМ

Ю.М. Евдокимов[✉], Т.П. Дialeктова, В.Ю. Прохоров

ФГБОУ ВО «Академия Государственной противопожарной службы МЧС России» (АГПС МЧС России),
129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4

evdokur@mail.ru

Рассмотрена проблема строительства уникальных сооружений из древесины. Освещен отечественный и зарубежный опыт по возведению уникальных конструкций и высотных жилых зданий из древесины и создания материалов на ее основе (древесных композитов, клееной древесины, CLT-панелей, в том числе, усиленных тканями и ламелями на основе углеродных волокон, базальтовых и льняных волокон, графеновых пленок и т. п.). Сделан вывод о необходимости дальнейшего изучения данного вопроса с учетом свойств клееной древесины, композитов на ее основе, пород древесины, природы адгезивов, из которых они изготовлены, данных по мониторингу прочности и иных показателей возведенных конструкций.

Ключевые слова: древесина, клееная древесина, композиты, адгезия, небоскребы, CLT-панели

Ссылка для цитирования: Евдокимов Ю.М., Дialeктова Т.П., Прохоров В.Ю. Назад в будущее или возвращаясь к деревянным небоскрегам // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 4. С. 114–125. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-114-125

На протяжении длительного времени древесина является недорогим экологичным, легким, прочным, возобновляемым материалом, способным при возникновении пожара сохранять прочность вплоть до обрушения за счет современных способов антисептических, пожаростойких и иных пропиток, армирования ее угле-, стекло- и наноцеллюлозными волокнами, в том числе джутовыми, графеновыми и т. п.), использовалась и используется в строительстве уникальных зданий и сооружений, в частности домов, храмов, парусных кораблей, пароходов, мельниц, ветряков, самолетов и т. п.). Усталостная прочность древесины и прочность на сжатие превышают такие же показатели для металлов, не считая способности древесины значительно снижать выбросы диоксида углерода в атмосферу при использовании ее в строительстве вместо железобетона и металла. Более подробно о механических, адгезионных и иных свойствах древесины, композитов на ее основе, CLT-панелей, возведении высотных конструкций и зданий из древесины можно почерпнуть из работ [1–36].

Цель работы

Цель работы — рассмотрение перспектив строительства уникальных зданий и сооружений из древесины и материалов на ее основе.

Результаты и обсуждение

Авторы работы [1] подробно анализируют проекты масштабных деревянных зданий и сооружений начиная с проекта деревянного моста И.П. Кулибина через р. Неву с пролетом длиной около 300 м. Примерно в те же годы был возведен Преображенский храм в Кижях с каркасом из древесины высотой 37 м. Можно привести и колокольню Петропавловского собора в Санкт-Петербурге со шпилем высотой 30 м, созданного на основе древесины, который просуществовал 140 лет до замены. «Дубовый» шпиль собора Нотр-Дам-де-Пари высотой около 100 м (г. Париж, Франция) разрушился во время пожара 2019 г., но через 5 лет был восстановлен. Для его восстановления потребовалось переработать 100 дубов 200-летнего возраста и покрыть их свинцом. Для восстановительных работ были приглашены российские специалисты (инженеры-механики и древесиноведы). Россия как наследница СССР имеет огромный опыт по массовому строительству самолетов из бакелитовой фанеры (ИЛ-2, ЯК-6, Ла-5, ПО-2 и др.) — было выпущено более 33 тыс. в течение 1930–1943 гг. Контроль на горючесть проверял непосредственно И.В. Сталин: когда для ознакомления предоставили образцы бакелитовой фанеры, он тут же в присутствии специалистов высыпал горячий пепел из своей знаменитой трубки на фанеру и подождал 5 мин. Не обнаружив никаких изменений на поверхности

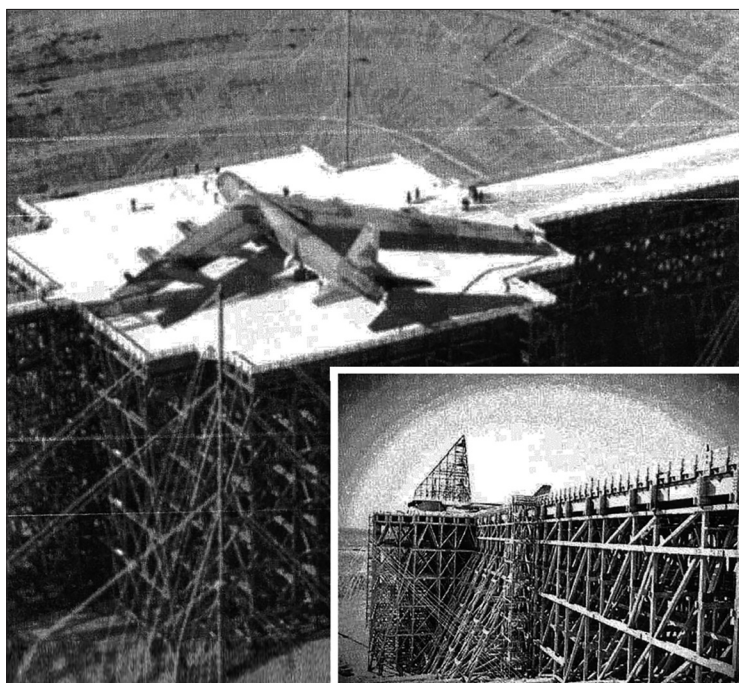


Рис. 1. Испытательный стенд Trestle Stand (США)
Fig. 1. Test berch (bed) Trestle Stand (USA)

фанеры, он дал распоряжение на серийное производство фанерных самолетов (в военное время решать проблемы приходилось быстро).

Из более близкого времени, можно упомянуть 13-этажный деревянный дом высотой 38 м, архангельского предпринимателя Николая Сутягина, сгоревший в 2012 г. по неизвестным причинам и дом, построенный Г. Берджессом из США высотой около 30 м. Крупнейшим строением из древесины на сегодняшний день является испытательный стенд Trestle Stand (США).

Конструкция (рис. 1) выдержала вес полностью загруженного стратегического бомбардировщика В-52. Она была построена в 1947 г. в целях отработки выживаемости в условиях ядерного взрыва, для чего под стендом установили мощнейший импульсный генератор электромагнитного излучения мощностью, соответствующей таковой при ядерном взрыве.

В настоящее время почти все архитекторы работают с деревом. Деревянные конструкции используются при создании проектов аэропортов, конференц-залов, офисов, культурных и строительных объектов, и все больше при строительстве жилья [1, 3, 11–16, 22, 25–27, 30–35]. Деревообрабатывающая отрасль разрабатывает технологии создания большепролетных клееных деревянных конструкций, которые можно использовать при строительстве крупных строительных и производственных сооружений. В частности, подобные конструкции имеются

в здании Совета Европы в Страсбурге, в сооружении над крытым конькобежным катком «Олимпийский овал» в Калгари (Канада), у Дворца водных видов спорта в Казани (Россия) и др. Одним из самых высоких строений из древесины на данный момент времени является деревянный небоскреб «Ascent» в городе Милуоки (США, 2022 г.) высотой 86,6 м (рис. 2).

Технологии деревянного строительства развиваются. Так, в производстве деревянных стен используется 3D-печатная технология [3, 11, 19], чему способствует термическая обработка древесины с заполнением микропор в ее структуре специальным пластиком и целлюлозными смесями, что в итоге приводит к прочности изготовленных «3D-печатных» домов, не уступающих традиционным деревянным.

Однако пока в России на деревянное строительство приходится менее 12 %. Древесина применяется в основном для дачного строительства. Хотя долго обсуждается массовое строительство многоэтажек, детских садов, больниц, спортивных объектов с использованием деревянных конструкций. Проект «Развитие деревянного домостроения на территории Российской Федерации» разрабатывается Минпромторгом России. В нем указана необходимость создания условий для увеличения объемов производства и использования в строительстве продукции деревянного домостроения на начало 2025 г. до 20 %.



Рис. 2. Высотное здание из древесины (США)
Fig. 2. High-rise building made of wood (USA)

Принят свод правил по проектированию и строительству деревянных высотных зданий: СП 516.1325800.2022 «Здания из деревянных срубных конструкций. Правила проектирования и строительства». Специалисты считают, что такие дома не будут отличаться по прочности, качеству, долговечности и безопасности от зданий из кирпича и бетона [11, 14, 33, 35]. Правда, предстоит преодолеть психологический барьер — стереотип о том, что дерево не такой прочный строительный материал, хорошо горит и т. п., хотя сваи из лиственницы с петровских времен до сих пор «держат груз» домов в Санкт-Петербурге. А дома из лиственницы в бывшей русской крепости Свеаборг (Финляндия) до сих пор стоят как новые, хотя им более 200 лет. Что касается мифа о пожарной опасности, то древесина ведет себя лучше, чем железобетон и металлы. Известно, что древесина вначале обугливается и сама себя защищает в течение длительного времени от разрушения (особенно это касается пропитанных современными огнезащитными составами строений из древесины). Конструкции из железобетона при

воздействии огня разваливаются до состояния песка, а металлоконструкции «размягчаются» и прогибаются (разрушаются) под нагрузкой. В связи с этим шведским пожарным при тушении пожаров запрещено заходить внутрь любых зданий, за исключением деревянных. Кроме того, древесина позволяет создавать уникальные конструкции практически без ограничения архитектурного творчества.

Деревянные многоэтажные сооружения можно и нужно строить не только в малых городах, но и в мегаполисах. Предлагается использовать древесину и в целях реконструкции пятиэтажных зданий без их сноса, поскольку есть возможность провести ремонт и надстроить несколько этажей из древесины. Идея многоэтажного деревянного района (архитектор Т. Кузенбаев) площадью около 80 тыс. м² (Wood-city–2018) предполагает надстройку пятиэтажных зданий двумя-тремя этажами на основе деревянных конструкций. Пространство между домами также предполагается заполнить деревянными конструкциями. Таким образом можно создать замкнутый квартал с зоной отдыха для его жителей [23].



Рис. 3. Фанерный самолет Говарда Хьюза
Fig. 3. Aircraft of G. Hughes from plywood

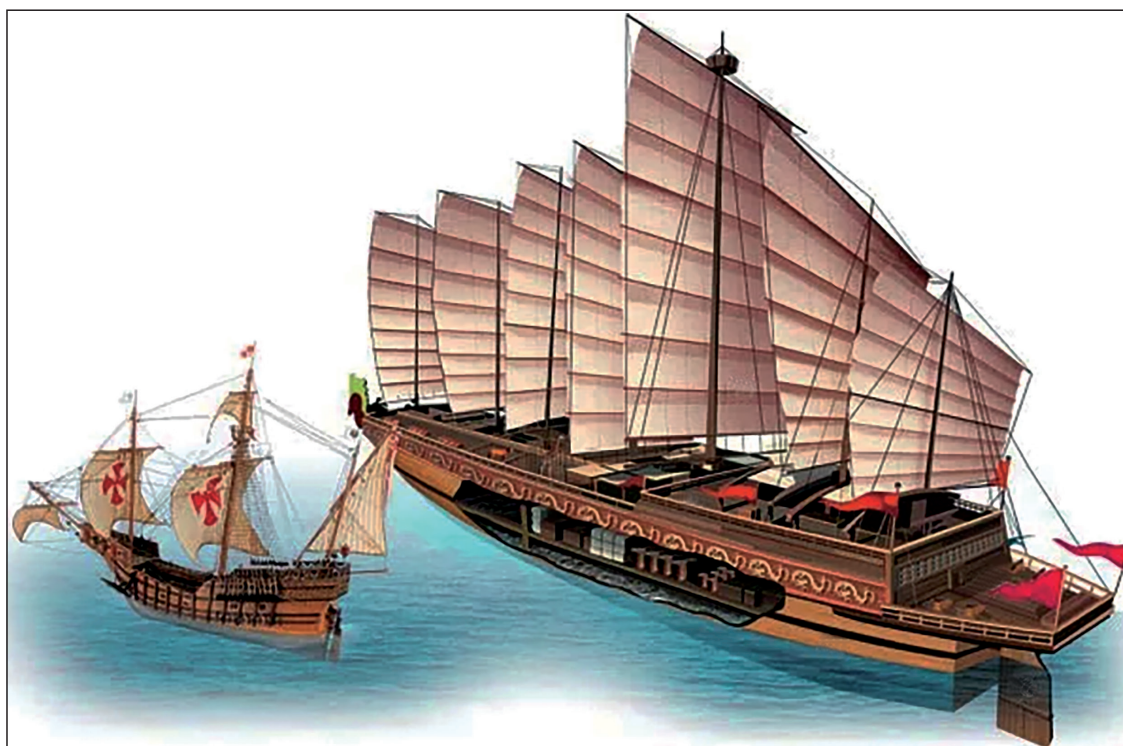


Рис. 4. Древняя китайская джонка с парусами из дощечек бамбука
Fig. 4. An ancient Chinese junk with sails made of bamboo planks

В 1942 г. в США был построен самый большой в мире самолет, изготовленный из березовой фанеры, армированной алюминиевой фольгой — транспортная летающая лодка Говарда Хьюза Н-4 Hercules): размах крыльев 98 м, масса 136 т (рис. 3).

Что касается высотных строений из древесины, рекорд пока сохраняется за решетчатыми опорами высотой 190 м, построенными из древесины в 1933–1934 гг. близ г. Мюлаккер

(Германия), в которые была вмонтирована вертикальная проволочная антенна, усиленная металлическим кольцом диаметром 10,6 м. В 1945 г. они были взорваны в целях сохранения секретности от громивших Германию союзников. Нельзя не упомянуть знаменитую Башню Теслы (Башня Ворденклиф) высотой 57 м, сооруженную из древесины, которая удерживает на вершине металлический купол диаметром 20 м. Энергию с ее помощью получить не удалось.



Рис. 5. Шхуна «Вайоминг» (США, 1909)

Fig. 5. Schooner «Wyoming» (USA, 1909)

Особых успехов удалось достичь в строительстве деревянных джонок, судов и кораблей. Их размеры поражают воображение до сих пор. Суда — корабли Древнего Китая (эпоха династии Мин, 1368–1644 гг.) — имели длину более 100 м, ширину около 50 м, экипаж составлял до 500 человек, — водоизмещение — до 2000 т, а по размеру превосходили корабли Христофора Колумба и Васко да Гама (рис. 4) [18].

На таких судах адмирал Чжэн Хе ходил по многим морям и океанам, посещая десятки стран и континентов, включая Америку. Не сильно отставали древние Япония и Корея. Их весельные или парусные корабли (эпоха Эдо, 1603–1868 гг., и господство династии Чосон, 1392–1897 гг.) были чуть меньших размеров, однако имели хорошее вооружение (например, корейский таран — корабль черепаха).

Самым большим деревянным кораблем в мире (рис. 5) была шестимачтовая шхуна «Вайоминг» (США) длиной 450 футов (137 м), спущенная на воду в 1909 г., которая могла перевозить 6000 т груза (угля). Любопытно, что в первой книге Библии «Бытие» (гл. 6–9) указано, что Ноев ковчег был в длину 300 локтей, что сравнимо с длиной «Вайоминга», который через 15 лет затонул, попав в сильнейший шторм. Был на «Вайоминге» и паровой двигатель, ко-

торый использовался для вспомогательных задач — натягивания канатов, зарифления парусов и откачки воды.

Изложенное выше открывает причину возврата к деревянному строительству, в частности высотному деревянному домостроению.

Россия — лесная держава, поэтому предполагаем, что у нее есть большие возможности для развития этого направления [3]. Если проследить некоторую хронологию этого вопроса, то первой можно упомянуть Швецию, простроившую 10–15 лет тому назад несколько четырех- и восьмизэтажных деревянных домов, которые до сих пор прекрасно держат нагрузку. Далее подобное строительство подхватили несколько стран — Норвегия, Финляндия, США, Канада, Япония, Италия и Россия. Были реализованы проекты деревянных зданий в 17 (Канада) и 34 этажа (Швеция), деревянной башни «Мьес» высотой 85,4 м (Норвегия) и 350-метрового небоскреба (Япония).

Из этого следует, что древесина и материалы на ее основе могут выдержать столь мощную нагрузку. Исполинские секвойи, произрастающие в США, высотой до 120 м и практически негорючей корой, а также австралийские эвкалипты с обхватом ствола с десятков метров и высотой до 140–150 м в реальных условиях

выдерживали свою массу, достигающую 1900...2000 т, хотя их древесина на сжатие не так прочна — она лучше «работает» на кручение. Несмотря на это древесину (дуб, сосну) с давних пор использовали в качестве крепи стволов при проходке туннелей в угольных шахтах, которые подвергались мощному горному давлению. Срок службы этих стволов достигал 50...80 лет с учетом предела прочности древесины 650 кг/см², а требовали они только текущего ремонта, в частности замены отдельных полностью сгнивших стволов крепи [2].

С развитием производства клееной древесины и древесных композитов с использованием клеев удалось повысить прочностные характеристики конструкционных материалов на основе древесины за счет повышения адгезионной прочности. Некоторые высотные строения возводятся с использованием клееного бруса с предусмотренными узлами быстрого соединения. В качестве перекрытий пригодными оказались CLT-панели (массивные плиты из 3...11 слоев досок, цельных или соединенных по длине на зубчатый шип — перекрестно-клееная древесина) размером 2,85×4,0 м, выдерживающие нагрузку и распределяющие ее от расположенных выше этажей на конструкции нулевого цикла (железобетонные). Стены здания при этом формируют из готовых фасадных панелей размером 8×2,81 м, т. е. деревянных конструкций, с заполнением стекловолоконными плитами и обшивкой из древесноволокнистых плит высокого давления, с установленными на заводе-изготовителе окнами. Сами CLT-панели (Cross-Laminated Timber panels) формируют из хорошо высушенных досок толщиной 16...50 мм и более. Их соединяют шипами в плоские панели и складывают «бутербродом» из 3...11 слоев, волокна которых ориентированы перпендикулярно. Древесину чередуют с клеями (адгезивами) — фенольными, меламиновыми, полиуретановыми и иными. Подобные панели обладают высокой несущей способностью, стойкостью к сейсмическим нагрузкам, поскольку древесина (ее основной компонент целлюлоза) и адгезивы имеют множество активных функциональных групп (-ОН, -CH₂ОН, N=C=O, иные), что позволяет им связываться между собой не только за счет межмолекулярного взаимодействия и связей типа водородных, но и вступать в химическое взаимодействие, обеспечивая высокие физико-механические характеристики и долговечность древесным композитам [4, 6, 8, 10–17, 27] с учетом необычных свойств самой древесины [7, 8, 30] и бионических конструкций с ее использованием [5, 9].

Кроме этого, древесные CLT-панели можно усилить углепластиковыми ламелями, стержнями, тканями из углеродных, базальтовых и растительных волокон (целлюлозными, джутовыми, Fibre-Reinforced Poilymers, иными), что приводит к увеличению прочности на 48 %, жесткости — на 27 % и несущей способности образцов — до 70 % [14, 17, 19, 27] (лучшие результаты были получены на трехслойных панелях, усиленных одно- и двенаправленными композитными тканями). Строения на основе древесины и клеев кроме изложенных, выполняют и экологическую функцию, снижая (за счет связывания CO₂) выбросы диоксида углерода в атмосферу на десятки тысяч тонн в год.

На строительство, в частности, токийской высотки необходимо примерно 180 тыс. м³ древесины [3]. Учитывая, что в мире в стадии строительства находятся уже десятки небоскребов на основе древесины, удручает огромное количество качественной древесины, которое потребуется для этих целей. Не потерять бы большие массивы лесов — тут не поможет и возобновляемость сырья. На наш взгляд, необходимо обустраивать и создавать специальные плантации — делянки для выращивания лесов необходимых пород на древесину, предполагаемую для строительства высотных деревянных домов и конструкций.

Отметим, что пока чаще используется гибридное строительство с чередованием древесных панелей и бетонных плит для поддержания необходимой высоты построек и устойчивости к ветровым нагрузкам. Некоторые конструкции укреплены диагональными стальными балками, прежде всего башня River Beech Tower в Чикаго — 80-этажный небоскреб [3]. Древесина и материалы на ее основе при высотном домостроении имеют лучшую перспективу для использования по сравнению с металлами и железобетоном (вследствие отсутствия коррозии, легкости сборки и относительной дешевизны). Кроме этого, CLT-панели с тонким бетонным покрытием становятся практически огнеупорными, их использование может снизить глобальные выбросы диоксида углерода на 15...20 % [3].

Ныне большая часть домов строится из клееной древесины и иных материалов на ее основе. В Швеции эта доля составляет 78 %, в Канаде — 83, в Финляндии и США — свыше 80 %. В основном это частные дома малой этажности. Многоквартирные дома возводятся преимущественно из железобетона. Тем не менее прослеживается ситуация, когда все большую популярность приобретает строительство на основе деревянных конструкций — это осо-

бенно касается зданий высотой от 3–5 этажей и выше. Подобные технологии имеют большую перспективу для социальных объектов и построек в удаленных районах, где нет развитого строительства из кирпича и бетона.

Здания из древесины высотой в пять этажей и выше — мировая актуальная архитектурная тенденция. В Канаде деревянных высоток уже более 500. В Австрии доля индустриального деревянного домостроения составляет 25 %. Считается, что такие здания намного экологичнее и экономичнее своих бетонных и каменных собратьев. Постройки зданий из древесины и арболита — бетона, в котором вместо песка используются растительные наполнители, наносят меньший ущерб окружающей среде, а интегрированная в сооружения система вентиляции не только очищает воздух, но и улавливает диоксид углерода [3]. В итоге за 60 лет эксплуатации здание поглотит больше CO₂, чем было выброшено при его строительстве.

В настоящее время на стадии строительства находится 70-этажный небоскреб Sumitomo Forestry в Токио и другие высотки [3].

К преимуществу домов из древесины можно отнести возможность постройки из сборных конструкций, что сокращает сроки строительства. Некоторые здания состоят из железобетонного сердечника (лифтовая шахта и лестничные пролеты) и деревянных конструкций. Сердечник обеспечивает жесткость и устойчивость сооружения [3, 23]. Из клееной древесины изготовлены колонны, а стены, перекрытия и перегородки — из CLT-плит. Полностью исключить бетон не удалось — снижалась устойчивость здания и огнестойкость. Однако несмотря на это доля древесины составляла около 75 %, в качестве строительного материала часто использовалась древесина лиственницы, прочная и водостойкая. Например, Лондонская компания Stadthaus построила дом в австралийском Мельбурне, получивший название Fort Living. Для строительства было изготовлено 795 готовых к монтажу внутренних и наружных CLT-панелей и крепеж — 5500 уголкового кронштейнов и 34 550 шурупов и винтов. Из Австрии в Австралию домокомплект был доставлен на двух судах в 25 контейнерах. Для фасада зданий часто использовался цементно-древесный материал (этернит), который не воспламеняется ни при каких обстоятельствах, хотя вопросы по пожарной безопасности возникают, особенно у российских специалистов, поскольку в России есть требования к огнестойкости по классу пожарной опасности, а в некоторых европейских странах такие требования отсутствуют. Однако используется спринклерная система. В трубах

спринклеров вода находится под давлением, и в случае высокой температуры выпускается и гасит огонь. В Европе массовых пожаров при таких либеральных нормах не возникало, но надо учитывать, что российские условия отличаются от европейских и какой-то компромисс придется пойти при сотрудничестве.

Люди, проживающие в деревянных высотках из древесины, ценят их за комфортный микроклимат. Внешний вид таких домов отнюдь не подчеркивает наличие в них деревянных конструкций. Часто они имеют навесной фасад или облицованы плиткой, стоят на бетонном фундаменте, оборудованы современной инфраструктурой, в том числе лифтами. В России подобных примеров пока нет, однако началось проектирование 12-этажного деревянного здания, которое предполагают построить в Москве [23].

В начале июля 2022 г. Минстрой России и МЧС России утвердили дорожную карту по развитию деревянного домостроения на период до 2024 года. Ведомства намерены подготовить проекты общественных зданий и жилых домов высотой до 12...16 этажей и на последующие годы. Конструкции планируют построить из CLT-плит, многослойного клееного бруса и шпона. Кроме того, разработан комплекс мер по обеспечению пожарной, механической безопасности, сейсмической стойкости. К тому же один деревянный многоэтажный жилой дом расположен в Новосибирске (ЖК «Горки Академпарка»). Он сооружен по технологии с использованием LVL-бруса (Laminated Vanner Lumber), многослойной конструкции из шпона хвойных пород древесины, проклеенной под высоким давлением. Во всех квартирах предусмотрена повышенная гидроизоляция.

У древесины значительно ниже уровень естественной радиации, чем у бетона и кирпича. Местные (новосибирские) власти планируют использовать подобную технологию для строительства социального жилья и служебных квартир. Естественно, что у деревянных высоток есть свои плюсы и минусы. Эти здания экологичны, быстро возводятся, приводят к снижению выбросов оксида углерода, позволяют сэкономить огромное количество воды. Владельцы жилья имеют значительную экономию по платежам за отопление, так как древесина эффективно сохраняет тепло. Древесину можно использовать как природный материал и как результат технологической переработки, работая по современным технологиям. Древесина легче и технологичнее многих строительных материалов, менее энерго- и ресурсоемка в строительном процессе, легко поддается вторичной переработке, может быть полностью

утилизирована. Она относится к возобновляемым ресурсам, воссоздающимся практически без участия человека.

Строятся деревянные многоэтажные здания по сравнению с бетонными просто стремительно. К примеру, коробку общежития Brock Commons площадью около 15 тыс. м² возвели за 57 сут. силами девяти рабочих [24, 36]. Однако испытания показали, что древесные композиты — не самый горючий материал. Деревянные конструкции сопротивляются огню после начала возгорания 45 мин, в то время как железобетон крошится за 15 мин, а металлические конструкции уже через 4 мин становятся пластичными [13–16, 29]. Относительно стоимости мнения расходятся. Шведы считают, что деревянные дома при масштабировании домостроения на всю страну будут ниже по себестоимости на 5...20 %, чем бетонные конструкции. В России строить деревянные высотки пока дорого из-за отсутствия опыта и проверенных современных технологий. Иногда высотному домостроению препятствуют различного рода законодательные акты.

Изменить ситуацию в лучшую сторону поможет тщательный контроль за состоянием уже возведенных конструкций. В настоящее время все деревянные высотки снабжены всевозможными датчиками — сенсорами, регистрирующими различные параметры состояния строений от влажности, смещения отдельных элементов до потери прочности, устойчивости, долговечности. Можно указать на старые проверенные «методы контроля» — если крепи в шахтах начинали трещать или издавать иные по характеру звуки (акустика), всех рабочих просили покинуть шахту и выйти на поверхность [2]. С подобным эффектом сталкивались многие — после наклейки обоев в течение некоторого времени можно слышать «потрескивания» за счет частичного нарушения адгезионной прочности в системе «бетонная стена — клей — бумага», вследствие возникающих внутренних напряжений и усадочных процессов при высыхании клея. В связи с этим установка на деревянных конструкциях чувствительных микрофонов (размерами с почтовую марку), напечатанных на бумаге методом струйной печати может предупредить об опасности при нагружении конструкций из древесных композитов в CLT-панелях и иных «крепей». Такие устройства с использованием углеродных нанотрубок (УНТ) демонстрируют исключительную гибкость и долговечность, сохраняя высокие акустические характеристики на слышимых человеком частотах до (20 кГц) при незначительной механической де-

формации. Эти подходы корейских ученых [19] решают несколько задач одновременно. Естественная структура бумаги создает основу для УНТ с микропространствами, которая позволяет трубкам переплетаться с волокнами с образованием прочных механических связей, сохраняющих электрические соединения при экстремальных изгибах-деформациях. Простота изготовления акустических устройств, масштабируемость и дешевизна могут быть причиной их широкого использования в качестве идеальных контроллеров долговечности и прочностных характеристик древесно-клеевых конструкций, используемых в высотном деревянном домостроении. Эти разработки [19, 27] демонстрируют и новые возможности в области мониторинга прочности различных конструкций при нагружении за счет беспрецедентного сочетания чувствительности и диапазона, что позволяет обнаруживать незначительные изменения деформации с большим диапазоном охвата, чем позволяли прежние технологии.

С другой стороны, сотрудники Университета Райса и Кувейтского института научных исследований [20] обнаружили, что объемный портланд-цемент содержит микроскопические кристаллы кремния, которые излучают флуоресценцию в ближнем инфракрасном диапазоне при освещении видимым светом. Это позволило судить о микротрещинах в напряженных цементных (и не только) блоках. Появилась возможность оценки растрескивания твердых тел в конструкциях до разрастания в них микротрещин и последующего разрушения, что особо важно при использовании гибридных конструкций в строительстве высоток из древесных композитов. Сбор данных с различного рода сенсоров (датчиков), акустических и иных устройств позволит проводить мониторинг физико-механических и иных характеристик сложных строительных конструкций, используемых в деревянных высотных сооружениях. Успешным оказался и подход К.В. Романевич [21] по разработке критериев и методики процессов по электромагнитному излучению (ЭМИ) в радиодиапазоне при механическом воздействии на диэлектрические материалы, которые в итоге привели к возможности суждения по измерению ЭМИ о возникновении потенциально опасных зон — предвестников будущего разрушения материалов.

Если все изложенное выше подтвердит сохранение высоких свойств (прочностных) древесных конструкций и их долговечность, то откроется широкая дорога к строительству небоскребов из древесины и материалов на ее основе.

Выводы

Рассмотрены перспективы строительства уникальных зданий и сооружений из древесно-клеевых композитов. На основе анализа проблемы показано, что при тщательном мониторинге поведения указанных материалов во времени, можно рекомендовать их использование в высотном домостроении в Российской Федерации.

Список литературы

- [1] Запруднов В.И., Серегин Н.Г., Потехин Н.И. Перспективы строительства уникальных зданий и сооружений из древесины // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т.27. № 4. С. 128–136. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-4-128-136
- [2] Гаврилов Н.И. Справочная книга «Фабрики, заводы и рудники» Екатеринославской губернии. Екатеринослав: Товарищество «Печатня С.П. Яковлева», 1903. 402 с.
- [3] Фишман Р. Деревянные небоскребы // Популярная механика, 2016. С. 30–32.
- [4] Евдокимов Ю.М. Адгезия. От микро- и макроуровня к нанотехнологиям. М.: МГУЛ, 2011. 208 с.
- [5] Bar Cohen Y. (ed.) Biomimetics Biologically inspired Technological // Taylor and Francis CRC Press, 2007, 269 p.
- [6] Евдокимов Ю.М., Фиговский О.Ф. Развитие исследований генерирования электромагнитных излучений при нарушении адгезионного контакта (обзор) // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 4. С. 147–158. DOI: 10/18698/2542-1468-2023-4-147-158
- [7] Патури Ф. Растения — гениальные инженеры природы. М.: Прогресс, 1982. 272 с.
- [8] Чубинский А.И. Формирование клеевых соединений древесины. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1992. 164 с.
- [9] Лебедев Ю.С. (ред.) Архитектурная бионика. М.: Стройиздат, 1990. 269 с.
- [10] Evdokimov Yu.M., Fedorov M.C. Methods of Adhesiometry of Adhesive Bonds // Polymer Science, Series D, Glues and Sealing Materials, v. 5, no. 8, pp. 1–6.
- [11] Маевская М.Е. Деревянные небоскребы. Традиционные материалы в инновационных технологиях современного высотного строительства // Современная архитектура мира, 2018. № 11. С. 125–151.
- [12] Harris R. Cross laminated timber // Wood Composites. Cambridge. UK: Woodhead Publishing, 2015, pp. 141–167.
- [13] Bernasconi A. Four residential towers as CLT timber construction in the city of Milan // World Conference on Timber Engineering, 2016, pp. 5771–5778.
- [14] Потапова Т.В. Усиление CLT-панелей композитными материалами // Инженерный вестник Дона, 2023. № 7. URL: ivdon.ru/magazine/archive/p7y2023/8572 (дата обращения 15.10.2024)
- [15] De Araujo V., Christoforo A. The global cross-laminated timber (CLT) industry: a systematic review and a sectoral survey of its main developer // Sustainability, 2023, v. 15 (10), pp. 7827–7854. DOI:10.3390/su15107827
- [16] Есауленко И.В. Перспективы развития высотного деревянного домостроения в России на примере зарубежного опыта // Архитектура, строительство транспорт, 2021. № 4. С. 17–25. DOI:10.31660/2782-232X-2021-4-17-25
- [17] Ekundayo G., Gong H., Abeykoon C. Jute Fibre Reinforced Polymer Composites in Structural Applications // J. of Materials and Polymer Science: A Review, 2024, v. 4(2), pp. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.47485/2832-9384.1055>
- [18] Needham J., Wang L. Science and Civilization in China. Cambridge University Press, 1965, v. 4, part 2, 506 p.
- [19] Hyungyu I., Eunhwan J. Versatile Foldable Inkjet-Printed Thermoacoustic Loudspeaker on Paper // Advanced Functional Materials, 2024, v. 34, iss. 48, p. 2415218. DOI:10.1002/adfm.202415218
- [20] Keim N.C., Medina D. Mechanical annealing and memories in a disordered solid // Science advanced, 2022, v. 8, iss. 40, eabo 1614. DOI:10.1126/sciadv.abo1614
- [21] Романевич К.В. Разработка критериев и методики идентификации геодинамических процессов по электромагнитному излучению вблизи выработок неглубокого заложения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск, ТГУ, 2015. 23.
- [22] Бойтемирова И.Н., Любакова Д.А. Многоэтажные деревянные здания // Вестник научных конференций, 2016. № 2–1(6). С. 19–20.
- [23] Небоскребы строятся из дерева // Строительство, 2020. № 6. С. 55–58. URL: https://anch.ru/files/pdf/pc/Otraslevoy_zhurnal_Stroitelstvo_-_2020_god_06_2020_pc.pdf (дата обращения 02.11.2024).
- [24] Andrei M. The world's tallest timber building opens in Canada – ahead of schedule. The towering Brock Commons is the world's biggest structure made from wood // ZME Science, 2016, August 30. URL: www.zmescience.com (дата обращения 12.11.2024).
- [25] Modern tall wood buildings: opportunities for innovation: report / Prepared by Doventail Partners/ Inc. Dr. Jim Bowuer, Dr. Stewve Bratkovich, Dr. Jleft Howe. Minneapolis, USA, 2015, 16 p.
- [26] Мещеряков Ю.Г., Федоров С.В. Строительные материалы. СПб.: ЦИПК, 2013. 400 с.
- [27] Бардин И.Н. Конструктивные системы многоэтажных деревянных зданий // Ломоносовские научные чтения студентов, аспирантов и молодых ученых, Архангельск, 15–22 апреля 2017 г. М.: САФУ, 2017. С. 179–184.
- [28] Заиков З.Е. Почему стареют полимеры // Соросовский образовательный журнал, 2000. Т. 6. № 12. С. 48–55.
- [29] Способы и средства огнезащиты древесины. Руководство. М.: ВНИИПО, 1994. 50 с.
- [30] Kozlowski R., Malgorzata M. Smart environmentally friendly composite coating for wood protection // Smart Composite Coatings and Membranes, 2016, pp. 293–325. DOI:10.1016/B978-1-78242-283-9.00011-7
- [31] Михалева С.А. Деревянные высотки в России – инновационный взгляд на современное строительство // Международный научно-исследовательский журнал, 2016. № 4–7(46). С. 19021.
- [32] Ковальчук Л.М., Никулихина Р.В. Деревянные клееные конструкции в строительстве // Клеи. Герметики. Технологии, 2007. № 3. С. 35–40.

- [33] Ломакин А.Д. Защита большепролетных несущих клееных деревянных конструкций // Строительные материалы, 2015. № 7. С. 55–59.
- [34] Дроздов В.А., Беличенко М.Ю. Строительство многоэтажных зданий на основе древесины // Архитектура. Строительство, землеустройство и кадастры на Дальнем Востоке в XXI веке: матер. междунар. научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 20–21 апреля 2016 г. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, 2016. С. 76–80.
- [35] Ширманов В.В. Строительство экологически безопасных, энергоэффективных, быстровозводимых деревянных зданий // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века, 2014. № 8 (187). С. 38–40.
- [36] Поваренко Д.Л., Поваренко Н.Д. Проблемы и перспективы многоэтажного деревянного строительства // Alfabuild, 2017. № 1 (1). С. 121–129.

Сведения об авторах

Евдокимов Юрий Михайлович — канд. хим. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Академия Государственной противопожарной службы МЧС России» (АГПС МЧС России), evdokur@mail.ru

Диалектова Татьяна Павловна — ст. преподаватель, ФГБОУ ВО «Академия Государственной противопожарной службы МЧС России» (АГПС МЧС России), tdialektova@yandex.ru

Прохоров Виктор Юрьевич — канд. техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Академия Государственной противопожарной службы МЧС России» (АГПС МЧС России), Prohorovv@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.11.2024.

Одобрено после рецензирования 20.12.2024.

Принята к публикации 08.04.2025.

BACK TO THE FUTURE OR RETURNING TO WOODEN SKYSCRAPERS

Yu.M. Evdokimov, T.P. Dialektova, V.Yu. Prohorov

State Fire Academy of EMERCOIM of Russia, 4, Boris Galushkin st., 129366, Moscow, Russia

evdokur@mail.ru

The issue of designing and building unique structures made of wood is considered. The article highlights the domestic and international practices in the construction of unique structures and high-rise residential buildings made of wood and materials based on it (glued wood, wood composites, including CLT-panels, reinforced fibers and lamellas based on carbon, basalt and linen fibers, graphene films, etc). It is concluded that further study of this issue is necessary considering the properties of various wood composites, wood species, the nature of the adhesives from which they are made, strength monitoring data and other indicators of erected structures for a long time.

Keywords: wood, glued wood, composites, adhesion, skyscrapers, CLT-panels

Suggested citation: Evdokimov Yu.M., Dialektova T.P., Prokhorov V.Yu. *Nazad v budushchee ili vozvrashchayas' k derevyannym neboskrebam* [Back to the future or returning to wooden skyscrapers]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 4, pp. 114–125. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-114-125

References

- [1] Zaprudnov B.I., Seregin N.G., Potekhin N.I. *Perspektivy stroitel'stva unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy iz drevesiny* [Prospects for unique buildings construction and wood structures]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 4, pp. 128–136. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-4-128-136
- [2] Gavrilov N.I. *Spravochnaya kniga «Fabriki, zavody i rudniki» Ekaterinoslavskoy gubernii* [Reference book «Factories, Plants and Mines» of the Yekaterinoslav Province]. Yekaterinoslav: Partnership «Pechatnya S.P. Yakovlev», 1903, 402 p.
- [3] Fishman R. *Derevyannye neboskreby* [Wooden Skyscrapers]. *Populyarnaya mekhanika* [Popular Mechanics], 2016, pp. 30–32.
- [4] Evdokimov Yu.M., Adgeziya. *Ot mikro- i makrourovnya k nanotekhnologiyam* [Adhesion. From micro- and macrolevel to nanotechnology]. Moscow: MSFU, 2011, 208 p.
- [5] Bar Cohen Y. (ed.) *Biomimetics Biologically inspired Technological*. Taylor and Francis CRC Press, 2007, 269 p.

- [6] Evdokimov Yu.M., Figovskiy O.F. *Razvitie issledovaniy generirovaniya elektromagnitnykh izlucheni pri narushenii adgezionnogo kontakta (obzor)* [Research development by generation of electromagnetic radiation under adhesion contact breach (review)]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 4, pp. 147–158. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-4-147-158
- [7] Paturi F. *Rasteniya — genial'nye inzheneriy prirody* [Plants are nature's ingenious engineers]. Moscow: Progress, 1982, 272 p.
- [8] Chubinskiy A.I. *Formirovanie kleevykh soedineniy drevesiny* [Formation of adhesive joints in wood]. St. Petersburg: St. Petersburg State University, 1992, 164 p.
- [9] *Arkhitekturnaya bionika* [Architectural bionics]. Ed. Yu.S. Lebedev. Moscow: Stroyizdat, 1990, 269 p.
- [10] Evdokimov Yu.M., Fedorov M.C. Methods of Adhesiometry of Adhesive Bonds. *Polymer Science, Series D, Glues and Sealing Materials*, v. 5, no. 8, pp. 1–6.
- [11] Maevskaya M.E. *Derevyannyye neboskreby. Traditsionnye materialy v innovatsionnykh tekhnologiyakh sovremennogo vysotnogo stroitel'stva* [Wooden skyscrapers. Traditional materials in innovative technologies of modern high-rise construction]. *Sovremennaya arkhitektura mira* [Modern architecture of the world], 2018, no. 11, pp. 125–151.
- [12] Harris R. Cross laminated timber. *Wood Composites*. Cambridge. UK: Woodhead Publishing, 2015, pp. 141–167.
- [13] Bernasconi A. Four residential towers as CLT timber construction in the city of Milan. *World Conference on Timber Engineering*, 2016, pp. 5771–5778.
- [14] Potapova T.V. *Usilenie CLT-paneley kompozitnymi materialami* [Strengthening CLT panels with composite materials]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2023, no. 7. Available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2023/8572 (accessed 15.10.2024).
- [15] De Araujo V., Christoforo A. The global cross-laminated timber (CLT) industry: a systematic review and a sectoral survey of its main developer. *Sustainability*, 2023, v. 15 (10), pp. 7827–7854. DOI:10.3390/su15107827
- [16] Esaulenko I.V. *Perspektivy razvitiya vysotnogo derevyannogo domostroeniya v Rossii na primere zarubezhnogo opyta* [Prospects for the Development of High-Rise Wooden Housing Construction in Russia Based on Foreign Experience]. *Arkhitektura, stroitel'stvo transport* [Architecture, Construction, Transport], 2021, no. 4, pp. 17–25. DOI: 10.31'660/2782-232X-2021-4-17-25
- [17] Ekundayo G., Gong H., Abeykoon C. Jute Fibre Reinforced Polymer Composites in Structural Applications. *J. of Materials and Polymer Science: A Review*, 2024, v. 4(2), pp. 1–13. DOI:<https://doi.org/10.47485/2832-9384.1055>
- [18] Needham J., Wang L. *Science and Civilization in China*. Cambridge University Press, 1965, v. 4, part 2, 506 p.
- [19] Hyungyu I., Eunhwan J. Versatile Foldable Inkjet-Printed Thermoacoustic Loudspeaker on Paper. *Advanced Functional Materials*, 2024, v. 34, iss. 48, p. 2415218. DOI:10.1002/adfm.202415218
- [20] Keim N.C., Medina D. Mechanical annealing and memories in a disordered solid. *Science advanced*, 2022, v. 8, iss. 40, eabo 1614. DOI:10.1126/sciadv.abo1614
- [21] Romanevich K.V. *Razrabotka kriteriev i metodiki identifikatsii geodinamicheskikh protsessov po elektromagnitnomu izlucheniyu vblizi vyrabotok neglubokogo zalozheniya* [Development of criteria and methods for identifying geodynamic processes based on electromagnetic radiation near shallow workings]. Diss. Cand. Sci. (Tech.). Tomsk, TSU, 2015, 23.
- [22] Boytemirova I.N., Lyubakova D.A. *Mnogoetazhnye derevyannye zdaniya* [Multi-storey wooden buildings]. *Vestnik nauchnykh konferentsiy* [Bulletin of scientific conferences], 2016, no. 2–1(6), pp. 19–20.
- [23] Neboskreby stroyatsya iz dereva [Skyscrapers are built of wood]. *Stroitel'stvo* [Construction], 2020, no. 6, pp. 55–58. Available at: https://ancb.ru/files/pdf/pc/Otraslevoy_zhurnal_Stroitelstvo_-_2020_god_06_2020_pc.pdf (accessed 02.11.2024).
- [24] Andrei M. The world's tallest timber building opens in Canada – ahead of schedule. The towering Brock Commons is the world's biggest structure made from wood. *ZME Science*, 2016, August 30. Available at: www.zmescience.com (accessed 12.11.2024).
- [25] *Moderen tall woodbuildings: opportunites for innovation: report* / Prepared by Doventail Partners/ Inc. Dr. Jim Bowuer, Dr. Stewve Bratkovich, Dr. Jeft Howe. Minneapolis, USA, 2015, 16 p.
- [26] Meshcheryakov Yu.G., Fedorov S.V. *Stroitel'nye materialy* [Construction materials]. St. Petersburg: TsIPK, 2013, 400 p.
- [27] Bardin I.N. *Konstruktivnye sistemy mnogoetazhnykh derevyannykh zdaniy* [Structural systems of multi-storey wooden buildings]. *Lomonosovskie nauchnye chteniya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Lomonosov scientific readings of students, postgraduates and young scientists], Arkhangelsk, April 15-22, 2017. Moscow: Northern (Arctic) Federal University, 2017, pp. 179–184.
- [28] Zaikov Z.E. *Pochemu stareyut polimery* [Why polymers age]. *Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal* [Soros Educational J.], 2000, v. 6, no. 12, pp. 48–55.
- [29] *Sposoby i sredstva ognezashchity drevesiny. Rukovodstvo* [Methods and means of fire protection of wood. Guide]. Moscow: VNIPO, 1994, 50 p.
- [30] Kozlowski R., Malgorzata M. Smart environmentally friendly composite coating for wood protection. *Smart Composite Coatings and Membranes*, 2016, pp. 293–325. DOI:10.1016/B978-1-78242-283-9.00011-7
- [31] Mikhaleva S.A. *Derevyannye vysotki v Rossii – innovatsionnyy vzglyad na sovremennoe stroitel'stvo* [Wooden high-rises in Russia – an innovative look at modern construction]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, [International Research J.], 2016, no. 4–7(46), p. 19021.
- [32] Koval'chuk L.M., Nikulikhina R.V. *Derevyannye kleeenye konstruksii v stroitel'stve* [Glued laminated timber structures in construction]. *Klei. Germetiki. Tekhnologii* [Adhesives. Sealants. Technologies], 2007, no. 3, pp. 35–40.
- [33] Lomakin A.D. *Zashchita bol'sheproletnykh nesushchikh kleeenyykh derevyannykh konstruksiy* [Protection of large-span load-bearing glued laminated timber structures]. *Stroitel'nye materialy* [Construction materials], 2015, no. 7, pp. 55–59.

- [34] Drozdov V.A., Belichenko M.Yu. *Stroitel'stvo mnogoetazhnykh edaniy na osnove drevesiny* [Construction of multi-storey buildings based on wood]. *Arkhitectura. Stroitel'stvo, zemleustroystvo i kadastry na Dal'nem Vostoke v KhKhI veke* [Architecture. Construction, land management and cadastres in the Far East in the 21st century]. Proc. int. scientific and practical conference, Komsomolsk-on-Amur, April 20–21, 2016. Komsomolsk-on-Amur: Komsomolsk-on-Amur State Technical University, 2016, pp. 76–80.
- [35] Shirmanov V.V. *Stroitel'stvo ekologicheski bezopasnykh, energoeffektivnykh, bystrovozvodimykh derevyannykh zdaniy* [Construction of environmentally friendly, energy-efficient, quickly erected wooden buildings]. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii KhKhI veka* [Construction materials, equipment, technologies of the 21st century], 2014, no. 8 (187), pp. 38–40.
- [36] Povarenko D.L., Povarenko N.D. *Problemy i perspektivy mnogoetazhnogo derevyannogo stroitel'stva* [Problems and prospects of multi-storey wooden construction]. *Alfabuild*, 2017, no. 1 (1), pp. 121–129.

Author's information

Evdokimov Yuriy Mikhaylovich — Cand. Sci. (Chem.), Professor of the State Fire Academy of EMERCOM, evdokur@mail.ru

Dialektova Tat'yana Pavlovna — Senior Lecturer of the State Fire Academy of EMERCOM, tdialektova@yandex.ru

Prohorov Viktor Yur'evich — Cand. Sci. (Tech.), Professor of the State of Fire Academy of EMERCOM, Prohorovv@yandex.ru

Received 01.11.2024.

Approved after review 20.12.2024.

Accepted for publication 08.04.2025.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСТРАКЦИИ ЭФИРНЫХ МАСЕЛ ИЗ ХВОИ И КОРЫ СОСНЫ

Р.Г. Сафин¹, К.В. Валеев^{1✉}, Н.Ф. Тимербаев¹,
В.И. Петров¹, К.Х. Гильфанов²

¹ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (КНИТУ), Россия, 420015, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68

²ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» (КГЭУ), Россия, 420066, Республика Татарстан, г. Казань Красносельская ул., д. 51

kirval116@mail.ru

Представлено описание процесса экстракции эфирных масел из хвои и коры сосны. Приведена принципиальная схема экспериментальной установки извлечения эфирного масла. Представлена методика проведения экспериментальных исследований и процесса извлечения эфирных масел. Получены зависимости концентрации эфирного масла в экстракте из хвои и коры сосны при различной температуре, представлена кинетика изменения плотности эфирного масла в процессе экстракции, выявлена зависимость концентрации эфирного масла в экстракте от приведенного расхода пара, установлено время выхода эфирного масла в процессе экстракции на рабочую температуру по высоте слоя. Определена скорость выделения эфирных масел при различной температуре, а также время выхода процесса экстракции на рабочую температуру. Выявлено, что выделение максимального количества эфирного масла достигается при температуре пара 120 °С, продолжительности процесса 150 минут, расходе пара для выхода на рабочую температуру — 650 м³/ч. Установлено максимальное извлечение эфирных масел из хвои — 0,9 %, из коры — 2,5 %. Степень извлечения эфирных масел паровой экстракцией составляет: из хвои 82 %, а из коры 86 %.

Ключевые слова: экстракция, хвоя, кора, сосна, эфирные масла

Ссылка для цитирования: Сафин Р.Г., Валеев К.В., Тимербаев Н.Ф., Петров В.И., Гильфанов К.Х. Исследование процесса экстракции эфирных масел из хвои и коры сосны // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 4. С. 126–138. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-126-138

Молодые и густые хвойные леса, произрастающие на территории Республики Татарстан, Республики Марий Эл и в Кировской области в последние годы пострадали от лесных пожаров и нашествий насекомых. Для того чтобы восстановить эти леса до экологически устойчивого состояния, осуществляется вырубка большого количества маломерных деревьев. Экономическая ценность деревьев со стволами малого диаметра как пиломатериала не компенсирует капитальные и эксплуатационные затраты на их обработку. В связи с этим образуются большие объемы древесины и порубочных остатков, в частности от сосны [1–3]. Помимо целлюлозы сосна содержит в хвое, коре и стволе сложные органические соединения, используемые деревом для роста, размножения и защиты, в частности эфирные масла, смолы (канифоль, жирные кислоты и сложные эфиры жирных кислот) и терпены, которые можно получить из отходов лесозаготовок [4].

Процессы экстракции эфирных масел из хвои и коры сосны относятся к важной области исследований в химии, биохимии, фармацевтике, пищевой и медицинской промышленности. Эфирные масла представляют собой обширный и разнородный класс органических веществ, в составе которых преобладают живые клетки хвои и коры [5, 6].

Продукты извлечения из сосны обладают лечебными свойствами и применяются, в частности, при бронхолегочных заболеваниях [7]. На основе различных видов сосны были разработаны новые лекарственные средства, которые могут стать достойной альтернативой нестероидным противовоспалительным препаратам [8]. Канифоль, получаемая в результате перегонки хвойной смолы, широко используется в промышленности для производства клея, типографских красок и лаков [9].

Эфирное масло представляет собой ароматическую, маслянистую, жидкость, получаемую из таких различных частей растений, как листья, семена, плоды, почки, цветы, древесина, кора и корни [10]. Они плохо растворяются в воде, но

растворимы в спиртах, органических растворителях, жирах и других гидрофобных соединениях. Эфирные масла составляют лишь небольшую часть общей массы растительного сырья (от 1 до 5,5 %), в зависимости от подвида [11]. Они могут содержать от 20 до 60 соединений разного состава, которые в конечном итоге образуют очень сложную смесь. Как правило, два или три компонента растительного сырья вносят основной вклад (20...70 %), с точки зрения концентрации, в конкретном виде эфирного масла [12].

Эфирные масла, полученные из хвои сосны представляют собой прозрачную жидкость от светло-янтарного до зелено-желтого цвета с запахом хвои [13]. В основном его получают путем отгонки паром. Важными компонентами в эфирном масле являются камфен (до 50 %) и борнилацетат (от 0,9 % до 1,5 %), отвечающие за ароматизирующие свойства и применяемые в производстве камфоры, душистых веществ и оптических клеев [14]. Эфирные масла хвои сосны благодаря антисептическим, дезинфицирующим, восстанавливающим, противовоспалительным, общестимулирующим, мочегонным, потогонным и другими свойствами широко используются в бактерицидных, фунгицидных и медицинских целях [15], а также применяются в качестве консервантов для пищевых продуктов [16]. Некоторые ключевые ингредиенты эфирных масел используются в парфюмерии и косметике. Сельское хозяйство и фармацевтическое производство — основные потребители эфирных масел.

Эфирные масла, получаемые из коры сосны, немного отличаются от масел, полученных из хвои, прежде всего содержанием большого количества азулена (до 3,22 %) [17], используемого в качестве сырьевой субстанции при создании лекарственных препаратов в парфюмерной и косметической промышленности. В эфирном масле из коры и веток (без хвои) присутствуют лимонен (до 36,2 % общей массы эфирного масла) и β -фелландрен (до 18,8 % общей массы эфирного масла) [18], оказывающие противовоспалительное, антибактериальное, обезболивающее, седативное и противогрибковое действие, нормализующие работу пищеварительной системы и обладающие тонизирующим и общеукрепляющими свойствами [19].

Спрос на эфирные масла непрерывно растет, поскольку потребители становятся более внимательными к ингредиентам в средствах личной гигиены и ищут альтернативу, безопасную и полезную, а также осуществляют поиск натуральных продуктов, для снятия стресса и релаксации [20]. По прогнозам [21], объем ми-

рового рынка эфирных масел к 2031 г. достигнет 23,4 млрд дол. США, при среднегодовом темпе роста 9,6 % в прогнозируемый период с 2024 по 2031 гг. Это обуславливает необходимость совершенствования существующих способов и технологий экстракции биологически активных веществ из хвои и коры сосны [22]. Существует множество способов извлечения соснового масла:

- паровая дистилляция;
- экстракция в аппарате Сокслета с последующим выпариванием растворителей;
- ректификация и фракционирование экстрактов растворителем;
- мацерация и прессование;
- экстракция сверхкритической жидкостью;
- экстракция в СВЧ-поле;
- ультразвуковая экстракция.

Методы экстракции эфирных масел значительно усовершенствовались. Количественный выход экстракта оценивают с помощью таких современных методов, как газовая хроматография с масс-спектрометрией (ГХ-МС) и высокоэффективная жидкостная хроматография [23, 24].

Г.Ф. Кашенко [25] исследовал влияние фракционного состава древесной зелени на выход и качество эфирных масел. Исследователем были получены водорастворимые вещества из древесной зелени сосны. Выход эфирных масел составил 23,6 кг из 1 т сырья, а водорастворимых веществ — 120 кг.

Г.С. Тутыгиным [26] представлена технология непрерывной переработки хвои. Измельченная древесная зелень непрерывно поступает в винтовой экстрактор непрерывного действия, туда же поступает нагретый до 85...90 °С экстрагент (вода) в режиме противотока в течение 2–3 ч. После процесса экстракции проводится фильтрация полученной мисцеллы. Отфильтрованную смесь упаривают до пастообразного состояния.

Работа В.С. Федоровой и Т.В. Рязановой [27] посвящена созданию новой технологии в целях снижения антропогенного воздействия на окружающую среду. Особый интерес исследователей представляют экстрактивные вещества коры — фенольные соединения танинной природы, которые используются в качестве дубильных веществ в кожевенном производстве. Из коры выделяют вещества с антибактериальной активностью для фармацевтического и нутрицевтического применения. В качестве экстрагирующего агента используют водно-щелочные растворы, в частности моноэтаноламин. Полученные экстракты отличаются высокой чистотой.

Marjanović-Balaban [28], предложил метод гидродистилляции в условиях промышленного производства. Исследователь методом паровой дистилляции получил эфирные масла *Abies alba* из свежей хвои сосны, собранной на территории Черногории. Состав эфирных масел определялся с помощью ГХ-МС. Основными компонентами были β -пинен (32,8 %), α -пинен (17,3 %), камфен (16,7 %), борнилацетат (9,0 %), лимонен (6,1 %) и β -фелландрен (4,9 %).

В.И. Рошин [29] предложил способ переработки древесной зелени хвойных пород. В качестве сырья использовались хвоя сосны, ели, пихты, кедра. В качестве экстрагента использовали органические растворители — бензин, гексан, петролейный эфир, ацетон. Все исследования проводились в аппарате Сокслета. Для каждого вида сырья используются свои технические параметры:

- для хвои сосны в качестве экстрагента использовался бензин, температура экстракции 70...76 °C, время экстракции 3,5 ч;
- для хвои ели — петролейный эфир, температура — 40...70 °C, время — 4 ч;
- для хвои пихты — гексан, температура — 68 °C, время — 5 ч;
- для хвои кедра — ацетон, температура — 56 °C, время — 2 ч.

После экстракции каждый экстракт фильтруют, охлаждают, омывают 20...40 %-м раствором щелочи, сепарируют хлорофиллиновыми кислотами, смесями жирных и смоляных кислот, воском. Из рафинированной хвои всех пород выделяют стерины, полипенолы и концентрат алифатических углеводов.

Также В.И. Рошин [30] предложил способ переработки древесной зелени пихты. Способ включает в себя переработку зелени пихты методом экстрагирования жидким диоксидом углерода при давлении выше 500 кПа, отстаивание экстракта в течение 24 ч при температуре 24 °C, сепарацию осадка, промывку осадка малополярным растворителем, отгонку растворителя и выделение кристаллов мальтола при атмосферном давлении. Степень чистоты мальтолы достигает 98...99,9 %.

В работе А.Е. Воронина [31] описан способ комплексной переработки древесной зелени. Способ включает в себя измельчение сырья при естественной влажности до размеров 3...5 мм, обработку растительного сырья перегретым паром 160...165 °C, сепарацию на легкую и тяжелую фракции сконденсировавшегося экстракта, упаривание тяжелой фракции при температуре 145...150 °C. При этом рафинированное растительное сырье отжимается и досушивается до влажности 10...15 %, измельчается и фасуется.

Способ комплексной переработки древесной зелени (осины, ивы и пихты), разработанный Н.Ф. Тимербаевым [32], включает в себя измельчение древесной зелени в состоянии естественной влажности, загрузку материала в колонный экстрактор с тарелками, предварительный прогрев сырья, экстракцию биологически активных веществ в течение 6...8 ч при температуре 20...40 °C водным раствором этанола (40...70 %). Рафинирование зелени предусматривает удаление паром остатка экстракта, отжим сырья и сушку до влагосодержания 10...15 %. Выпаривание экстракта осуществляется в две стадии. На первой стадии происходит сгущение экстракта за счет выпаривания этанола понижением давления эжекторным насосом. На второй стадии проводится вакуумная сушка в вакуумной шнековой сушилке до полного удаления этанола и воды. В результате было получено эфирное масло из пихты и борнилацетат.

Способ переработки древесной зелени, предложенный О.Ю. Красильниковым [33], заключается в обработке хвои методом экстрагирования при температуре 120...170 °C. К экструдеру прикреплен пневмоприемник-отвод для улавливания газообразной смеси из экструдера. Данный способ предусматривает переработку хвои из лиственницы, сосны, кедра, пихты.

Choi Yong-gil [34] предложил способ получения эфирного масла из хвои сосны. Способ включает в себя сбор и промывку хвои и ветвей, измельчение растительного сырья до размеров 1...5 см. Получение смеси путем смешения измельченной хвои и ветвей при массовом соотношении: сырье : экстрагент — 1:1. Получение экстракта осуществляют следующим образом: смесь хвои, ветвей и экстрагента загружают в нагреваемую емкость, добавляют дистиллированную воду в соотношении: сырье : раствор — 1:12, а затем нагревают смесь до температуры 80...90 °C и выдерживают в течение 22 ч в герметично закрытом состоянии. После экстракции смесь охлаждают и удаляют твердые частицы хвои, ветвей и выделившуюся канифоль. Из экстракта выпаривают воду в течение 18...22 ч при температуре 100 °C, оставшаяся сироповидная масса представляет собой эфирное масло сосны.

Namid Mellouk и соавторы [35] исследовали микроволновую экстракцию масла из отходов коры французской морской сосны и ее антиоксидантную активность, сравнивая ее с классическим методом гидродистилляции (на аппарате Клевенджера). Максимальный выход экстракции «3,48 % общей массы сухой

коры» был достигнут при оптимальном времени экстракции 92,4 мин и мощности облучения 803,5 Вт по сравнению с выходом 2,2 %, полученным при обычном методе (гидродистилляции). Анализ ГХ–МС показал, что экстракт, полученный микроволновой экстракцией, богаче кислородсодержащими соединениями (~40 %) по сравнению с экстрактом, полученным гидродистилляцией с выходом 26 %. Результаты также показали, что две независимые переменные имели статистически значимое влияние на выход масла, общие фенольные соединения и антиоксидантную активность, оцененную с помощью 2,2-дифенил-1-пикрилгидразила. В оптимизированных условиях количество фенольных соединений составило 139,15 мг в экстракте, что значительно выше, чем полученное для гидродистилляции (14,28 мг в экстракте), что позволяет предположить, что микроволновая экстракция представляет собой интересную альтернативную технологию для производства извлекаемого масла из отходов коры французской приморской сосны. Процент ингибирования также был выше для техники микроволновой экстракции (71,91 %), чем при гидродистилляции (56,51 %), что указывает на более высокую антиоксидантную активность.

В работах [25–35] показано, что наиболее эффективным способом извлечения эфирных масел из хвои и коры сосны является паровая дистилляция, которая позволяет извлекать максимальное количество ценных компонентов. На кафедре переработки древесных материалов в ФГБОУ ВО «КНИТУ» исследован процесс паровой экстракции эфирных масел из хвои и коры сосны, произрастающей в Республике Татарстан.

Цель работы

Цель работы — определение рациональных режимных параметров процесса паровой экстракции эфирных масел из хвои и коры сосен, произрастающих в Республике Татарстан.

Материалы и методы

Для проведения процесса экстракции эфирных масел из хвои и коры сосны европейско-восточного подвида (рис. 1) в Республике Татарстан были собраны образцы за период сентябрь — октябрь 2024 г. Хранение образцов осуществлялось в герметичной емкости не более 10 сут.

Для определения рациональных параметров процесса паровой экстракции из хвои сосны

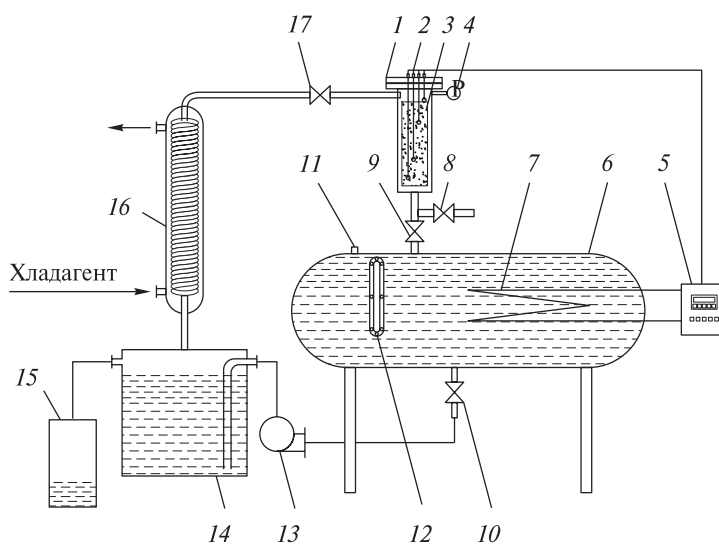
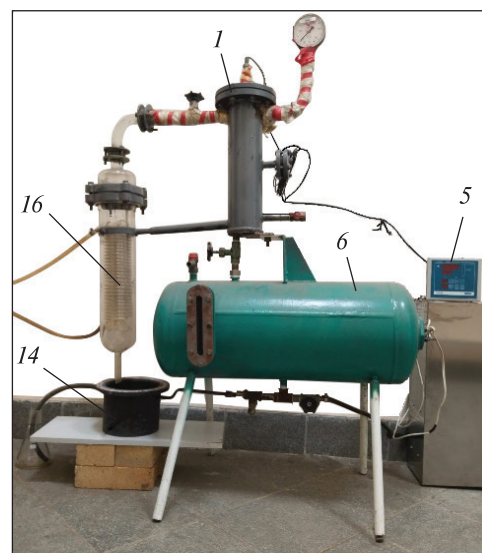
была разработана пилотная установка, ее принципиальная схема и внешний вид (рис. 2).

Установка состоит из экстрактора 1 с хромель-копелевыми термопарами 2, перфорированной корзиной 3, датчиком давления 4, из терморегулятора 5, парогенератора 6 с тэном 7 и клапаном аварийного сброса давления 11, смотровым окном 12, из насоса 13, флорентины 14, буферной емкости 15, конденсатора 16 и вентиля 8, 9, 10, 17.

Исследование проводилось следующим образом. В парогенератор 6 заливалась дистиллированная вода при закрытом вентиле 9 и включался тэн 7. Уровень воды в парогенераторе контролировался через смотровое окно 12. После заполнения вентиль 10 закрывался. Параллельно в экстрактор 1 устанавливалась перфорированная корзина 3 с измельченной хвоей или корой сосны и плотно закрывалась крышкой. После достижения температуры кипения воды в парогенераторе 6 открывались вентили 9 и 17. Температура слоев в экстракторе измерялась хромель-копелевой термопарой 2, которая передавала данные на терморегулятор 5 для поддержания заданной температуры процесса. Также температуру и расход пара в экстракторе регулировали вентилями 9 и 17. Водорастворимые вещества растворялись в паровом потоке и поступали в конденсатор 16. Образовавшийся конденсат стекал в флорентину 14. Поскольку плотность эфирных масел сосны (0,868...0,903 г/см³) меньше плотности воды (1 г/см³) [36], она скапливалась на поверхности и перетекала в буферную емкость 15, а вода передавалась, с помощью насоса 13 обратно в парогенератор 6.

Для определения исходного содержания экстрактивных веществ в коре и хвое сосны проводилась исчерпывающая экстракция сырья массой 50 г в аппарате Сокслета с использованием 200 г дистиллированной воды. После завершения процесса экстрагирования из экстракта выпаривался экстрагент до образования вязкого состояния. Упаренный вязкий экстракт светло-янтарного цвета переливался в выпарительную чашу и досушивался при температуре 50 °С в вакуумном сушильном шкафу до полного удаления воды. Содержание эфирного масла в экстрактах определялось жидкостным хроматографом PerkinElmer Flexar и спектрометром Lambda 25 (PerkinElmer). Исследование проведено с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Наноматериалы и нанотехнологии» «КНИТУ».

Исходное содержание эфирных масел из хвои сосны составило 1,1 % общей массы сырья, а из коры — 2,9 %.

*a**б***Рис. 1.** Исследуемое сырье: *a* — хвоя; *б* — кора**Fig. 1.** The raw materials under study: *a* — needles; *б* — bark*a**б***Рис. 2.** Принципиальная схема (*a*) экспериментальной установки (*б*) для экстракции биологически активных веществ из хвои и коры сосны**Fig. 2.** Schematic diagram (*a*) and external appearance of the pilot plant (*б*) for the extraction of biologically active substances from pine needles and bark

Экспериментальное определение времени выхода на рабочую температуру процесса каждого слоя при изменении расхода пара проводилось в экстракторе 1 с помощью хромель-копелевых термопар 2, установленных на разных уровнях в слое материала: 100, 200, 300, 400 мм. Общая высота слоя составляла 500 мм.

Плотность эфирных масел определялась по стандартной методике [37, 38], описанной в

ГОСТ ISO 279-2014 [39]. Стандарт устанавливает контрольный метод определения относительной плотности эфирных масел при температуре 20°C (таблица).

Обработка результатов исследований позволит рекомендовать рациональные режимные параметры процесса экстракции эфирных масел из хвои и коры сосны, а именно: температуру процесса экстракции (100...140 °C), расход

Процесс экстракции эфирных масел из хвои и коры сосны (размер частиц 2...7 мм)

The process of extraction of essential oils from pine needles and bark (particle size 2...7 mm)

Режим	Технологические параметры						
Температура экстракции, T , °C	100		110	120	130		140
Расход пара в процессе экстракции G , м ³ /ч	350	450	550	650	750	850	900
Расход пара при нагреве сырья, G , м ³ /ч	350	450	550	650	750	850	900
Продолжительность обработки τ , мин	30	60	90	120	150	180	210

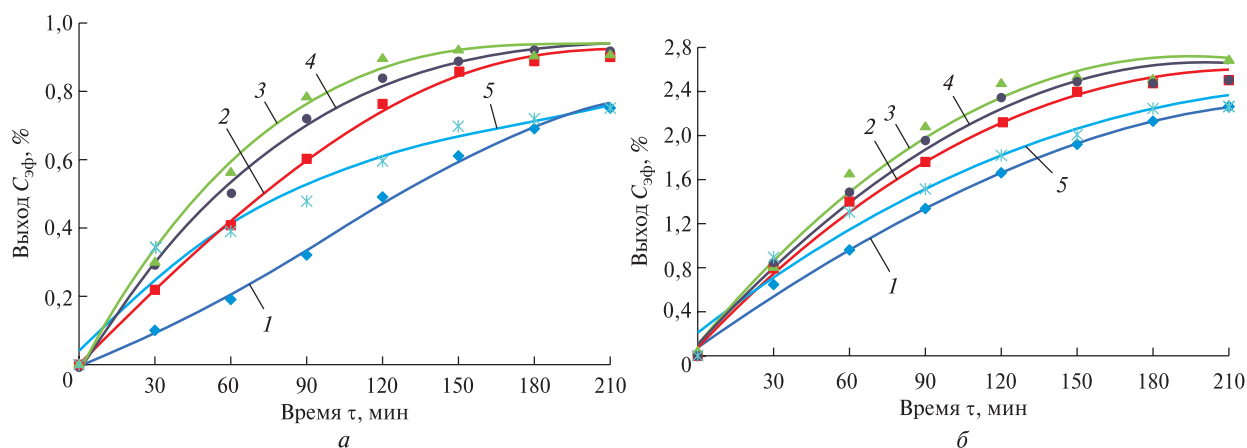


Рис. 3. Зависимость концентрации эфирного масла $C_{эф}$ в экстрактах от продолжительности процесса экстракции из хвои (а) и коры (б) сосны при различной температуре: 1 — 100 °C; 2 — 110; 3 — 120; 4 — 130; 5 — 140 °C

Fig. 3. Dependence of the concentration of $C_{эф}$ essential oil in extracts on the duration of the extraction process from pine needles (а) and bark (б) at different temperatures: 1 — 100 °C; 2 — 110; 3 — 120; 4 — 130; 5 — 140 °C

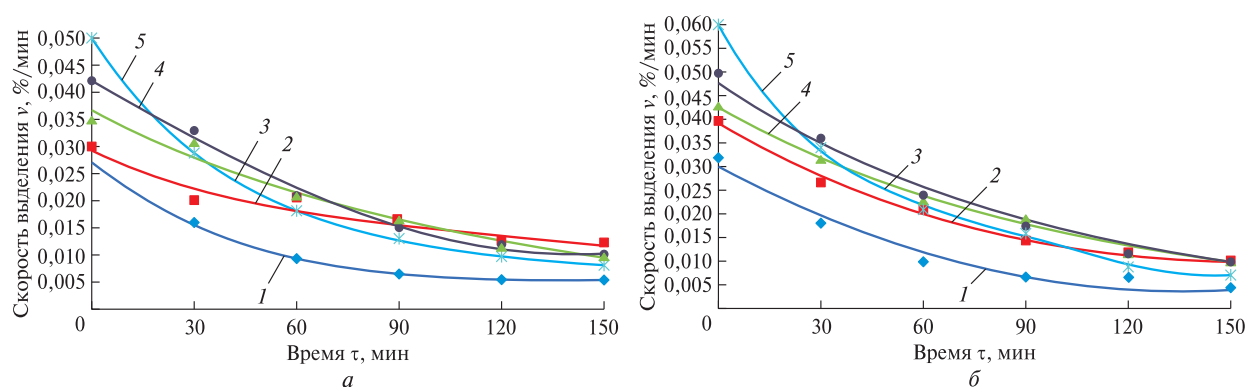


Рис. 4. Скорость выделения эфирных масел из хвои (а) и коры (б) сосны при различной температуре: 1 — 100 °C; 2 — 110; 3 — 120; 4 — 130; 5 — 140 °C

Fig. 4. The rate of release of essential oils from pine needles (а) and bark (б) at different temperatures: 1 — 100 °C; 2 — 110; 3 — 120; 4 — 130; 5 — 140 °C

пара (350...900 м³/ч), продолжительность процесса (30...210 мин).

Для обеспечения надежности результатов каждого исследования, эксперименты проводились трижды и использовались среднеарифметические значения.

Результаты и обсуждение

Выполнены эксперименты и получены данные по выходу эфирных масел из хвои и коры сосны при различной температуре, в зависимости от времени извлечения (рис. 3, 4).

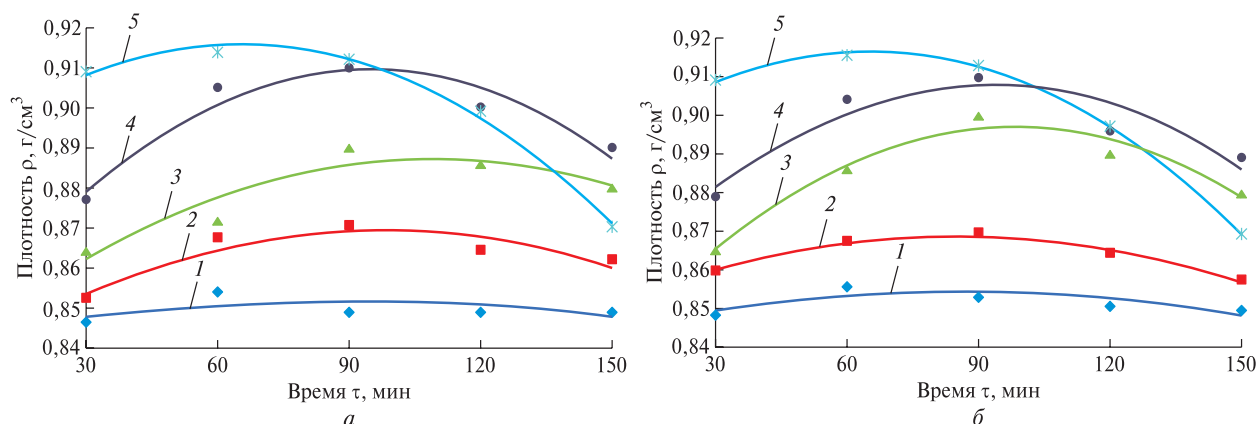


Рис. 5. Кинетика изменения плотности эфирного масла в процессе экстракции из хвои (а) и коры (б) сосны: 1 — 100 °C; 2 — 110; 3 — 120; 4 — 130; 5 — 140 °C

Fig. 5. Kinetics of changes in the density of essential oil during extraction from pine needles (а) and bark (б): 1 — 100 °C; 2 — 110; 3 — 120; 4 — 130; 5 — 140 °C

Анализ приведенных кинетических зависимостей выхода эфирных масел из хвои и коры сосны (см. рис. 3) показывает, что интенсивность процесса извлечения биологически активных веществ снижается по экспоненциальному закону и возрастает при повышении температуры до 120 °C (см. рис. 3, кривая 3). При более высокой температуре выход уменьшается вследствие начинающегося распада биологически активных веществ (см. рис. 3, кривая 5).

Анализ кинетических кривых по скорости выхода показывает, что максимальная начальная скорость выделения эфирных масел наблюдается при температуре 140 °C (см. рис. 4, кривая 5) из хвои — 0,05 %/мин, из коры — 0,06 %/мин. Высокая температура интенсифицирует выделение эфирных масел за счет увеличения подвижности молекул и процессов диффузии. При температуре 100 °C (см. рис. 4, кривая 1) скорость выделения эфирного масла из хвои и коры минимальна как в начале, так и в течение всего процесса, максимальная скорость равна 0,03 %/мин (начальный показатель), что приводит к более продолжительному процессу. При температуре 110 °C, 120 и 130 °C наблюдаются промежуточные значения, причем скорость выделения эфирных масел при этих значениях температуры изменяется более равномерно. К 150 мин скорость выделения стабилизируется и достигает низких значений для всех значений температуры (рис. 5).

Визуальный анализ кинетических кривых показывает, что плотность эфирных масел вначале повышается, а затем уменьшается. Максимальное значение плотности у эфирного масла, полученного при температуре 140 °C наблюда-

ется через 60 мин, а у остальных образцов — через 90...100 мин. Уменьшение плотности эфирного масла происходит вследствие разложения при повышенных температурах биологически активных веществ, в частности борнилацетата, наиболее важного компонента. Однако по органолептическим и конечным значениям плотность эфирных масел, извлеченных при всех температурных режимах (кроме процесса экстракции при 100 °C), удовлетворяет требованиям ТУ [40] (плотность эфирного масла должна находиться в пределах 0,857...0,903 г/м^3).

Для получения более точных данных по влиянию температуры на выход эфирных масел из хвои и коры сосны были проведены дополнительные исследования процесса экстракции в течение 150 мин, при температуре от 110 до 140 °C (рис. 6).

Результаты проведенных исследований показывают, что при температуре 120 °C наблюдается наибольший выход эфирных масел как из хвои (0,9 %), так и из коры (2,5 %) сосны. Более низкие и более высокие значения температуры оказывают отрицательное влияние на выход масла. Это связано с недостаточной экстракцией при более низкой температуре и с термическим разложением компонентов эфирного масла при превышении температуры.

Следовательно, для достижения максимального результата следует проводить экстракцию при давлении пара 198,5 кПа, необходимом для поддержания температуры 120 °C.

Степень извлечения эфирных масел из хвои составила 82 %, а из коры 86 % (рис. 7).

Визуальный анализ кривых показывает, что скорость выделения эфирных масел при приведенном расходе пара 350 $\text{м}^3/\text{ч}$ примерно

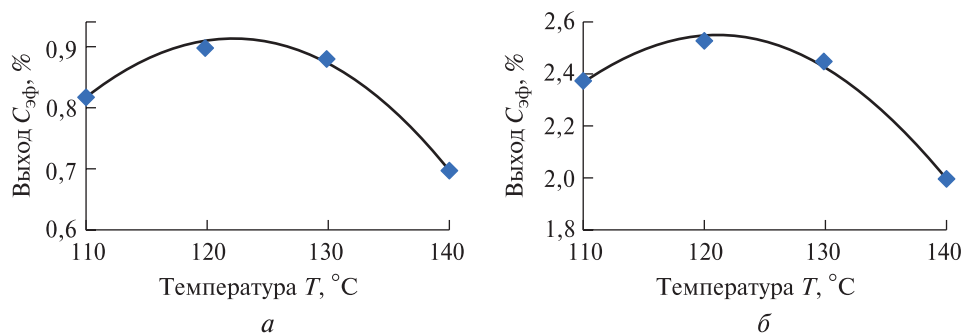


Рис. 6. Зависимость концентрации эфирного масла $C_{эф}$ в экстрактах от температуры процесса экстракции из хвои (а) и коры (б) сосны

Fig. 6. Dependence of the concentration of $C_{эф}$ essential oil in extracts on the temperature of the extraction process from pine needles (а) and bark (б)

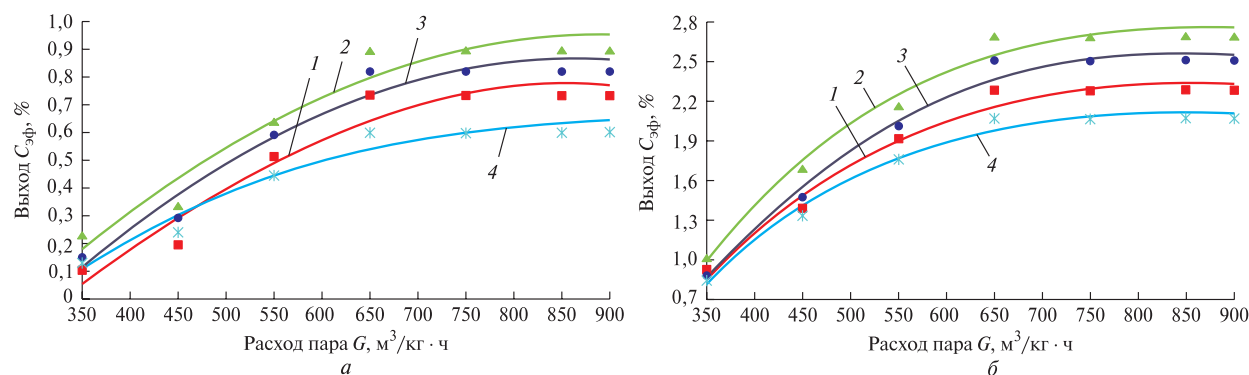


Рис. 7. Зависимость концентрации эфирного масла $C_{эф}$ в экстрактах от расхода пара в процессе экстракции из хвои (а) и коры (б) сосны при различных температурах: 1 — 100 °C; 2 — 110; 3 — 120; 4 — 130; 5 — 140 °C

Fig. 7. Dependence of the concentration of $C_{эф}$ essential oil in extracts on steam consumption during extraction from pine needles (а) and bark (б) at different temperatures: 1 — 100 °C; 2 — 110; 3 — 120; 4 — 130; 5 — 140 °C

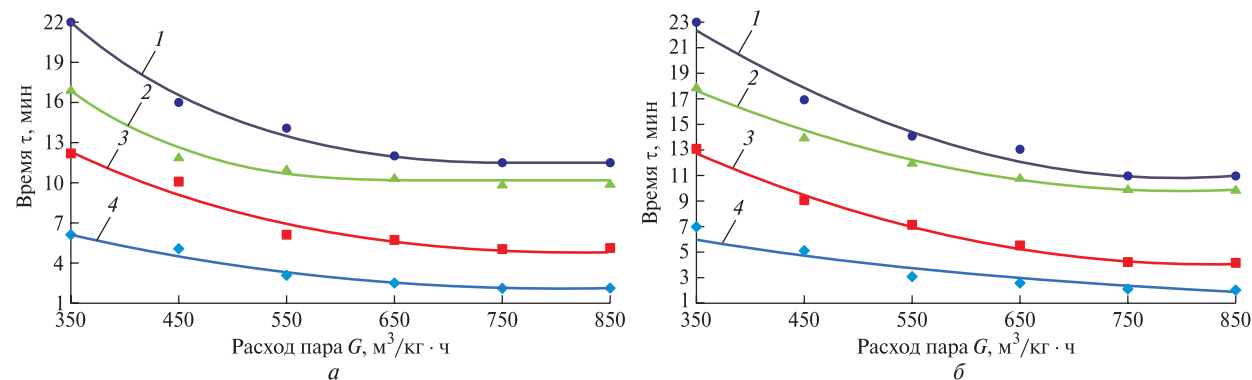


Рис. 8. Время выхода эфирного масла в процессе экстракции из хвои (а) и коры (б) сосны на рабочую температуру по высоте слоя: 1 — 400 мм; 2 — 300; 3 — 200; 4 — 100 мм

Fig. 8. The time of release of the essential oil of the extraction process from pine needles (а) and bark (б) at the operating temperature according to the height of the layer: 1 — 400 mm; 2 — 300; 3 — 200; 4 — 100 mm

одинаковая при различных значениях температуры экстракции. С ростом расхода пара до 750 м³/ч выход извлекаемых веществ заметно возрастает. Концентрация эфирного масла при экстракции хвои при температуре 120 °С увеличилась на 0,7 %, а при экстракции коры — на 1,5 %. Это связано с тем, что эфирные масла при увеличении расхода пара быстрее диффундируют в экстрагент. При других значениях температуры концентрация эфирного масла для рассматриваемого интервала расхода пара изменилась менее значительно.

При дальнейшем возрастании расхода подаваемого пара существенных изменений выхода эфирного масла не происходит (рис. 8).

Анализ данных показывает, что с увеличением расхода пара время выхода процесса экстракции на рабочую температуру для каждого слоя сокращается. Заметное сокращение времени наблюдается при увеличении расхода пара с 350 до 650 м³/ч, а в период с 650 до 850 м³/ч существенных изменений не наблюдается. Следовательно, оптимальный расход пара составляет 650 м³/ч.

Выводы

По кинетическим кривым выхода эфирного масла и скорости экстрагирования эфирных масел из хвои и коры сосны в диапазоне температуры 100...140 °С определено эффективное время экстракции, которое составило 150 мин, а также выявлено изменение плотности экстрагированных масел, то есть эфирные масла, извлеченные при температуре от 110 °С до 140 °С удовлетворяют требованиям ТУ по плотности и органолептическим свойствам. Анализ зависимости выхода эфирных масел от температурного режима показал, что при температуре 120 °С наблюдается максимальный выход эфирного масла, который составил 0,9 % для хвои и 2,5 % для коры сосны. Исследованием влияния расхода пара на выход эфирного масла и времени выхода процесса на рабочую температуру выявлен рациональный удельный расход пара, который составил 650 м³/ч. Максимальное извлечение эфирных масел из хвои составило 0,9 %, а из коры — 2,5 %. Данный способ показал, что степень извлечения эфирных масел из хвои составляет 82 %, а из коры 86 %.

Список литературы

[1] Ученые КФУ выяснили, что сосновый лес в Татарстане погибает из-за серых чапель. URL: <https://media.kpfu.ru/news/uchenye-kfu-vyyasnili-chto-sosnovyy-les-v-tatarstane-pogibaet-iz-za-serykh-capel> (дата обращения 19.06.2023).

[2] Федеральное агентство лесного хозяйства Кировской области. URL: <https://rosleshoz.gov.ru/news/pfo/itogi-borby-s-lesnymi-pozharami-v-kirovskoy-oblasti-v-2024-godu/> (дата обращения 17.01.2024).

[3] Волжская правда. URL: www.vpgazeta.ru/article/142416 (дата обращения 23.10.2024).

[4] Ковбаса Н.П. Подсочка леса. Минск: БГТУ, 2011. 104 с.

[5] Степень Р.А., Климова Л.С. Содержание и состав терпеновых компонентов эфирного масла отдельных частей сосны обыкновенной // Химия древесины, 1985. № 4. С. 101–106.

[6] Губа И.Т., Омелюх Н.С., Свистула Г.Е., Губа И.Т. Опыт комплексной переработки сосновой хвои на продукты лесохимии // Лесохозяйственная информация, 1976. № 12. С. 21–23.

[7] Туманова Е.Ю. Энциклопедия эфирных масел. М.: РИПОЛ классик, 2014. 256 с.

[8] Гитун Т.В. Лечение бронхиальной астмы. Новейшие медицинские методики. М.: РИПОЛ классик, 2008. 64 с.

[9] Никитин А.М. Художественные краски и материалы. Справочник. М.: Инфра-Инженерия, 2016. 412 с.

[10] Кундик Т.М., Зайцева О.А. Лекарственные растения флоры Брянской области. Брянск: Брянский государственный аграрный университет, 2014. 103 с.

[11] Терехин А.А., Вандышев В.В. Технология возделывания лекарственных растений. М.: Изд-во РУДН, 2008. 201 с.

[12] Бунов А.Г., Буймова С.А., Гушин А.А., Извекова Т.В. Биотестовый анализ — интегральный метод оценки качества объектов окружающей среды / под ред. В.И. Гриневича. Иваново: Изд-во Ивановского государственного химико-технологического университета, 2007. 112 с.

[13] Селлар В. Энциклопедия эфирных масел. М.: ФАИР-ПРЕСС, 2005. С. 302–305.

[14] Поляков Н.А., Дубинская В.А., Сидельников Н.И. Смесь борнилацетата и камфена, обладающая холинергическим действием. Патент № 2539373 Российская Федерация, МПК А61К 36/15, А61Р 25/00, № 2014103073/15; Заяв. 01.30.2014; Опубл. 01.30.2014. 8 с.

[15] Сибирские ученые изучили антибактериальные свойства хвои сосен из Восточной Азии. Наука в Сибири (sbras.info). URL: <https://www.sbras.info/articles/science/sibirskie-uchenye-izuchili-antibakterialnye-svoistva-khvoi-sosen-iz-vostochnoi-azii> (дата обращения 30.06.2020).

[16] Рыбин В.Г., Блинов Ю.Г. Антимикробные свойства липидов // Известия тихоокеанского научно-исследовательского рыбо-хозяйственного центра, 2001, Т. 129. С. 179–196.

[17] Тагильцев Ю. Г., Колесникова Р.Д., Орлов А.М. Способ получения эфирного масла из коры хвойных растений. Патент № 2223776 Российская Федерация, МПК SU 457719 A1, RU 2065487 C1, RU 2067977 C1, CN 596121.. № 2001127991/15, Заяв. 15.10.2001; Опубл. 20.02.2004. Бюл. № 5. 5 с.

[18] Lis A., Kalinowska A., Krajewska A., Mellor K. Chemical Composition of the Essential Oils from Different Morphological Parts of *Pinus cembra* L // Chem Biodivers, 2017, № 14 (4). DOI: 10.1002/cbdv.201600345

[19] Пашетецкий В.С., Тамашева Л. А., Пехова О.А., Данилова И.Л., Серебрякова О.А. Эфирные масла и их качество. Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2021. 212 с.

- [20] Тенденции рынка эфирных масел: глубокий анализ 2025 года. URL: <https://reads.alibaba.com/ru/exploring-the-versatile-world-of-essential-oil-in-beauty-and-personal-care/> (дата обращения 26.12.2024).
- [21] Global Essential Oils Market Size, Share, and Trends Analysis Report – Industry Overview and Forecast to 2031 URL: <https://www.databridgemarketresearch.com/ru/reports/global-essential-oils-market> (дата обращения 22.11.2024).
- [22] Тюрин Д.С. Количественные и качественные характеристики надземной фитомассы плантационных культур ели и сосны в Ленинградской области: дис. ... канд. с.-х. наук, 4.1.5. Санкт-Петербург, 2024. 232 с.
- [23] Атаева А.К., Атажанова Г.А., Бадеева К., Ивасенко С.А., Марченко А.Б., Лосева И.В. Оценка качества эфирных масел с помощью анализа ГХ-МС // Медицина и экология, 2020. № 1. С. 64–75.
- [24] Rodríguez-Solana R., Salgado J.M., Domínguez J.M., Cortés-Diéguez S. Comparison of Soxhlet, accelerated solvent and supercritical fluid extraction techniques for volatile (GC-MS and GC/FID) and phenolic compounds (HPLC-ESI/MS/MS) from Lamiaceae species // Phytochem Anal., 2014, v. 26 (1), pp. 61–71. DOI: 10.1002/pca.2537
- [25] Кашенко А.А., Томчук Р.И., Подыниглазов А.А. Влияние измельчения древесной зелени на выход и качество эфирных масел // Лесохимия и подсочка, 1972. № 7. С. 7.
- [26] Тутыгин Г.С., Гаевский Н.П., Петрик В.В. Технология производства недревесной продукции леса. Архангельск: Изд-во Архангельского государственного технического университета, 2000. 267 с.
- [27] Fedorov V.S., Ryazanova T.V. Bark of Siberian Conifers: Composition, Use, and Processing to Extract Tannin // Forests, v. 12(8), p. 1043. DOI: 10.3390/f12081043
- [28] Marjanović-Balaban Ž., Gojković Cvjetković V., Karović-Solomun M., Stanojević L., Stanojević J., Kalaba V. Quality testing of industrially produced essential oil of white pine (*Pinus sylvestris* L.) from the Republic of Srpska // J. of Engineering & Processing Management, 2020, 12(2), 36–43 p.
- [29] Рошин В.И. Способ переработки древесной зелени хвойных пород. Патент № 2015150 Российская Федерация, МПК C09F 1/00. № 5008359/05; Заяв. 22.07.1991; Опубл. 30.06.1994. 10 с.
- [30] Рошин В.И. Способ переработки древесной зелени пихты. Патент № 2000104405 Российская Федерация, МПК C07D309/40. № 2000104405/04; Заяв. 22.02.2000; Опубл. 27.11.2001.
- [31] Сафин Р.Р., Воронин А.Е., Сафин Р.Г., Разумов Е.Ю., Воронин Е.К., Кайнов П.А., Затдинова Д.Ф., Тимербаев Н.Ф. Способ комплексной переработки древесной зелени. Патент № 2404238 Российская Федерация, МПК C 11B 9/02. № 2009113356/13; Заяв. 09.04.2009; Опубл. 20.11.2010 Бюл. № 32.
- [32] Способ комплексной переработки древесной зелени Патент № 2655343 Российская Федерация, МПК 7 В 01 D 11/02. Заявитель и патентообладатель: ФГБОУ ВО «КНИТУ», № 2016152768/68; Заяв. 30.12.2016; Опубл. 25.05.2018.
- [33] Красильников О.Ю. Способ переработки древесной зелени. Патент № 2295254 Российская Федерация, МПК 7 А 23 К 1/00. № 2005103054/13; Заяв. 07.02.2005; Опубл. 20.03.2007. 2 с.
- [34] Choi Engil and Pak Ok Hee No.Pat. 101230388 South Korea, IPC 7 C 11 B 1/14. Method for extracting essential oil from pine / applicant and patent holder: Choi Engil and Pak Ok Hee No. 1230388/10; Application. 01/18/2012; Publ. 02/05/2013. 1 P
- [35] Mellouk H., Meullemiestre A., Maache-Rezzoug Z., Dani A., Bejjani B., Rezzoug S.-A. Valorization of industrial wastes from French maritime pine bark by solvent free microwave extraction of volatiles // J. of Cleaner Production, 2016, v. 112(5), pp. 4398–4405.
- [36] Солдатов С.Ю., Дубровин Г.А., Смирнов Д.А. Сравнительный Анализ физико-химических показателей эфирного масла сосны обыкновенной, полученного разными методами // Бюл. науки и практики – Bulletin of science and practice, 2016. № 8. С. 49–57.
- [37] Калугина З.С., Меньшикова Л.В., Сидоровская И.П., Коротко С.Я. Изучение коэффициента диффузии // Гидролизная и лесохимическая промышленность, 1986. № 7. С. 3–5.
- [38] Солодский Ф.Л. Способы извлечения жирорастворимых веществ из древесных листьев и хвои. А.С. 72532 СССР. Бюл. Изобр., 1948, № 9. 23 с.
- [39] ГОСТ ISO 279–2014. Масла эфирные. Метод определения относительной плотности при температуре 20°C. Контрольный метод. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200112679> (дата обращения 01.01.2016).
- [40] ТУ 13-00281074-263–2015 Технические условия на масло сосновое. URL: https://sertrust.ru/blog/tehnicheskie_usloviy/tehnicheskie-usloviya-na-maslo-sosnovoe-tu?ysclid=m60vrwy2sz284327993. (дата обращения 01.01.2015).

Сведения об авторах

Сафин Рушан Гареевич — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (КНИТУ), safin@kstu.ru

Валеев Кирилл Валерьевич — канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (КНИТУ), kirval116@mail.ru

Тимербаев Наиль Фарирович — д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (КНИТУ), TimerbaevNF@corp.knrtu.ru

Петров Владимир Иванович — д-р техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (КНИТУ), PetrovVI@corp.knrtu.ru

Гильфанов Камилль Хабибович — д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» (КГЭУ), kamil.gilfanov@mail.ru

Поступила в редакцию 21.02.2025.

Одобрено после рецензирования 13.03.2025.

Принята к публикации 10.04.2025.

STUDY OF ESSENTIAL OILS EXTRACTION FROM PINE NEEDLES AND BARK

**R.G. Safin¹, K.V. Valeev^{1✉}, N.F. Timerbaev¹,
V.I. Petrov¹, K.H. Gilfanov²**

¹Kazan National Research Technological University, 68, K. Marx st., 420015, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

²Kazan State Power Engineering University, 51, Krasnoselskaya st., 420066, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

kirval116@mail.ru

The analysis of the current state of the process of extracting essential oil from pine showed the relevance of introducing periodic extraction technology using steam distillation at small enterprises of the forest industry complex, which allows effectively extracting the maximum number of valuable components. According to existing data, today the demand for essential oils in the pharmaceutical, cosmetic, food and agricultural markets has increased. The annual use of these biologically active substances from coniferous trees is growing at an average annual growth rate of 9,6 %. This also explains the high price of some substances. Thus, the price of 1 kg of essential oil is \$ 113. The article presents a physical description of the process of extracting essential oils from non-woody parts (needles and bark) of pine. The equipment for extracting essential oil from pine needles and bark is provided. The methodology for conducting experimental studies and the process of extracting biologically active substances is presented. It was found that the maximum amount of essential oil was extracted at a steam temperature of 120 °C, duration of 150 minutes, and steam consumption to reach the operating temperature of 650 kg·m³/h. The following dependencies were obtained: the yield of essential oil from pine needles and bark at different temperatures, changes in the density of essential oil during extraction, oil yield from the reduced steam consumption; the rate of essential oil extraction at different temperatures and the time it took for the extraction process to reach the operating temperature were determined. The maximum extraction of essential oils from needles was 0,9 %, and from bark — 2,5 %. The proposed method showed that the degree of essential oil extraction from needles is 82 %, and from bark 86 %.

Keywords: extraction, needles, bark, pine, essential oils

Suggested citation: Safin R.G., Valeev K.V., Timerbaev N.F., Petrov V.I., Gil'fanov K.Kh. *Issledovanie protsessa ekstraksii efirnykh masel iz khvoi i kory sosny* [Study of essential oils extraction from pine needles and bark]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 4, pp. 126–138.

DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-126-138

References

- [1] *Uchenye KFU vyasnili, chto sosnovyy les v Tatarstane pogibaet iz-za serykh tsapel'* [KFU scientists have found that pine forests in Tatarstan are dying because of grey herons]. Available at: <https://media.kpfu.ru/news/uchenye-kfu-vyasnili-chto-sosnovyy-les-v-tatarstane-pogibaet-iz-za-serykh-tsapel> (accessed 19.06.2023).

- [2] *Federal'noe agentstvo lesnogo khozyaystva Kirovskoy oblasti* [Federal Forestry Agency of the Kirov Region]. Available at: <https://rosleshoz.gov.ru/news/pfo/itogi-borby-s-lesnymi-pozharami-v-kirovskoy-oblasti-v-2024-godu/> (accessed 17.01.2024).
- [3] *Volzhskaya pravda* [Volzhskaya Pravda]. Available at: www.vpgazeta.ru/article/142416 (accessed 23.10.2024).
- [4] Kovbasa N.P. *Podsochka lesa* [Forest tapping]. Minsk: BSTU, 2011, 104 p.
- [5] Stepen' P.A., Klimova L.S. *Soderzhanie i sostav terpenovykh komponentov efirnogo masla ot del'nykh chastei sosny obyknovennoy* [Content and composition of terpene components of essential oil of individual parts of Scots pine]. [Wood Chemistry], 1985, no. 4, pp. 101–106.
- [6] Guba I.T., Omelyukh N.S., Svistula G.E., Guba I.T. *Opyt kompleksnoy pererabotki sosnovoy khvoi na produkty lesokhimii* [Experience of complex processing of pine needles into forest chemistry products]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 1976, no. 12, pp. 21–23.
- [7] Tumanova E.Yu. *Entsiklopediya efirnykh masel* [Encyclopedia of essential oils]. Moscow: RIPOL classic, 2014, 256 p.
- [8] Gitun T.V. *Lechenie bronkhial'noy astmy. Noveyshie meditsinskie metodiki* [Treatment of bronchial asthma. The latest medical techniques]. Moscow: RIPOL classic, 2008, 64 p.
- [9] Nikitin A.M. *Khudozhestvennye kraski i materialy. Spravochnik* [Art paints and materials. Handbook]. Moscow: Infra-Engineering, 2016, 412 p.
- [10] Kundik T.M., Zaytseva O.A. *Lekarstvennye rasteniya flory Bryanskoy oblasti* [Medicinal plants of the Bryansk region flora]. Bryansk: Bryansk State Agrarian University, 2014, 103 p.
- [11] Terekhin A.A., Vandysh V.V. *Tekhnologiya vozdeystviya lekarstvennykh rasteniy* [Technology of cultivation of medicinal plants]. Moscow: RUDN, 2008, 201 p.
- [12] Bubnov A.G., Buymova S.A., Gushchin A.A., Izvekova T.V. *Biotestovyy analiz — integral'nyy metod otsenki kachestva ob'ektov okruzhayushchey sredy* [Biotest analysis — an integral method of assessing the quality of environmental objects: a teaching aid]. Ed. V.I. Grinevich. Ivanovo: Ivanovskiy gosudarstvennyy khimiko-tekhnologicheskii universitet [Ivanovo State Chemical-Technological University], 2007, 112 p.
- [13] Sellar V. *Entsiklopediya efirnykh masel* [Encyclopedia of Essential Oils]. Moscow: FAIR-PRESS, 2005, pp. 302–305.
- [14] Polyakov N.A., Dubinskaya V.A., Sidel'nikov N.I. *Smes' bornilatsetata i kamfena, obladayushchaya kholinergicheskim deystviem* [A mixture of bornyl acetate and camphene with cholinergic action]. Patent no. 2539373 Russian Federation, IPC A61K 36/15, A61P 25/00, no. 2014103073/15; Appl. 01.30.2014; Published 01.30.2014. 8 p.
- [15] *Sibirskie uchenye izuchili antibakterial'nye svoystva khvoi sosen iz Vostochnoy Azii. Nauka v Sibiri (sbras.info)* [Siberian scientists studied the antibacterial properties of pine needles from East Asia. Science in Siberia (sbras.info)]. Available at: <https://www.sbras.info/articles/science/sibirskie-uchenye-izuchili-antibakterialnye-svoystva-khvoisosen-iz-vostochnoi-azii> (accessed 30.06.2020).
- [16] Rybin V.G., Blinov Yu.G. *Antimikrobnnye svoystva lipidov* [Antimicrobial properties of lipids]. *Izvestiya tikhookeanskogo nauchno-issledovatel'skogo rybno-khozyaystvennogo tsentra* [Bulletin of the Pacific Research Fisheries Center], 2001, v. 129, pp. 179–196.
- [17] Tagil'tsev Yu. G., Kolesnikova R.D., Orlov A.M. *Sposob polucheniya efirnogo masla iz kory khvoynykh rasteniy* [Method for obtaining essential oil from the bark of coniferous plants]. Patent no. 2223776 Russian Federation, IPC SU 457719 A1, RU 2065487 C1, RU 2067977 C1, CH 596121, no. 2001127991/15, Appl. 15.10.2001; Publ. 20.02.2004 Bulletin No. 5. 5 p.
- [18] Lis A., Kalinowska A., Krajewska A., Mellor K. Chemical Composition of the Essential Oils from Different Morphological Parts of *Pinus cembra* L. *Chem Biodivers*, 2017, no. 14 (4). DOI: 10.1002/cbdv.201600345
- [19] Pashetetskiy V.S., Tamasheva L. A., Pekhova O.A., Danilova I.L., Serebryakova O.A. *Efirnye masla i ikh kachestvo* [Essential oils and their quality]. Simferopol: IT «ARIAL», 2021, 212 p.
- [20] *Tendentsii rynka efirnykh masel: glubokiy analiz 2025 goda* [Essential Oil Market Trends: An In-Depth Analysis to 2025]. Available at: <https://reads.alibaba.com/ru/exploring-the-versatile-world-of-essential-oil-in-beauty-and-personal-care/> (accessed 26.12.2024).
- [21] *Global Essential Oils Market Size, Share, and Trends Analysis Report – Industry Overview and Forecast to 2031* [Global Essential Oils Market Size, Share, and Trends Analysis Report – Industry Overview and Forecast to 2031]. Available at: <https://www.databridgemarketresearch.com/ru/reports/global-essential-oils-market> (accessed 22.11.2024).
- [22] Tyurin D.S. *Kolichestvennye i kachestvennye kharakteristiki nadzemnoy fitomassy plantatsionnykh kul'tur eli i sosny v Leningradskoy oblasti* [Quantitative and qualitative characteristics of the aboveground phytomass of plantation crops of spruce and pine in the Leningrad region]. Dis. Cand. Sci. (Agric.). 4.1.5. St. Petersburg, 2024, 232 p.
- [23] Ataeva A.K., Atazhanova G.A., Badekova K., Ivasenko S.A., Marchenko A.B., Loseva I.V. *Otsenka kachestva efirnykh masel s pomoshch'yu analiza GKh-MS* [Evaluation of the quality of essential oils using GC-MS analysis]. *Meditsina i ekologiya* [Medicine and Ecology], 2020, no. 1, pp. 64–75.
- [24] Rodriguez-Solana R., Salgado J.M., Domínguez J.M., Cortés-Diéguez S. Comparison of Soxhlet, accelerated solvent and supercritical fluid extraction techniques for volatile (GC-MS and GC/FID) and phenolic compounds (HPLC-ESI/MS/MS) from Lamiaceae species. *Phytochem Anal.*, 2014, v. 26 (1), pp. 61–71. DOI: 10.1002/pca.2537
- [25] Kashchenko A.A., Tomchuk R.I., Podyniglavov A.A. *Vliyanie izmel'cheniya drevesnoy zeleni na vykhod i kachestvo efirnykh masel* [Effect of Grinding Wood Greenery on the Yield and Quality of Essential Oils]. *Lesokhimiya i podsochka* [Forest Chemistry and Tapping: Ref. Inform], 1972, no. 7, p. 7.
- [26] Tutygina G.S., Gaevskiy N.P., Petrik V.V. *Tekhnologiya proizvodstva nedrevesnoy produktsii lesa* [Technology of Production of Non-Timber Forest Products]. Arkhangel'sk: Izd-vo Arkhangel. gos. tekhn.un-ta [Arkhangelsk State Technological University], 2000, 267 p.

- [27] Fedorov V.S., Ryazanova T.V. *Bark of Siberian Conifers: Composition, Use, and Processing to Extract Tannin* [Bark of Siberian Conifers: Composition, Use, and Processing to Extract Tannin]. Forests, v. 12(8), p. 1043. DOI: 10.3390/f12081043
- [28] Marjanović-Balaban Ž., Goković Cvjetković V., Kapović-Solomon M., Stanojević L., Stanojević J., Kalaba V. Quality testing of industrially produced essential oil of white pine (*Pinus sylvestris* L.) from the Republic of Srpska. J. of Engineering & Processing Management, 2020, 12(2), 36–43 p.
- [29] Roshchin V.I. *Sposob pererabotki drevesnoy zeleni khvoynykh porod* [Method for processing coniferous wood greenery]. Patent no. 2015150 Russian Federation, IPC C09F 1/00, no. 5008359/05; Applied 22.07.1991; Published 30.06.1994. 10 p.
- [30] Roshchin V.I. *Sposob pererabotki drevesnoy zeleni pikhty* [Method for processing fir wood greenery]. Patent no. 2000104405 Russian Federation, IPC C07D309/40, no. 2000104405/04; Applied 22.02.2000; Published 27.11.2001.
- [31] Safin R.R., Voronin A.E., Safin R.G., Razumov E.Yu., Voronin E.K., Kaynov P.A., Zatdinova D.F., Timerbaev N.F. *Sposob kompleksnoy pererabotki drevesnoy zeleni* [Method for complex processing of wood greenery]. Patent no. 2404238 Russian Federation, IPC C 11B 9/02, no. 2009113356/13; Appl. 09.04.2009; Published 20.11.2010, bull. no. 32.
- [32] *Sposob kompleksnoy pererabotki drevesnoy zeleni* [Method for the comprehensive processing of wood greenery]. Patent no. 2655343 Russian Federation, IPC 7 B 01 D 11/02. applicant and patent holder: KNITU, no. 2016152768/68; Appl. 30.12.2016; Published 25.05.2018.
- [33] Krasil'nikov O.Yu. *Sposob pererabotki drevesnoy zeleni* [Method for processing wood greenery]. Patent. 2295254 Russian Federation, IPC 7 A 23 K 1/00, no. 2005103054/13; Appl. 07.02.2005; Published 20.03.2007. 2 p.
- [34] Choi Engil and Pak Ok Hee No.Pat. 101230388 South Korea, IPC 7 C 11 B 1/14. Method for extracting essential oil from pine / applicant and patent holder: Choi Engil and Pak Ok Hee No. 1230388/10; Application. 01/18/2012; Publ. 02/05/2013. 1 P.
- [35] Mellouk H., Meullemiestre A., Maache-Rezzoug Z., Dani A., Bejjani B., Rezzoug S.-A. Valorization of industrial wastes from French maritime pine bark by solvent free microwave extraction of volatiles. J. of Cleaner Production, 2016, v. 112(5), pp. 4398–4405.
- [36] Soldatov S.Yu., Dubrovin G.A., Smirnov D.A. *Sravnitel'nyy Analiz fiziko-khimicheskikh pokazateley efirnogo masla sosny obyknovennoy, poluchennogo raznymi metodami* [Comparative Analysis of Physicochemical Properties of Scots Pine Essential Oil Obtained by Different Methods]. [Bulletin of Science and Practice], 2016, no. 8, pp. 49–57.
- [37] Kalugina Z.S., Men'shikova L.V., Sidorovskaya I.P., Korotko S.Ya. *Izuchenie koeffitsienta diffuzii* [Study of the Diffusion Coefficient]. *Gidroliznaya i lesokhimicheskaya promeshlennost'* [Hydrolysis and Forest Chemical Industry], 1986, no. 7, pp. 3–5.
- [38] Solodskiy F.L. *Sposoby izvlecheniya zhirorastvorimykh veshchestv iz drevesnykh list'ev i khvoi* [Methods for Extracting Fat-Soluble Substances from Tree Leaves and Needles]. A. S. 72532 USSR. Bulletin of Images, 1948, no. 9, 23 p.
- [39] GOST ISO 279–2014 *Masla efirnye. Metod opredeleniya otnositel'noy plotnosti pri temperature 20°S. Kontrol'nyy metod* [Essential oils. Method for determination of relative density at 20°C. Reference method]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200112679> (accessed 01.01.2016).
- [40] TU 13-00281074-263–2015 *Tekhnicheskie usloviya na maslo sosnovoe* [Technical conditions for pine oil]. Available at: https://sertrust.ru/blog/tehnicheskie_usloviy/tehnicheskie-usloviya-na-maslo-sosnovoe-tu?ysclid=m6ovrwy2sz284327993 (accessed 01.01.2015).

Authors' information

Safin Rushan Gareevich — Dr. Sci. (Tech.), Professor, Head of the Department of Wood Materials Processing, Kazan National Research Technological University, safin@kstu.ru

Valeev Kirill Valerievich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Kazan National Research Technological University, kirval116@mail.ru

Nail Farilovich Timerbayev — Dr. Sci. (Tech.), Professor, Kazan National Research Technological University, TimerbaevNF@corp.knrtu.ru

Petrov Vladimir Ivanovich — Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, Kazan National Research Technological University, PetrovVI@corp.knrtu.ru

Gilfanov Kamil Khabibovich — Dr. Sci. (Tech.), Professor, Kazan State Power Engineering University, kamil.gilfanov@mail.ru

Received 21.02.2025.

Approved after review 13.03.2025.

Accepted for publication 10.04.2025.

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

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Ю.А. Боровлев¹, Д.Г. Козлов^{2✉}, А.В. Скрыпников³,
А.С. Сергеев⁴, А.А. Яровенко³

¹ФГКВОУ ВПО «Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил» «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» Министерства обороны Российской Федерации, Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54 а

²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, 394087, г. Воронеж, ул. Мичурина, д. 1

³ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», 394036, Россия, г. Воронеж, пр-т Революции, д. 19

⁴ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29

dimvsau@mail.ru

Приведены материалы комплексного исследования параметров уплотнения грунта при строительстве лесных дорог на основе корреляционных данных между движителями агрегата и уплотняемым слоем, дающих возможность определять деформацию этих систем в качестве основы для управления процессом уплотнения при формировании дорожного полотна. Статья представляет собой комплексное исследование по контролю параметров уплотнения грунта при строительстве лесных дорог. Основное внимание в статье уделено корреляция между пневматическими шинами и уплотненным слоем почвы, который вызывает деформации обоих материалов. Степень этих деформаций, обеспечивается как механическими, так и физическими силами, действующими на объекты, чтобы определить деформации, а также природу и интенсивность физических и механических свойств материала, взаимодействующих тел. Выполнены анализ двух схем деформации пневматических шин, составляющих основу управления уплотнением и анализ процесса уплотнения почвы пневматическими шинами как при постоянном, так и при переменном давлении воздуха в шине и деформации шины и слоя почвы, изменяющегося при каждом прохождении шины. Доказан логарифмический характер зависимости деформации уплотненного слоя и насыпного веса почвенного каркаса от количества пневматических проходов. Получены аналитические зависимости, описывающие процесс взаимодействия двух тел, находящихся в контакте, что может применяться для мониторинга уплотнения грунтов. Предложен способ измерения радиальной деформации пневматической шины, в котором предусмотрено дополнительное определение механических характеристик с использованием ускоренных методов. Предложенный подход создает новые возможности для автоматизации мониторинга уплотнения почвы, что существенно улучшает качество земляных работ и может способствовать совершенствованию методов контроля и эффективности строительства лесных дорог.

Ключевые слова: уплотненный слой, плотность грунта, деформация почвы, сопротивление качению, прочностные характеристики грунтов

Ссылка для цитирования: Боровлев Ю.А., Козлов Д.Г., Скрыпников А.В., Сергеев А.С., Яровенко А.А. Контроль параметров процесса уплотнения грунтов земляного полотна лесовозных автомобильных дорог // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 4. С. 139–155.
DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-139-155

Успешность лесной отрасли тесно связана с развитостью системы лесовозных путей, поскольку ею определяются возможности доставки древесины конечному потребителю. Анализ характеристик лесных дорог, включая их тип, качество и текущее состояние, позволяет лесным хозяйствам прогнозировать их дальнейшую эксплуатацию в целях планирования объемов вырубki и роста прибыльности.

Наличие детальной информации о состоянии лесовозных путей позволяет оптимизировать логистику, сократить время и затраты на транспортировку древесины. Своевременное выявление участков, требующих ремонта или реконструкции, предотвращает возникновение аварийных ситуаций и обеспечивает бесперебойную работу лесозаготовительной техники. Кроме того, развитая сеть лесных дорог способствует более эффективному управлению лесными ресурсами в целом, обеспечивает доступ к отдаленным участкам леса для проведе-

ния лесовосстановительных работ, санитарных рубок и других мероприятий по уходу за лесом.

Инвестиции в развитие и поддержание лесовозных путей — это вклад в устойчивое развитие лесной отрасли. Качественная инфраструктура не только повышает рентабельность лесозаготовок, но и способствует сохранению экологического баланса лесных территорий.

Таким образом, комплексный подход к планированию и эксплуатации лесных дорог, основанный на анализе их характеристик и прогнозировании будущих потребностей, является ключевым фактором успешного функционирования лесного хозяйства [1–8].

Основой любой лесовозной автомобильной дороги служит земляное полотно. Многочисленные исследования свидетельствуют о том, что эксплуатационные характеристики как дорожного покрытия, так и всей дорожной конструкции напрямую зависят от комплекса свойств, определяющих устойчивость, надежность и срок службы этого основания.

Долговечность и прочность лесовозной дороги определяются качеством земляного полотна, что подтверждает множество научных работ. Выступая в роли несущей конструкции, полотно обеспечивает стабильность дорожной одежды и всей инженерной системы в целом.

Ключевым фактором обеспечения требуемых характеристик земляного полотна является его правильное проектирование и возведение. Необходимо учитывать геологические и гидрологические условия местности, тип грунтов, глубину залегания грунтовых вод и другие параметры. Ошибки, допущенные на этапе проектирования, могут привести к деформациям, просадкам и разрушению дорожного полотна в процессе эксплуатации.

Особое внимание следует уделять уплотнению грунта при строительстве земляного полотна. Недостаточное уплотнение приводит к снижению несущей способности и увеличению деформаций под воздействием нагрузок от лесовозного транспорта. Использование современных технологий и оборудования для уплотнения грунта позволяет значительно повысить качество земляного полотна и продлить срок его службы.

Для повышения устойчивости земляного полотна на сложных участках трассы применяют различные методы укрепления грунтов, в частности использование геосинтетических материалов, химическое закрепление грунтов, армирование и др. Выбор метода укрепления зависит от конкретных условий и требований к дорожной конструкции.

Регулярный мониторинг состояния земляного полотна и своевременное проведение ре-

монтных работ позволяют поддерживать его эксплуатационные характеристики на должном уровне. Необходимо контролировать уровень грунтовых вод, наличие деформаций и трещин, а также состояние дренажной системы. Предотвращение развития дефектов на ранних стадиях позволяет избежать дорогостоящих ремонтов и обеспечить безопасную эксплуатацию лесовозной дороги [9–14].

Сегодня существует несколько методик, предназначенных для оценки состояния лесовозных дорог в процессе эксплуатации. Каждый из этих методов предполагает анализ широкого спектра параметров и использует различные подходы к определению состояния дорожного покрытия. Они также учитывают особенности подготовки основания для укладки дорожной одежды.

Вместе с тем каждый метод имеет свои сильные и слабые стороны. Это разнообразие усложняет процесс работы и может оказывать влияние на точность и надежность оценки. Вследствие этого выбор оптимальной методики становится непростой задачей, требующей тщательного анализа и учета конкретных условий эксплуатации.

В связи с этим возникает необходимость в разработке унифицированной методики, которая бы аккумулировала лучшие результаты из практики существующих подходов. Такая методика должна быть гибкой, адаптируемой к различным условиям эксплуатации и обеспечивающей высокую степень достоверности результатов. Важно, чтобы она учитывала не только текущее состояние дорожного покрытия, но и прогнозировала его изменения в будущем, что позволит своевременно планировать ремонтные работы и избежать серьезных повреждений.

В процессе разработки унифицированной методики необходимо учитывать экономическую целесообразность ее применения. Затраты на проведение оценки не должны превышать выгоду от своевременного выявления дефектов и планирования ремонтных работ. Также важно, чтобы методика была простой в использовании и не требовала привлечения высококвалифицированных специалистов.

Ключевым аспектом при выборе или разработке методики является учет специфики лесовозных дорог, подвергающихся интенсивным нагрузкам от тяжелой техники и воздействию неблагоприятных климатических факторов, поэтому методика должна предусматривать устойчивость к этим воздействиям и обеспечивать надежную оценку состояния дорожного покрытия в течение всего срока эксплуатации.

В конечном итоге выбор оптимальной методики оценки состояния лесовозных дорог — это сложный и емкий процесс, требующий глубокого анализа известных к настоящему времени подходов, учета конкретных условий эксплуатации и экономической целесообразности применения. Только таким образом можно обеспечить эффективное управление состоянием дорожной сети и минимизировать затраты на ее содержание [15–25].

Цель работы

Цель работы — проведение анализа параметров уплотнения грунта при строительстве лесных дорог, в зависимости от изменения давления воздуха в шине, которое влияет непосредственно на процесс уплотнения грунта и является основополагающим фактором контроля эффективности строительных процессов.

Материалы и методы

Анализ расчетных схем взаимодействия пневматических колес с поверхностью качения, приведенный ранее [6, 10], позволил составить классификацию расчетных схем и показать область их применения. Наиболее распространена расчетная схема пневматик — как безмоментная оболочка, поэтому она принята для дальнейших исследований [26–29].

Пневматическое колесо представляется как безмоментная оболочка. После рассмотрения системы сил, действующих на участок оболочки в зоне контакта с грунтом, было составлено общее уравнение деформирования (рис. 1) в виде

$$-\frac{N}{R^2} \cdot \frac{d^2 \omega}{d\varphi^2} + K\omega + P_b - q = 0, \quad (1)$$

где N — растягивающее усилие в оболочке;

R — радиус оболочки; ω — радиальная деформация оболочки;

φ — угол от вертикальной оси, проходящей через центр оболочки, до элементарного объема;

P_b — давление воздуха в шине;

K — коэффициент жесткости оболочки;

q — реакция опорной поверхности.

Силу q , с которой поверхность дороги воздействует на колесо, можно описать по-разному. Применяемые ранее формулы, описывающие эту силу, предполагали, что колесо и поверхность взаимодействуют статически, т. е. если бы колесо было неподвижным или медленно двигалось. Однако для пневматических колес на высокой скорости оно неприменимо.

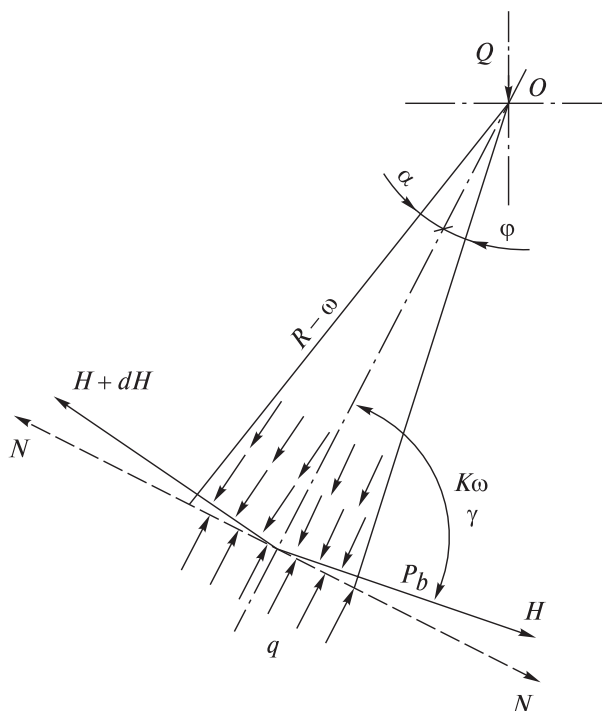


Рис. 1. Схема сил, действующих на участок оболочки: O — центр оболочки; Q — равнодействующая сила распределенной нагрузки; H — толщина слоя; N — растягивающее усилие в оболочке; K — коэффициент жесткости оболочки; q — реакция опорной поверхности; R — радиус оболочки; P_b — давление воздуха в шине; ω — радиальная деформация оболочки; φ — угол от вертикальной оси, проходящей через центр оболочки, до элементарного объема

Fig. 1. Scheme of forces acting on the shell section: O — center of the shell; Q — resultant force of the distributed load; H — thickness of the layer; N — tensile force in the shell; K — stiffness coefficient of the shell; q — reaction of the support surface; R — radius of the shell; P_b — air pressure in the tire; ω — radial deformation of the shell; φ — angle from the vertical axis passing through the center of the shell, up to an elementary volume

С увеличением скорости движения сила, действующая на колесо от дороги, возрастает, поэтому в формулу для расчета реакции опорной поверхности следует добавить такую величину, как скорость деформации поверхности и шины при движении. Другими словами, динамическое взаимодействие колеса с дорогой на скорости существенно отличается от статического и требует более сложной модели, включающей в себя скорость движения.

Реакцию опорной поверхности описывает выражение

$$q = E \frac{h}{H} + \eta \frac{1}{H} \cdot \frac{dh}{dt}, \quad (2)$$

где E — модуль деформации поверхности качения;

h — деформация при проходе колеса;

H — толщина слоя;

η — коэффициент вязкости;

$\frac{dh}{dt}$ — скорость деформирования.

Введение значения реакции опорной поверхности в уравнении (1) позволяет более глубоко анализировать взаимодействие грунтов с нагрузками, принимая во внимание как скорость деформирования, так и толщину слоя. В зависимости (2) первый член представляет собой структурное сопротивление, второй — вязкое. Таким образом, зависимость (2) в целом иллюстрирует динамику взаимодействия нагрузки с грунтовым слоем. Следовательно, в уравнение (1) вместо q можно подставить выражение из зависимости (2).

Величина h определяется исходя из геометрических соображений (рис. 2).

На основании рис. 2 величину h можно определить из выражения

$$h = R \cos \varphi - R \cos \varphi_0 - \omega. \quad (3)$$

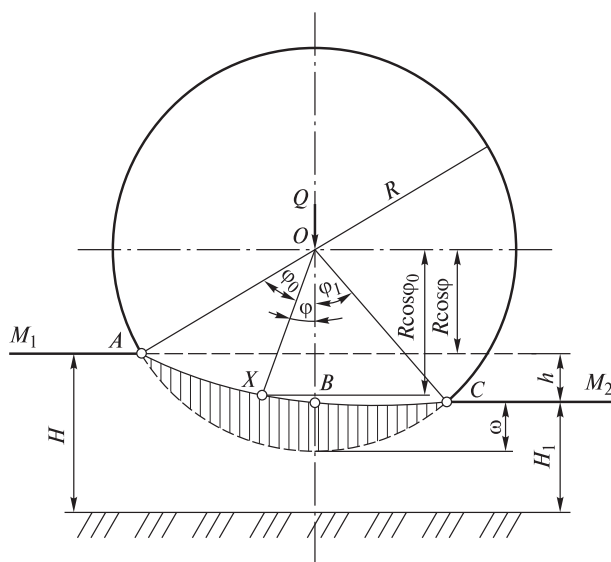


Рис. 2. Геометрическое представление определения величины h : h — величина деформации при проходе колеса; ω — радиальная деформация оболочки; H — толщина слоя до деформации; H_1 — толщина слоя после деформации; R — радиус оболочки; A , X , B , C — характерные точки дуги контакта; φ — угол от вертикальной оси, проходящей через центр оболочки, до элементарного объема

Fig. 2. Geometric representation of the value h determination: h — amount of deformation during the passage of the wheel; ω — radial deformation of the shell; H — thickness of the layer before deformation; H_1 — thickness of the layer after deformation; R — radius of the shell; A , X , B , C are the characteristic points of the contact arc; φ — angle from the vertical axis passing through the center of the shell to the elementary volume

После дифференцирования величины деформации h по времени t , получаем

$$\begin{aligned} \frac{dh}{dt} &= -R \sin \varphi \frac{d\varphi}{dt} - \frac{d\omega}{dt} = \\ &= -R \sin \varphi \frac{d\varphi}{dt} - \frac{d\omega}{dt} \cdot \frac{d\varphi}{d\varphi}. \end{aligned} \quad (4)$$

Зная, что $\frac{d\varphi}{dt}$ — это угловая скорость, которую можно выразить через линейную $\frac{v}{R} = \frac{d\varphi}{dt}$, запишем окончательное значение для скорости деформирования $\frac{dh}{dt}$

$$\frac{dh}{dt} = -v \sin \varphi - \frac{v}{R} \frac{d\omega}{d\varphi}. \quad (5)$$

Подставив далее значения деформации h и скорости деформирования $\frac{dh}{dt}$ в уравнение (2), получаем выражение для реакции q с использованием параметров поверхности качения и параметров пневматического колеса.

$$\begin{aligned} q &= \frac{E}{H} (R \cos \varphi - R \cos \varphi_0 - \omega) + \\ &+ \frac{\eta}{H} \left(-v \sin \varphi - \frac{v}{R} \frac{d\omega}{d\varphi} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Значение реакции q опорной поверхности подставляем в уравнение (1) и получаем

$$\begin{aligned} &-\frac{N}{R^2} \cdot \frac{d^2 \omega}{d\varphi^2} + K \omega + P_b - \\ &-\frac{E}{H} (R \cos \varphi - R \cos \varphi_0 - \omega) + \\ &+ \frac{\eta}{H} \left(-v \sin \varphi - \frac{v}{R} \frac{d\omega}{d\varphi} \right) = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Преобразуя выражение (7), получаем

$$\begin{aligned} &\frac{d^2 \omega}{d\varphi^2} - \frac{\eta R v}{HN} \cdot \frac{d\omega}{d\varphi} - \frac{R^2}{N} \left(K + \frac{E}{H} \right) \omega = \\ &= \frac{\eta R^2}{HN} v \cdot \sin \varphi \frac{ER^2}{HN} \cdot \cos \varphi + \frac{R^2}{N} \left(P_b + \frac{E}{H} \cos \varphi_0 \right). \end{aligned} \quad (8)$$

После замены коэффициентов уравнение (8) принимает вид

$$\frac{d^2 \omega}{d\varphi^2} - \alpha \frac{d\omega}{d\varphi} - \beta \omega = \gamma \sin \varphi - v \cos \varphi + \lambda, \quad (9)$$

где коэффициенты α , β , γ , v , λ являются сложными функциями от параметров поверхности качения и пневматического колеса, они определяются по уравнениям:

$$\alpha = \frac{\eta R v}{HN}; \quad \beta = \frac{R^2}{N} \left(K + \frac{E}{H} \right); \quad \gamma = \frac{\eta R^2 v}{HN};$$

$$v = \frac{ER^2}{HN}; \quad \lambda = \frac{R^2}{N} \left(P_b + \frac{E}{H} \cos \varphi_0 \right). \quad (10)$$

Решая уравнение (6), получаем выражение для определения радиальной деформации оболочки ω в крайних точках области деформирования основания

$$\omega = C_1 e^{m_1 \varphi} + C_2 e^{m_2 \varphi} + \omega^*, \quad (11)$$

где e — экспонента;

$m_{1,2}$ — области деформирования основания

$$m_{1,2} = \frac{a}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \beta}. \quad (12)$$

Частное решение ω^* имеет вид

$$\omega^* = a \sin \varphi + b \cos \varphi + c. \quad (13)$$

Подставляя в уравнение (9) значения ω , $\frac{d\omega}{d\varphi}$, $\frac{d^2\omega}{d\varphi^2}$, получаем

$$\begin{aligned} & -a \sin \varphi - b \cos \varphi - \alpha a \cos \varphi + \\ & + \beta d \sin \varphi - \beta a \sin \varphi - \beta b \cos \varphi - \beta c = \\ & = \gamma \sin \varphi - v \cos \varphi + \lambda. \end{aligned} \quad (14)$$

Находим a, b, c из условия равенства коэффициентов при тригонометрических функциях и свободном члене

$$\left. \begin{aligned} -a + bd - \beta a &= \gamma \\ -b - ad - \beta b &= -v \\ -\beta c &= \lambda \end{aligned} \right\}. \quad (15)$$

Решая систему уравнений, находим коэффициенты a, b, c :
для общего случая:

$$a = \frac{vd - \gamma(1 + \beta)}{a^2 + (1 + \beta)^2}; \quad (16)$$

$$b = \frac{v(1 + \beta) + \gamma d}{a^2 + (1 + \beta)^2}; \quad (17)$$

$$c = -\frac{\lambda}{\beta}; \quad (18)$$

для общего случая при $V = 0, \eta = 0$:

$$a = 0; \quad b = \frac{v}{1 + \beta}; \quad c = -\frac{\lambda}{\beta}. \quad (19)$$

Решение уравнения (8) имеет вид

$$\omega = C_1 e^{m_1 \varphi} + C_2 e^{m_2 \varphi} + a \sin \varphi + b \cos \varphi + c. \quad (20)$$

где C_1 и C_2 — константы.

Граничные условия, необходимые для определения констант, находим в характерных точках дуги контакты A и B (см. рис. 2).

Первое граничное условие. В точке B первая производная равна 0:

$$\frac{d\omega}{d\varphi} = 0 \quad \text{при } \varphi = 0. \quad (21)$$

Продифференцировав уравнение (20), получаем

$$\frac{d\omega}{d\varphi} = C_1 e^{m_1 \varphi} + C_2 e^{m_2 \varphi} + a \cos \varphi + b \sin \varphi; \quad (22)$$

при $\varphi = 0$ имеем

$$C_1 m_1 + C_2 m_2 + a = 0. \quad (23)$$

Второе граничное условие. В точке A при $\varphi = \varphi_0, \omega = \omega_0$. В ряде случаев в точке $A \omega = \omega_0 = 0$, что особенно характерно для первых проходов.

Тогда, подставив в уравнение (20) значение $\omega = \omega_0$ при $\varphi = \varphi_0$, получаем

$$\begin{aligned} \omega_0 &= C_1 e^{m_1 \varphi_0} + C_2 e^{m_2 \varphi_0} + \\ &+ a \sin \varphi_0 + b \cos \varphi_0 + c. \end{aligned} \quad (24)$$

Решая совместно системы уравнений (23) и (24), находим значения констант C_1 и C_2 для граничных условий:

$$C_1 = \frac{am_2 \sin \varphi_0 + bm_2 \cos \varphi_0 + cm_2 - \omega_0 m_2 - ae^{m_2 \varphi_0}}{m_1 e^{m_2 \varphi_0} - m_2 e^{m_2 \varphi_0}}; \quad (25)$$

$$C_2 = \frac{am_1 \sin \varphi_0 + bm_1 \cos \varphi_0 + cm_1 - \omega_0 m_1 - ae^{m_1 \varphi_0}}{m_2 e^{m_1 \varphi_0} - m_1 e^{m_2 \varphi_0}}. \quad (26)$$

Для случая $\omega_0 = 0$:

$$C_1 = \frac{am_2 \sin \varphi_0 + bm_2 \cos \varphi_0 + cm_2 - ae^{m_2 \varphi_0}}{m_1 e^{m_2 \varphi_0} - m_2 e^{m_1 \varphi_0}}; \quad (27)$$

$$C_2 = \frac{am_1 \sin \varphi_0 + bm_1 \cos \varphi_0 + cm_1 - ae^{m_1 \varphi_0}}{m_2 e^{m_1 \varphi_0} - m_1 e^{m_2 \varphi_0}}. \quad (28)$$

В окончательном варианте уравнение (20) принимает вид

$$\begin{aligned} \omega &= \left(\frac{am_2 \sin \varphi_0 + bm_2 \cos \varphi_0 + cm_2 - ae^{m_2 \varphi_0}}{m_1 e^{m_2 \varphi_0} - m_2 e^{m_1 \varphi_0}} \right) e^{m_1 \varphi} + \\ &+ \left(\frac{am_1 \sin \varphi_0 + bm_1 \cos \varphi_0 + cm_1 - ae^{m_1 \varphi_0}}{m_2 e^{m_1 \varphi_0} - m_1 e^{m_2 \varphi_0}} \right) e^{m_2 \varphi} + \\ &+ a \sin \varphi + b \cos \varphi + c. \end{aligned} \quad (29)$$

Коэффициенты a, b, c , соответственно, зависят от параметров пневматического колеса и имеют следующий вид:

для общего случая:

$$a = \frac{R^2 \eta v (ER^2 - (HN + R^2 (KH + E)))}{\eta^2 R v^2 + (HN + R^2 (KH + E))^2}; \quad (30)$$

$$b = \frac{R^3 (E (HN + R^2 (KH + E)) + \eta^2 v^2)}{\eta^2 R^2 v^2 + (HN + R^2 (KH + E))^2}; \quad (31)$$

$$c = -\frac{P_b H + ER \cos \varphi_0}{KH + E}; \quad (32)$$

для случая $v = 0$, $\eta = 0$:

$$a' = 0; \quad (33)$$

$$b' = \frac{R^3 E}{HN + R^2 (KH + E)}; \quad (34)$$

$$c' = -\frac{P_b H + ER \cos \varphi_0}{KH + E}. \quad (35)$$

Коэффициенты a , b зависят от вязких свойств уплотняемого грунта и скорости передвижения, в то время как коэффициент c зависит от давления воздуха в шине P_b .

Для случая, когда коэффициент вязкости $\eta = 0$, закон деформирования пневматического колеса принимает вид

$$\omega = \left(\frac{b' m_2 \cos \varphi_0 + c' m_2}{m_1 e^{m_2 \varphi_0} - m_2 e^{m_1 \varphi_0}} \right) e^{m_1 \varphi} + \left(\frac{b' m_1 \cos \varphi_0 + c' m_1}{m_2 e^{m_1 \varphi_0} - m_1 e^{m_2 \varphi_0}} \right) e^{m_2 \varphi} + b' \cos \varphi + c'. \quad (36)$$

Изменение радиальной деформации пневматического колеса при каждом обороте описывает косинусоидальная кривая. Формулы (29) и (36) позволяют вычислить значение этой деформации в любой точке зоны контакта колеса с поверхностью, учитывая при этом характеристики обоих контактирующих тел. В отличие от ранее предложенных моделей эти формулы учитывают такие важные факторы, как вязкость материала, скорость деформации и толщина слоя, подвергающегося сжатию, что обеспечивает большую точность и реалистичность.

Описанная модель демонстрирует большую точность и комплексность подхода к расчету деформации пневматического колеса по сравнению с существующими моделями вследствие учета ключевых физических параметров, влияющих на процесс деформации.

Из всех значений радиальной деформации оболочки ω наибольший интерес вызывает $\omega_{\max}$, которое вводится в расчеты.

Максимальное значение радиальной деформации пневматического колеса $\omega_{\max}$ можно получить, если $\varphi = 0$:

для общего случая из уравнения (29):

$$\omega_{\max} = \frac{a m_2 \sin \varphi_0 + b m_2 \cos \varphi_0 + c m_2 - a e^{m_2 \varphi_0}}{m_1 e^{m_2 \varphi_0} - m_2 e^{m_1 \varphi_0}} + \frac{a m_1 \sin \varphi_0 + b m_1 \cos \varphi_0 + c m_1 - a e^{m_1 \varphi_0}}{m_2 e^{m_1 \varphi_0} - m_1 e^{m_2 \varphi_0}} + b + c; \quad (37)$$

для случая $\eta = 0$ из уравнения (36):

$$\omega_{\max} = \frac{b' m_2 \cos \varphi_0 + c' m_2}{m_1 e^{m_2 \varphi_0} - m_2 e^{m_1 \varphi_0}} + \frac{b' m_1 \cos \varphi_0 + c' m_1}{m_2 e^{m_1 \varphi_0} - m_1 e^{m_2 \varphi_0}} + b' + c'. \quad (38)$$

Полученные уравнения (29) и (36) в дальнейшем находят применение для решения двух задач:

1) определение потребной силы тяги и коэффициента сопротивления качению;

2) определение потребного количества проходов при уплотнении грунта и контроля уплотнения.

Поскольку большинство пневматических колес как у скрепера, так и у катка являются ведомыми, то решение может быть получено для ведомого колеса. В случае необходимости решения задачи для ведущих колес следует учитывать значение крутящего момента, приложенного к колесу. Однако, как отмечают исследователи, его действие изменяет плотность не более чем на 10 %, поэтому существенного изменения величины ω не произойдет.

При решении первой задачи потребная сила тяги и коэффициент сопротивления качению определяются следующим образом. На элементарную дугу контакта (рис. 3) $ds = R d\varphi$ действует реакция опоры q по выражению (2), после подстановки в которое значений h и $\frac{dh}{dt}$ оно будет иметь вид уравнения (6), в которое вместо ω и $\frac{d\omega}{d\varphi}$ подставляются значения из уравнения (20) и его производной:

$$q = \frac{E}{H} (R \cos \varphi - R \cos \varphi_0 - \omega) + \frac{\eta}{H} \left(-v \sin \varphi - \frac{v}{R} \frac{d\omega}{d\varphi} \right) = \frac{E}{H} (R \cos \varphi - R \cos \varphi_0 - C_1 e^{m_1 \varphi} - C_2 e^{m_2 \varphi} - a \sin \varphi - b \cos \varphi - c) + \frac{\eta}{H} \left(-v \sin \varphi - \frac{v}{R} C_1 m_1 e^{m_1 \varphi} - \frac{v}{R} C_2 m_2 e^{m_2 \varphi} - \frac{v}{R} a \cos \varphi + \frac{v}{R} b \sin \varphi \right). \quad (39)$$

Исходя из рис. 3, имеем:

$$q' = q \cos \varphi; \quad (40)$$

$$q'' = q \sin \varphi. \quad (41)$$

Для нахождения силы тяги F и равнодействующей силы распределенной нагрузки Q необходимо воспользоваться уравнениями, выведенными из условия равновесия пневматического колеса в любой отрезок времени:

$$F = \sum_{\cup AB} q''; \quad Q = \sum_{\cup AB} q' + \sum_{\cup BC} q'. \quad (42)$$

Проинтегрируем выражение с учетом значений (42), находим силу тяги F :

$$F = B \int_{\varphi_0=0}^{\varphi=0} q \sin \varphi \cdot R d\varphi = BR \int_{\varphi_0=0}^{\varphi=0} q \sin \varphi \cdot d\varphi =$$

$$= BR \int_{\varphi_0=0}^{\varphi=0} \left[\frac{E}{H} (R \cos \varphi - R \cos \varphi_0 - C_1 e^{m_1 \varphi} - C_2 e^{m_2 \varphi} - a \sin \varphi - b \cos \varphi - c) + \right. \quad (43)$$

$$\left. + \frac{\eta}{H} (-v \sin \varphi - \frac{v}{R} m_1 C_1 e^{m_1 \varphi} - \frac{v}{R} m_2 C_2 e^{m_2 \varphi} - \frac{v}{R} a \cos \varphi + \frac{v}{R} b \sin \varphi) \right] \sin \varphi \cdot d\varphi;$$

$$F = BR^2 \frac{E}{H} \int_{\varphi=\varphi_0}^{\varphi=0} \cos \varphi \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi - BR \frac{E}{H} C_1 \int_{\varphi=\varphi_0}^{\varphi=0} e^{m_1 \varphi} \sin \varphi \cdot d\varphi -$$

$$- BR^2 \frac{E}{H} \cos \varphi_0 \int_{\varphi=\varphi_0}^{\varphi=0} \sin \varphi \cdot d\varphi - BRC_2 \frac{E}{H} \int_{\varphi=\varphi_0}^{\varphi=0} e^{m_2 \varphi} \sin \varphi \cdot d\varphi - \quad (44)$$

$$- BRa \frac{E}{H} m_2 C_2 \int_{\varphi=\varphi_0}^{\varphi=0} e^{m_2 \varphi} \sin \varphi \cdot d\varphi - \frac{\eta}{H} vBa \int_{\varphi=\varphi_0}^{\varphi=0} \cos \varphi \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi +$$

$$+ Bbv \frac{\eta}{H} \int_{\varphi=\varphi_0}^{\varphi=0} \sin^2 \varphi \cdot d\varphi.$$

После приведения подобных членов получаем:

$$F = \left(BR^2 \frac{E}{H} - BRb \frac{E}{H} - vBa \frac{\eta}{H} \right) \int_{\varphi=\varphi_0}^{\varphi=0} \cos \varphi \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi - \left(BR^2 \frac{E}{H} \cos \varphi_0 + \right.$$

$$+ BR \frac{E}{H} C_1 \int_{\varphi=\varphi_0}^{\varphi=0} \sin \varphi \cdot d\varphi - \left(BR \frac{E}{H} C_1 + B\eta \frac{v}{H} m_1 C_1 \right) \int_{\varphi=\varphi_0}^{\varphi=0} e^{m_1 \varphi} \sin \varphi \cdot d\varphi - \quad (45)$$

$$- \left(BRC_2 \frac{E}{H} + \frac{\eta}{H} Bvm_2 C_2 \right) \int_{\varphi=\varphi_0}^{\varphi=0} e^{m_2 \varphi} \sin \varphi \cdot d\varphi - \left(BRa \frac{E}{H} + \frac{\eta}{H} BRv - \right.$$

$$\left. - Bb \frac{\eta}{H} v \right) \int_{\varphi=\varphi_0}^{\varphi=0} \sin^2 \varphi \cdot d\varphi.$$

Проведем тождественные преобразования выражения (45) и получим его в виде

$$F = \Delta_1 \int_{\varphi_0}^0 \frac{\sin^2 \varphi}{2} + \Delta_2 \int_{\varphi_0}^0 \cos \varphi - \Delta_3 \int_{\varphi_0}^0 \frac{e^{m_1 \varphi}}{m_1^2 + 1} (m_1 \sin \varphi - \cos \varphi) -$$

$$- \Delta_4 \int_{\varphi_0}^0 \frac{e^{m_2 \varphi}}{m_2^2 + 1} (m_2 \sin \varphi - \cos \varphi) - \Delta_5 \int_{\varphi_0}^0 \left(\frac{\varphi}{2} - \frac{\sin 2\varphi}{4} \right), \quad (46)$$

где $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4, \Delta_5$ соответственно равны:

$$\Delta_1 = \left(BR^2 \frac{E}{H} - BRb \frac{E}{H} - vBa \frac{\eta}{H} \right); \quad (47)$$

$$\Delta_2 = \left(BR^2 \frac{E}{H} \cos \varphi_0 + BR \frac{E}{H} C_1 \right); \quad (48)$$

$$\Delta_3 = \left(BR \frac{E}{H} C_1 + B\eta \frac{v}{H} m_1 C_1 \right); \quad (49)$$

$$\Delta_4 = \left(BRC_2 \frac{E}{H} + \frac{\eta}{H} Bvm_2 C_2 \right); \quad (50)$$

$$\Delta_5 = \left(BRa \frac{E}{H} + \frac{\eta}{H} BRv - Bb \frac{\eta}{H} v \right), \quad (51)$$

где B — ширина пневматической шины.

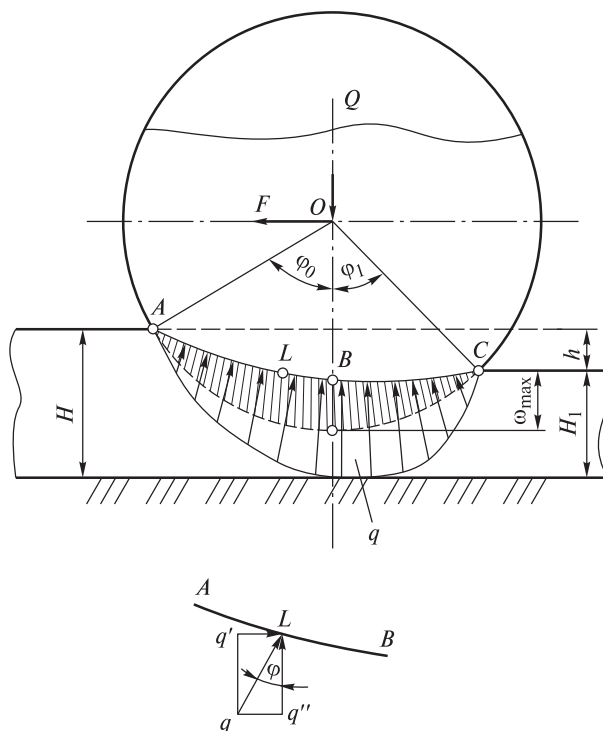


Рис. 3. Элементарная дуга контакта

Fig. 3. Elementary arc of contact

После подстановки пределов интегрирования получаем

$$F = \Delta_1 \frac{\sin^2 \varphi_0}{2} + \Delta_2 (\cos \varphi_0 - 1) -$$

$$- \sum_{n=1}^2 \Delta_{n+2} \left[\frac{e^{m_n \varphi_0}}{m_n^2 + 1} (m_n \sin \varphi_0 - \cos \varphi_0) + \frac{1}{m_n^2 + 1} \right] - \quad (52)$$

$$- \Delta_5 \left(\frac{\varphi_0}{2} - \frac{\sin 2\varphi_0}{4} \right).$$

Для определения равнодействующей силы распределенной нагрузки Q воспользуемся уравнением (42), переходя в пределе к интегрированию

$$Q = B \int_{\varphi=\varphi_0}^{\varphi=0} q \cos \varphi \cdot R d\varphi + B \int_{\varphi=0}^{\varphi=\varphi_1} q R \cdot d\varphi. \quad (53)$$

Вместо q подставляем его значение, выраженное через величину сжатия пневматического колеса (42):

$$Q = BR \int_{\varphi=\varphi_0}^{\varphi=0} \left[\frac{E}{H} (R \cos \varphi - R \cos \varphi_0 - C_1 e^{m_1 \varphi} - C_2 e^{m_2 \varphi} - a \sin \varphi - \right.$$

$$- b \cos \varphi - c) + \frac{\eta}{H} \left(-v \sin \varphi - \frac{v}{R} m_1 C_1 e^{m_1 \varphi} - \frac{v}{R} m_2 C_2 e^{m_2 \varphi} - \frac{v}{R} a \cos \varphi + \right.$$

$$+ \frac{v}{R} b \sin \varphi) \left. \right] \cos \varphi \cdot d\varphi + BR \int_{\varphi=0}^{\varphi=\varphi_1} \left[\frac{E}{H} (R \cos \varphi - R \cos \varphi_0 - C_1 e^{m_1 \varphi} - C_2 e^{m_2 \varphi} - \right.$$

$$- a \sin \varphi - b \cos \varphi + \frac{v}{R} b \sin \varphi) \left. \right] d\varphi. \quad (54)$$

После приведения подобных членов и подстановки коэффициентов $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4, \Delta_5$ получаем:

$$Q = \Delta_1 \left(\int_{\varphi_0}^0 \cos^2 \varphi \cdot d\varphi + \int_0^{\varphi_1} \cos \varphi \cdot d\varphi \right) - \Delta_2 \left(\int_{\varphi_0}^0 \cos \varphi \cdot d\varphi + \int_0^{\varphi_1} d\varphi \right) - \Delta_3 \left(\int_{\varphi_0}^0 e^{m_1 \varphi} \cos \varphi \cdot d\varphi + \int_0^{\varphi_1} e^{m_1 \varphi} d\varphi \right) - \Delta_4 \left(\int_{\varphi_0}^0 e^{m_2 \varphi} \cos \varphi \cdot d\varphi + \int_0^{\varphi_1} e^{m_2 \varphi} d\varphi \right) - \Delta_5 \left(\int_{\varphi_0}^0 \sin \varphi \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi + \int_0^{\varphi_1} \sin \varphi \cdot d\varphi \right); \quad (55)$$

$$Q = \Delta_1 \left(\int_{\varphi_0}^0 \left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\sin 2\varphi}{4} \right) + \int_{\varphi_0=0}^{\varphi_1} \sin \varphi \right) - \Delta_2 \left(\int_{\varphi_0}^0 \sin \varphi + \int_0^{\varphi_1} \varphi \right) - \Delta_3 \left(\int_{\varphi_0}^0 \left(\frac{e^{m_1 \varphi}}{m_1^2 + 1} (m_1 \cos \varphi + \sin \varphi) \right) + \int_{\varphi_0=0}^{\varphi_1} \frac{1}{m_1} e^{m_1 \varphi} \right) - \Delta_4 \left(\int_{\varphi_0}^0 \left(\frac{e^{m_2 \varphi}}{m_2^2 + 1} (m_2 \cos \varphi + \sin \varphi) \right) + \int_{\varphi_0=0}^{\varphi_1} \frac{1}{m_2} e^{m_2 \varphi} \right) - \Delta_5 \left(\int_{\varphi_0}^0 \frac{\sin^2 \varphi}{2} + \int_0^{\varphi_1} (-\cos \varphi) \right). \quad (56)$$

После подстановки пределов имеем:

$$Q = \Delta_1 \left(\frac{\varphi_0}{2} + \frac{\sin 2\varphi_0}{4} - \sin \varphi_1 \right) - \Delta_2 (\sin \varphi_0 - \varphi_1) - \Delta_3 \left(\left(\frac{e^{m_1 \varphi_0}}{m_1^2 + 1} (m_1 \cos \varphi_0 + \sin \varphi_0) - \frac{m_1}{m_1^2 + 1} \right) + \frac{1}{m_1} - \frac{e^{m_1 \varphi_1}}{m_1} \right) - \Delta_4 \left(\frac{e^{m_2 \varphi_0}}{m_2^2 + 1} (m_2 \cos \varphi_0 + \sin \varphi_0) - \frac{m_2}{m_2^2 + 1} + \frac{1}{m_2} - \frac{e^{m_2 \varphi_1}}{m_2} \right) - \Delta_5 \left(\frac{\sin^2 \varphi_0}{2} - 1 + \cos \varphi_1 \right). \quad (57)$$

Как видно из уравнений (52) и (57), необходимая сила тяги F и равнодействующая сила распределенной нагрузки Q зависят от параметров качения, а также от характеристик пневматического колеса, что позволяет решить поставленную задачу, учитывая скорость перемещения пневматической шины и вязкостные свойства почвогрунта.

Соотношение между углами φ_0 и φ_1 может быть найдено следующим образом (рис. 4): при первом проходе $\frac{\varphi_1}{\varphi_0} = 0$; поскольку $\varphi_1 = 0$; при последнем проходе $\frac{\varphi_1}{\varphi_0} = 1$; поскольку $\varphi_1 = \varphi_0$.

Тогда

$$\frac{\varphi_1}{\varphi_0} = a'' + b'' \lg n; \quad a'' = 0; \quad b'' = \frac{1}{\lg n}. \quad (58)$$

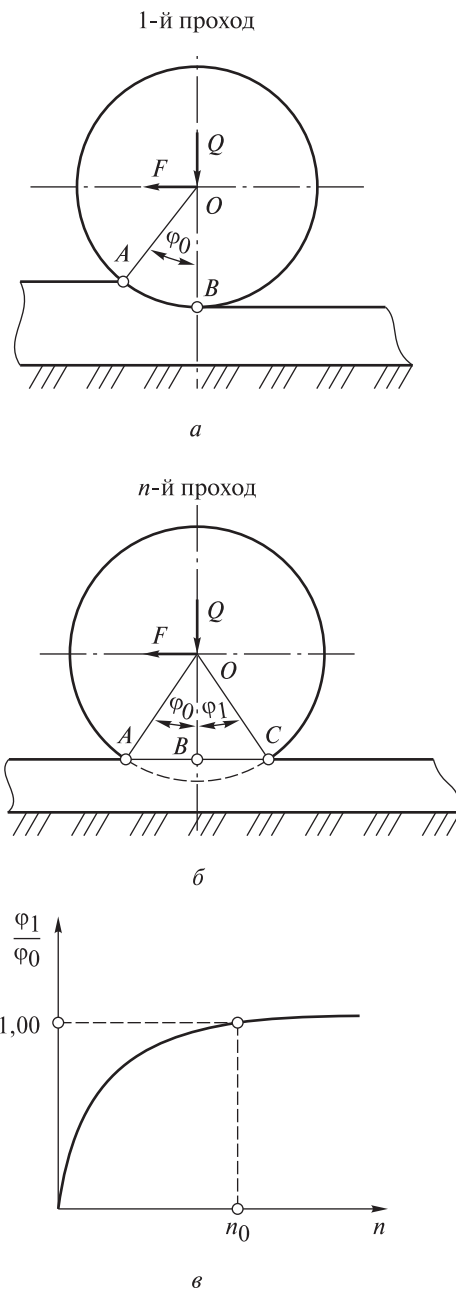


Рис. 4. Зависимость силы тяги F и равнодействующей силы распределенной нагрузки Q от параметров пневматического колеса и параметров качения: а — первый проход; б — n -й проход; в — зависимость соотношения углов φ_0 и φ_1 от количества проходов

Fig. 4. Dependence of draft force F and the resultant force of the distributed load Q on the parameters of the pneumatic wheel and rolling parameters: а — first pass; б — n -pass; в — dependence of the ratio of angles φ_0 and φ_1 on the number of passes

По значениям F и Q (52) и (55) можно найти коэффициент сопротивления качению

$$f = \frac{F}{Q}. \quad (59)$$

Отметим, что чем больше вязкое сопротивление грунта и скорость передвижения машин, тем должно быть больше значение силы тяги для передвижения машины по грунту.

При взаимодействии пневматического колеса с уплотняемым слоем происходят деформации как пневматического колеса, так и уплотняемого слоя. Величина деформаций пневматического колеса и уплотняемого слоя зависит от физико-механических свойств контактирующих тел. Поскольку в настоящее время имеются два основных типа пневматических колес с постоянным и переменным давлением воздуха в шине, то схемы процесса деформирования системы «колесо — грунт» будут существенно различны. Ниже представлены две схемы деформирования пневматических колес, которые положены в основу контроля уплотнения (рис. 5).

Схема деформирования пневматического колеса с фиксированным давлением предполагает относительно постоянную площадь контакта шины с почвой. При возрастании нагрузки увеличивается глубина вдавливания колеса в грунт, что приводит к увеличению сопротивления качению и снижению тяговых характеристик. Уплотнение почвы происходит преимущественно в вертикальном направлении под воздействием статического давления.

В отличие от этого схема деформирования колеса с изменяемым давлением позволяет адаптировать площадь контакта шины с почвой в зависимости от условий движения. При снижении давления увеличивается площадь контакта, что уменьшает удельное давление на грунт и снижает его уплотнение. Это особенно важно при работе на рыхлых и влажных почвах, где требуется минимальное воздействие на структуру грунта.

Контроль уплотнения почвы с использованием пневматических колес подразумевает оптимизацию давления в шинах и выбор геометрических параметров колеса (ширины, диаметра). Современные системы управления позволяют автоматически регулировать давление в шинах в зависимости от нагрузки и типа почвы, обеспечивая минимальное воздействие на грунт при сохранении тяговых характеристик.

Исследования в области снижения уплотнения почвы при взаимодействии с пневматическими колесами направлены на разработку новых конструкций шин и систем управления, позволяющих минимизировать негативное воздействие на агроэкосистему.

При уплотнении грунта пневматическими колесами с постоянным давлением воздуха в шине (см. рис. 5) первый проход характеризуется максимальной деформацией уплотняемого слоя

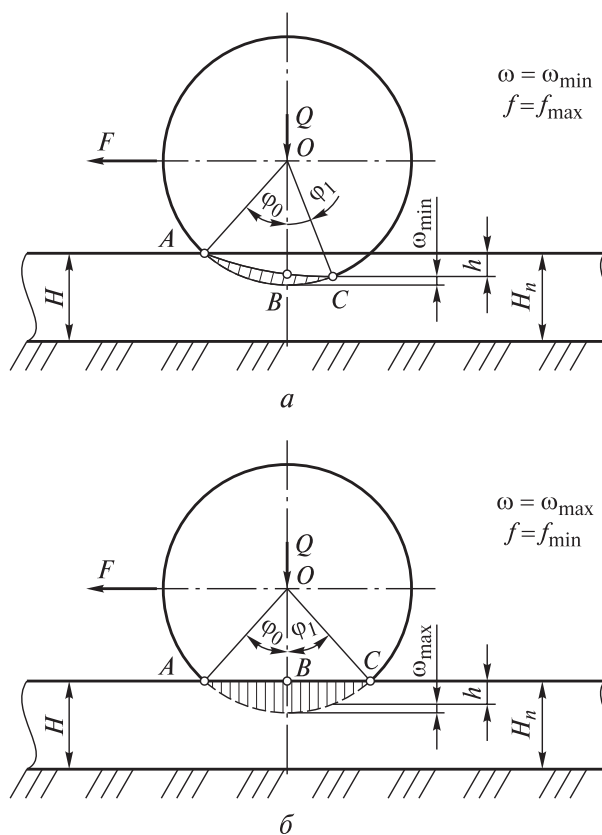


Рис. 5. Схемы деформирования пневматических колес: а — первый проход пневматической шины; б — последний проход пневматической шины

Fig. 5. Schemes of pneumatic wheel deformation: a — first pass of pneumatic tyre; б — last pass of pneus

и минимальной деформацией пневматического колеса. Считается, что колеса с высоким давлением воздуха в шине при первых проходах работают как жесткие вальцы, не деформируясь. Коэффициент сопротивления качению при первом проходе максимальный, а скорость передвижения самая малая. Последующие проходы пневматического колеса по одному и тому же месту характеризуются увеличением деформаций пневматического колеса и уменьшением деформаций поверхности качения.

Теоретические разработки А.К. Бируля [36] подчеркивают логарифмический характер зависимости величины деформаций уплотняемого слоя и объемного веса скелета грунта от количества проходов пневматического колеса. Следует отметить, что коэффициент сопротивления качению также уменьшается от прохода к проходу по логарифмической зависимости. Исследования Н.А. Калужского [37], положили в основу контроля уплотнения грунтов и щебеночных слоев жесткобарабанными катками именно это явление.

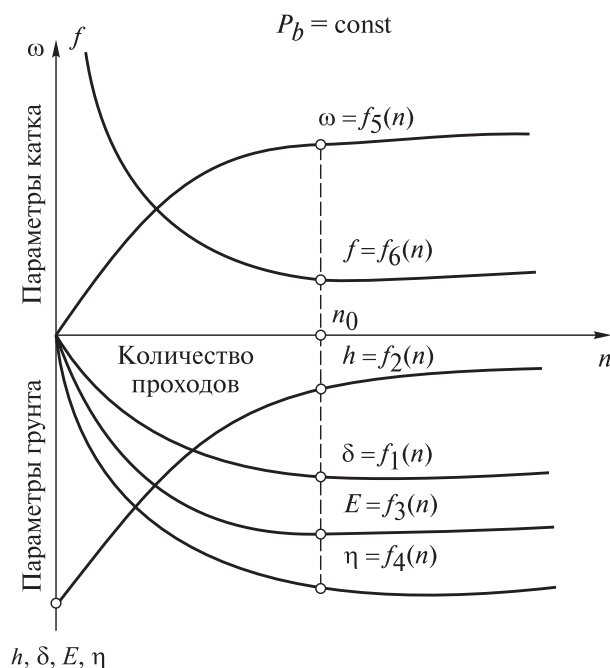


Рис. 6. Графическое представление процесса уплотнения грунта и деформирования пневматического колеса
Fig. 6. Graphical representation of soil compaction and pneumatic wheel deformation

Последний проход пневматического колеса совершается по уплотненному грунтовому слою, модуль деформации которого увеличился по сравнению с первым проходом в 10...15 раз. При последнем проходе деформация пневматического колеса максимальная, в то же время деформация уплотняемого слоя будет минимальной и упругой по отношению к уплотнителю. Практически последний проход характеризуется наличием только упругих деформаций грунтового слоя. Плотность грунта достигает максимального значения для данного типа пневматического колеса и нагрузки. Коэффициент сопротивления качению стабилизируется и остается постоянным для всех последующих проходов. В общем, процесс уплотнения грунта и деформирования пневматического колеса может быть представлен в виде графика (рис. 6).

На графике (см. рис. 6) указан качественный характер изменения значений деформаций грунта h , объемного веса скелета грунта δ , прочностных показателей E , η , коэффициента сопротивления качению f , а также максимальной деформации пневматического колеса ω , в функции от количества проходов n пневматического колеса.

Работа пневматической шины с изменяемым давлением и деформируемым грунтом отличается от описанной ранее (рис. 7). При использовании регулируемого давления пер-

вичный проход колеса по нестабильному грунту выполняется при наименьшем возможном давлении в шине. В этом случае деформация пневматического колеса будет максимальной. Увеличение деформации пневматического колеса уменьшает сдвиги грунта и способствует лучшей проходимости машин. Деформации уплотняемого слоя меньше, чем в первом случае. Коэффициент сопротивления качению также уменьшается по сравнению с первым случаем. При этом первый проход может быть проведен на повышенных передачах с большей скоростью.

Далее при последующих проходах проводится постепенное увеличение давления воздуха в пневматическом колесе, что приводит к уменьшению площади отпечатка и, соответственно, увеличению среднего контактного давления. Такое явление способствует росту плотности уплотняемого слоя и уменьшению остаточных деформаций.

Последний проход характеризуется максимальным давлением воздуха в шине и определенным значением деформаций пневматического колеса, соответствующим радиальной деформации оболочки ω_n .

Как правило, коэффициент сопротивления качению такой же, как и при первом проходе, поскольку изменением давления воздуха в шине добиваются постоянства силы тяги. В целом процесс уплотнения грунта можно представить в виде графика (рис. 8), где приведены качественные изменения параметров $\omega, f, \delta, h, E, \eta$ в зависимости от количества проходов пневматического колеса по одному следу.

Можно сделать вывод, о том, что для контроля уплотнения грунтов могут быть использованы различные зависимости, характеризующие процесс взаимодействия двух контактирующих тел: для пневматических колес с давлением воздуха в шине $P_b = \text{const}$:

$$\delta = f_1(n); h = f_2(n); E = f_3(n);$$

$$\eta = f_4(n); \omega = f_5(n); f = f_6(n).$$

для пневматических колес с давлением воздуха в шине $P_b \neq \text{const}$:

$$\delta = f'_1(n); h = f'_2(n); E = f'_3(n);$$

$$\eta = f'_4(n); \omega = f'_5(n); f = \text{const}.$$

В настоящее время наибольшее распространение получила зависимость типа $\delta = f(n)$, которая подробно изучена теоретически и экспериментально. Отметим, что для измерения объемного веса скелета грунта используются различные приборы как точечного, так и непрерывного контроля.

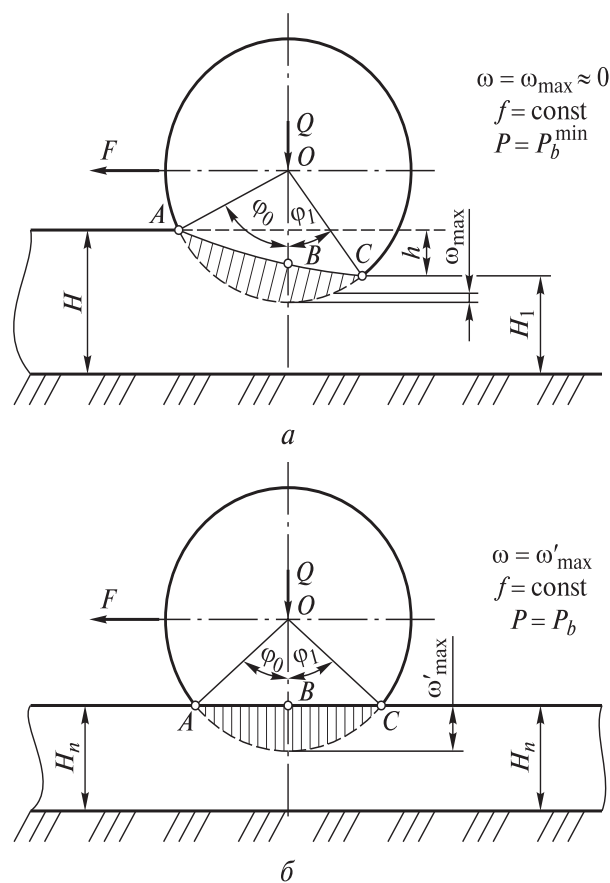


Рис. 7. Взаимодействие пневматического колеса с регулируемым давлением воздуха в шине и уплотняемым грунтовым слоем: *a* — первый проход пневматической шины; *b* — последний проход пневматической шины

Fig. 7. Interaction of pneus with regulated air pressure in the tyre and compacted soil layer: *a* — first pass of the pneus; *b* — last pass of the pneus

Наибольшее распространение получил прибор Н.П. Ковалева, который используется в большинстве дорожных организаций.

Наибольшее распространение зависимости $h = f(n)$ выявлено при изучении проходимости машин по грунтовым поверхностям. Что касается зависимости $f = f(n)$, то ее с успехом можно применить только для машин с пневматическими колесами первого типа, когда $P_b = \text{const}$, а также для жесткобарабанных колес. В свое время Я.А. Калужский [37] сконструировал прибор, который устанавливался на катке и служил контрольным прибором по укатке грунтов. Однако для катков с регулируемым давлением воздуха в шине эту зависимость нельзя применить поскольку $f = f(n) = \text{const}$, вследствие чего можно достичь лучшего использования мощности двигателя.

Для контроля уплотнения грунтов может быть использована зависимость $E(\eta) = f(n)$,

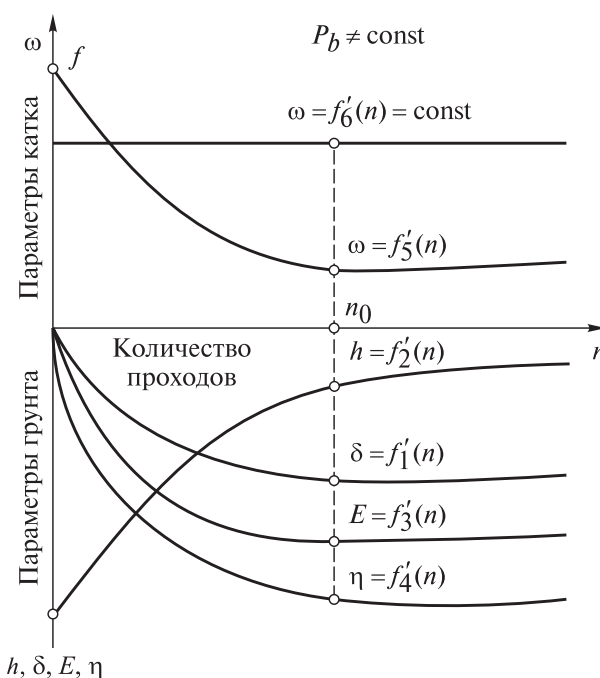


Рис. 8. Качественные изменения параметров $\omega, f, \delta, h, E, \eta$ в зависимости от количества проходов пневматического колеса по одному следу

Fig. 8. Qualitative changes of parameters $\omega, f, \delta, h, E, \eta$ depending on the number of passes of the pneus on one trail

для чего необходимо применять приборы, измеряющие прочностные характеристики грунтов в процессе уплотнения. В качестве таких приборов могут применяться пенетрометры, а также приборы динамического нагружения, которые позволяют в сравнительно короткие сроки получить необходимые данные. Одним из главных требований к приборам, определяющим прочностные характеристики грунта в процессе уплотнения, должна быть повышенная точность и скорость определения.

Что касается зависимости $\omega = f(n)$, то и она может быть использована как для случая $P_b = \text{const}$, так и для случая $P_b \neq \text{const}$ при контроле уплотнения грунтов. При этом расчет необходимого числа проходов сводится к определению ω_{max}^n в точке *B* после каждого прохода и сравнению его с ω_{max}^v (максимальная деформация пневматического колеса на уплотненной поверхности). Процесс уплотнения грунта будет закончен тогда, когда $\omega_{\text{max}}^n = \omega_{\text{max}}^v$, т. е. максимальная деформация пневматического колеса при *n*-м проходе будет равна максимальной деформации пневматического колеса на уплотненной поверхности при определенном давлении воздуха в шине и определенной нагрузке.

Для расчетов используются уравнения (37), (38) по определению ω_{max}

$$\omega_{\max} = f(P_k, P_r), \quad (60)$$

где P_k — параметры пневматического колеса;
 P_r — параметры уплотняемого слоя.

Поскольку параметры уплотняемого слоя изменяются от прохода к проходу по зависимости, близкой к логарифмической, то и максимальная деформация пневматической шины будет изменяться от прохода к проходу по логарифмической зависимости.

В связи с этим в общем виде зависимость ω от n может быть выражена уравнением

$$\omega = \omega_1 + A \lg(n+1), \quad (61)$$

где n — число проходов;

A — коэффициент, показывающий ход изменения деформаций пневматического колеса, зависящий от свойств грунта и нагрузки на колесо;

ω_1 — максимальная деформация при первом проходе.

Выводы

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о многообразии форм и методов контроля уплотнения грунтов, причем контроль может быть осуществлен как со стороны изучения свойств грунта, так и со стороны изучения свойств пневматического колеса в процессе уплотнения грунтов.

В качестве методов контроля предлагается использовать замер радиальной деформации пневматического колеса с дополнительным определением механических характеристик ускоренными способами. Данный подход ведет к процессу автоматизации контроля уплотнения грунтов, а также к повышению качества земляного полотна.

Основанный на измерении радиальной деформации пневматического колеса метод контроля позволяет оперативно оценивать степень уплотнения грунта в режиме реального времени, что дает возможность корректировать технологические параметры уплотняющей техники непосредственно в процессе работы, оптимизируя энергозатраты и сокращая сроки строительства. Использование ускоренных методов определения механических характеристик грунта, таких как динамическое зондирование или пенетрационные испытания, в сочетании с данными о деформации пневматического колеса, обеспечивает комплексную оценку качества уплотнения. Полученные результаты можно использовать для создания предиктивных моделей, позволяющих прогно-

зировать поведение земляного полотна в процессе эксплуатации. Внедрение автоматизированной системы контроля уплотнения грунтов на основе предложенного метода позволит снизить влияние человеческого фактора, повысить точность и достоверность измерений, а также обеспечить оперативный доступ к информации о текущем состоянии земляного полотна. Перспективы дальнейших исследований в данном направлении связаны с разработкой интеллектуальных систем управления уплотняющей техникой, способных автоматически адаптироваться к изменяющимся условиям и обеспечивать оптимальное качество уплотнения грунтов.

Список литературы

- [1] Хомяк Я.В. Проектирование сетей автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1983. 207 с.
- [2] Чернышова Е.В. Методы формирования цифровой модели местности при трассировании лесовозных автомобильных дорог // Системы. Методы. Технологии, 2017. № 3(35). С. 143–148.
- [3] Мокрушин Н.Ю., Чудинов С.А. Совершенствование технологии укрепления грунтов для строительства дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе, 2023. Т. 1. С. 300–303.
- [4] Zavrazhnov A.I., Belyaev A.N., Zelikov V.A., Tikhomirov P.V., Mikheev N.V. Designing mathematical models of geometric and technical parameters for modern road-building machines versus the main parameter of the system // Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology Proceedings of the Int. Symp. «Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research» dedicated to the 85-th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019), 2019, pp. 823–827.
- [5] Berestnev O., Soliterman Y., Goman A. Development of Scientific Bases of Forecasting and Reliability Increase of Mechanisms and Machines – One of the Key Problems of Engineering Science // Int. Symp. On History of Machines and Mechanisms Proceedings, 2000, pp. 325–332.
- [6] Козлов В.Г. Методы, модели и алгоритмы проектирования лесовозных автомобильных дорог с учетом влияния климата и погоды на условия движения: дис. ... д-ра техн. наук. 05.21.01 Технологии и машины лесозаготовок и лесного хозяйства. Архангельск, 2017. 406 с.
- [7] Бондарев А.Б., Козлов Д.Г. Обследование эксплуатационного состояния лесовозных автомобильных дорог // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: Материалы Междунар. науч.-практ. конф., Воронеж, 06–07 июня 2022 г. Воронеж: Изд-во Воронежского ГАУ, 2022. С. 196–200.
- [8] Курьянов В.К., Макеев В.Н. Технология и организация строительства лесовозных автомобильных дорог. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1995. 166 с.
- [9] Чудинов С.А., Катнова А.А., Чупров Е.Е. Современные добавки для стабилизации грунтов при

- строительстве лесовозных автомобильных дорог // Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых: Сб. материалов IV Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Омск, 06–07 февраля 2020 г. Омск: Изд-во Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета, 2020. С. 174–177.
- [10] Камусин А.А., Левушкин Д.М. Повышение прочности дорожных покрытий лесовозных автомобильных дорог // ИзВУЗ Лесной журнал, 2012. № 5 (329). С. 72–77.
- [11] Курдюков Д.П., Курдюков Р.П., Шамарин Н.И., Мануковский А.Ю. Расчет сопротивления грунтов основания при устройстве малых искусственных сооружений // Энергоресурсосберегающие и экологически безопасные технологии лесопромышленного комплекса: Материалы Междунар. науч. конф. ученых и студентов, Воронеж, 26 сентября 2024 г. Воронеж: Изд-во Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, 2024. С. 89–94.
- [12] Чудинов С.А., Карабутова И.А. Нейронечеткая сеть для расчета стоимости строительства лесовозной автомобильной дороги из фиброцементогрунта // Системы. Методы. Технологии, 2024. № 1(61). С. 154–162.
- [13] Сиденко В.М. Стандартизация и контроль качества в дорожном строительстве. Киев: Высшая школа, 1985. 256 с.
- [14] Коломина М.В. Исследование удельных затрат энергии отдельных видов машин для строительства лесовозных дорог // Системы. Методы. Технологии, 2018. № 2(38). С. 105–110.
- [15] Вырко Н.П. Строительство и эксплуатация лесовозных дорог: учебник. Минск: Изд-во Белорусского государственного технологического университета, 2005. 445 с.
- [16] Кручинин И.Н., Бурмистров И.Н. Требования к транспортно-эксплуатационному состоянию зимних лесовозных автомобильных дорог // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе, 2017. Т. 1. С. 209–212.
- [17] Мохирев А.П., Медведев С.О., Смолина О.Н. Факторы, влияющие на пропускную способность лесовозных дорог // Лесотехнический журнал, 2019. Т. 9. № 3 (35). С. 103–113.
- [18] Чудинов С.А. Совершенствование технологии укрепления грунтов в строительстве автомобильных дорог лесного комплекса. Екатеринбург: Изд-во Уральского государственного лесотехнического университета, 2022. 164 с.
- [19] Леонович И.И., Вырко Н.П., Мартынихин В.Д., Матвейко А.П., Абрамович К.Б., Гайдук А.И., Давыдулин Г.Г., Лыщик П.А., Корин Г.С., Чупраков А.М. Дороги и транспорт лесной промышленности. Минск: Вышэйша шк., 1979. 415 с.
- [20] Высоцкая И.А. Обоснование информационно-интеллектуальной поддержки принципов действия технических систем // Моделирование систем и процессов, 2024. Т. 17. № 1. С. 19–26.
- [21] Елшами М.М.М., Тиратуриян А.Н., Углова Е.В. Управление жизненным циклом автомобильных дорог на этапе эксплуатации на основе алгоритмов искусственных нейронных сетей // Инженерный вестник Дона, 2022. № 8(92). С. 282–292.
- [22] Гаан Ю.В. Совершенствование технологии строительства лесовозных дорог из мерзлокомковатых глинистых грунтов: дис. ... канд. техн. наук. 05.21.01 Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства. Красноярск, 2006. 166 с.
- [23] Медведев И.Н., Воротников Д.А. Перспективы применения конструкционного материала на основе малоценной древесины мягких лиственных пород для мостов на лесовозных автомобильных дорогах // Современные машины, оборудование и IT-решения лесопромышленного комплекса: теория и практика: Материалы Всерос. науч.-практ. конф., Воронеж, 17 июня 2021 г. Воронеж: Изд-во Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, 2021. С. 240–244.
- [24] Гарус И.А., Огар П.М., Рунова Е.М. Анализ условий эксплуатации и обоснование транспортных схем в условиях строительства лесовозных автомобильных дорог // Системы. Методы. Технологии, 2020, № 3(47). С. 81–87.
- [25] Гарус И.А., Огар П.М., Рунова Е.М. Теоретическое обоснование оценки транспортно-эксплуатационных качеств лесовозной автомобильной дороги по показателю маршрутной скорости движения // Системы. Методы. Технологии, 2020, № 3(47). С. 88–94.
- [26] Козлов Д.Г. К вопросу о выборе шин и балластировании трактора при выполнении технологических операций // Вестник Воронежского государственного аграрного университета, 2015, № 3(46). С. 119–125.
- [27] Чудинов С.А. Исследование набора прочности фиброцементогрунта в дорожной одежде лесовозной автомобильной дороги // Resources and Technology, 2024, Т. 21, № 2. С. 1–14.
- [28] Majstorovic A., Jajac N. Maintenance Management Model for Nonurban Road Network // Infrastructures, 2022, no. 6 (7), p. 80.
- [29] Порин В.О., Чудинов С.А., Филимошкин Д.В. Применение многокомпонентной добавки для укрепления грунтов в дорожных одеждах лесовозных автомобильных дорог // Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий: Материалы XV Междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 08 февраля 2024 г. Екатеринбург: Изд-во Уральского государственного лесотехнического университета, 2024. С. 399–404.
- [30] Сушков С.И., Бурмистрова О.Н., Михеевская М.А. Методика динамического расчета насыпи лесовозных автомобильных дорог // Лесотехнический журнал, 2013. № 4(12). С. 89–93.
- [31] Бурмистрова О.Н., Бургонутдинов А.М., Пильник Ю.Н. Механизм образования морозобойных трещин на автомобильных дорогах, эксплуатируемых в умеренно-континентальном климате // Лесотехнический журнал, 2016. Т. 6. № 4 (24). С. 133–138.
- [32] Бургонутдинов А.М., Колобова А.А. Применение нефтесодержащих отходов и нефтезагрязненных грунтов для устройства парогидроизолирующих прослоек в земляном полотне лесовозной автомобильной дороги // Теория и практика современной науки, 2022. № 3(81). С. 60–66.
- [33] Enhancing forest machine efficiency: review // Australia. Forestand Wood, 2010, 48 p.

- [34] Manukovskii A.Yu., Grigorev I.V., Ivanov V.A., Gasparyan G.D., Lapshina M.L., Makarova J.A., Chetverikova I.V., Yakovlev K.A., Afonichev D.N., Kunickaya O.A. Increasing the logging Road Efficiency By Reducing The Intensity Of Rutting: Mathematical Modeling J. of Mechanical Engineering Research & Developments, 2018, v. 41(2), pp. 35–41.
- [35] Макарова Ю.А., Мануковский А.Ю. Использование геосинтетических материалов для защиты откосов земляного полотна лесовозной автомобильной дороги в условиях подтоплений // ИзВУЗ Лесной журнал, 2017. № 3(357). С. 114–122.
- [36] Бируля А.К. Эксплуатация автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1966. 326 с.
- [37] Калужский Н.А. Повышение эффективности технологии производства глинозема и попутных продуктов: сб. науч. тр. ВНИПИ алюминиевой, магниевой и электродной промышленности / под ред. Н.А. Калужского. Л.: ВАМИ, 1984. 136 с.

Сведения об авторах

Боровлев Юрий Алексеевич — канд. техн. наук, доцент, ФГКВОУ ВПО «Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил» «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» Министерства обороны Российской Федерации, borov.borov.ar@yandex.ru

Козлов Дмитрий Геннадиевич — канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», dimvsau@mail.ru

Скрыпников Алексей Васильевич — д-р техн. наук, декан факультета «Управление и информатика в технологических системах», ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», skrypnikovsafe@mail.ru

Сергеев Александр Сергеевич — канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», pnpri_sk@mail.ru

Яровенко Александр Андреевич — ассистент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», skrypnikovsafe@mail.ru

Поступила в редакцию 06.03.2025.

Одобрено после рецензирования 25.03.2025.

Принята к публикации 29.05.2025.

PARAMETERS CONTROL OF ROADBED SOIL COMPACTION PROCESS ON TRUCK HAUL ROADS

Yu.A. Borovlev¹, D.G. Kozlov^{2✉}, A.V. Skrypnikov³,
A.S. Sergeev⁴, A.A. Yarovenko³

¹Military Air Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, 54 a, Starykh Bolshevikov st., 394064, Voronezh, Russia

²Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, 1, Michurina st., 394087, Voronezh, Russia

³Voronezh State University of Engineering Technologies, 19, Revolyutsii av., 394036, Voronezh, Russia

⁴Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky Prospekt, 614990, Perm, Russia

dimvsau@mail.ru

The article is a comprehensive study on the control of soil compaction parameters during the construction of truck haul roads. The focus is on the interaction between the pneu and the compacted soil layer, which leads to deformations of both objects. The degree of these deformations depends on the physical and mechanical properties of the interacting bodies. Two schemes of deformation of pneus, which form the basis of sealing control, are considered in detail and analyzed. The analysis of the soil compaction process with pneus at both constant and variable tire air pressure, as well as how the deformation of the tire and the soil layer change with each passing tire. As a result, the logarithmic nature of the dependence of the deformation of the compacted layer and the bulk weight of the soil framework on the number of pneumatic passages was proved. The analysis showed that analytical dependencies were obtained characterizing the process of interaction between two contacting bodies, which can be used to control soil compaction. A method for measuring radial deformation of a pneumatic tire with additional determination of mechanical characteristics by accelerated methods is proposed. The proposed method opens the way to automation of soil compaction control and significantly improves the quality of excavation work. Thus, the results of the study can contribute to improving control methods and increasing the efficiency of construction processes related to soil compaction in forest road projects.

Keywords: compacted layer, soil density, soil deformation, rolling resistance, strength characteristics of soils

Suggested citation: Borovlev Yu.A., Kozlov D.G., Skrypnikov A.V., Sergeev A.S., Yarovenko A.A. *Kontrol' parametrov protsessa uplotneniya gruntov zemlyanogo polotna lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Parameters control of roadbed soil compaction process on truck haul roads]. Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. T. 29. № 4. C. 139–155. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-139-155

References

- [1] Khomyak Ya.V. *Proektirovanie setey avtomobil'nykh dorog* [Design of highway networks]. Moscow: Transport, 1983, 207 p.
- [2] Chernyshova E.V. *Metody formirovaniya tsifrovoy modeli mestnosti pri trassirovanii lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Methods for the formation of a digital terrain model when tracing logging roads]. Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technologies], 2017, no. 3(35), pp. 143–148.
- [3] Mokrushin N.Yu., Chudinov S.A. *Sovershenstvovanie tekhnologii ukrepleniya gruntov dlya stroitel'stva dorozhnykh odezhd lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Improving the technology of soil strengthening for the construction of road surfaces of logging roads]. Modernizatsiya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse [Modernization and scientific research in the transport complex], 2023. T. 1. pp. 300–303.
- [4] Zavrazhnov A.I., Belyaev A.N., Zelikov V.A., Tikhomirov P.V., Mikheev N.V. Development of mathematical models of geometric and technical parameters of modern road construction machines depending on the main parameter of the system // Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology Proceedings of the Int. The symposium. «Engineering and Earth Sciences: Applied and fundamental research», dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019), 2019, pp. 823–827.
- [5] Berestnev O., Soliterman Y., Goman A. Development of Scientific Bases of Forecasting and Reliability Increase of Mechanisms and Machines — One of the Key Problems of Engineering Science. Int. Symp. on History of Machines and Mechanisms Proceedings, 2000, pp. 325–332.
- [6] Kozlov V.G. *Metody, modeli i algoritmy proektirovaniya lesovoznykh avtomobil'nykh dorog s uchetom vliyaniya klimata i pogody na usloviya dvizheniya* [Methods, models and algorithms for designing logging roads, taking into account the influence of climate and weather on traffic conditions]. Dis. Dr. Sci. (Tech.) 05.21.01. Arkhangelsk, 2017, 406 p.
- [7] Bondarev A.B., Kozlov D.G. *Obsledovanie ekspluatatsionnogo sostoyaniya lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Survey of the operational state of logging roads]. Energoeffektivnost' i energosberezhenie v sovremennom proizvodstve i obshchestve: Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Energy efficiency and energy saving in modern production and society: Proceedings of the international scientific and practical conference], Voronezh, June 06–07, 2022. Voronezh: Voronezh State Agrarian University, 2022, pp. 196–200.
- [8] Kuryanov V.K., Makeev V.N. *Tekhnologiya i organizatsiya stroitel'stva lesovoznykh avtomobilnykh dorog* [Technology and organization of construction of logging roads]. Voronezh: VGU, 1995. 166 p.

- [9] Chudinov S.A., Katnova A.A., Chuprov E.E. *Sovremennye dobavki dlya stabilizatsii gruntov pri stroitel'stve lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Modern additives for soil stabilization during construction of logging roads] *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya molodykh uchenykh: Sbornik materialov IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Energy efficiency and energy saving in modern production and society: materials of the international scientific and practical conference], Omsk, 06–07 fevralya 2020 g. Omsk: Sibirskiy gosudarstvennyy avtomobil'no-dorozhnyy universitet, 2020, pp. 174–177.
- [10] Kamusin A.A., Levushkin D.M. *Povyshenie prochnosti dorozhnykh pokrytiy lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Increasing the strength of road surfaces of logging roads]. *Russian Forestry J.*, 2012, no. 5 (329), pp. 72–77.
- [11] Kurdyukov D.P., Kurdyukov R.P., Shamarin N.I., Manukovskiy A.Yu. *Raschet soprotivleniya gruntov osnovaniya pri ustroystve malykh iskusstvennykh sooruzheniy* [Calculation of resistance of foundation soils in the construction of small artificial structures]. *Energoresursoberegayushchie i ekologicheski bezopasnye tekhnologii lesopromyshlennogo kompleksa: materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii uchenykh i studentov* [Energy-saving and environmentally friendly technologies of the forest industry complex: materials of the international scientific conference of scientists and students]. Voronezh, 26 sentyabrya 2024 g. Voronezh: Voronezhskiy gosudarstvennyy lesotekhnicheskii universitet im. G.F. Morozova, 2024, pp. 89–94.
- [12] Chudinov S.A., Karabutova I.A. *Neyronechetkaya set' dlya rascheta stoimosti stroitel'stva lesovoznoy avtomobil'noy dorogi iz fibrotsementogrunta* [Neural fuzzy network for calculating the cost of building a timber road from fiber cement soil]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2024, no. 1(61), pp. 154–162.
- [13] Sidenko V.M. *Standartizatsiya i kontrol' kachestva v dorozhnom stroitel'stve* [Standardization and quality control in road construction]. Kyiv: Higher School, 1985, 256 p.
- [14] Kolominova M.V. *Issledovanie udel'nykh zatrat energii ot del'nykh vidov mashin dlya stroitel'stva lesovoznykh dorog* [Study of specific energy costs of individual types of machines for the construction of logging roads]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2018, no. 2 (38), pp. 105–110.
- [15] Vyrko N.P. *Stroitel'stvo i ekspluatatsiya lesovoznykh dorog* [Construction and operation of logging roads]. Minsk: Belorusskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskii universitet, 2005, 445 p.
- [16] Kruchinin I.N., Burmistrov I.N. *Trebvaniya k transportno-ekspluatatsionnomu sostoyaniyu zimnikh lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Requirements for the transport and operational condition of winter logging roads]. *Modernizatsiya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse* [Modernization and scientific research in the transport complex], 2017, v. 1, pp. 209–212.
- [17] Mokhired A.P., Medvedev S.O., Smolina O.N. *Faktory, vliyayushchie na propusknyuyu sposobnost' lesovoznykh dorog* [Factors Affecting the Capacity of Timber Roads]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering J.], 2019, v. 9, no. 3 (35), pp. 103–113.
- [18] Chudinov S.A. *Sovershenstvovanie tekhnologii ukrepleniya gruntov v stroitel'stve avtomobil'nykh dorog lesnogo kompleksa* [Improving the technology of soil stabilization in the construction of forestry roads]. Ekaterinburg: Ural'skiy gosudarstvennyy lesotekhnicheskii universitet, 2022, 164 p.
- [19] Leonovich I.I., Vyrko N.P., Martynikhin V.D., Matveyko A.P., Abramovich K.B., Gayduk A.I., Davydulin G.G., Lyshchik P.A., Korin G.S., Chuprakov A.M. *Dorogi i transport lesnoy promyshlennosti* [Roads and transport of the forest industry]. Minsk: Vysheysya shkola, 1979, 415 p.
- [20] Vysotskaya I.A. *Obosnovanie informatsionno-intellektual'noy podderzhki printsipov deystviya tekhnicheskikh sistem* [Justification of information and intellectual support of the operating principles of technical systems] *Modelirovanie sistem i protsessov* [Modeling of systems and processes], 2024. T. 17, № 1. pp. 19–26.
- [21] Elshami M.M.M., Tiraturyan A.N., Uglova E.V. *Upravlenie zhiznennym tsiklom avtomobil'nykh dorog na etape ekspluatatsii na osnove algoritmov iskusstvennykh neyronnykh setey* [Life Cycle Management of Highways at the Operational Stage Based on Artificial Neural Network Algorithms]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2022, no. 8 (92), pp. 282–292.
- [22] Gaan Yu.V. *Sovershenstvovanie tekhnologii stroitel'stva lesovoznykh dorog iz merzlokomkovatykh glinistykh gruntov* [Improving the technology of construction of logging roads from frozen-lumpy clay soils]. Dis. Cand. Sci. (Tech.) 05.21.01. Krasnoyarsk, 2006, 166 p.
- [23] Medvedev I.N., Vorotnikov D.A. *Perspektivy primeneniya konstruktivnogo materiala na osnove malotsennoy drevesiny myagkikh listvennykh porod dlya mostov na lesovoznykh avtomobil'nykh dorogakh* [Prospects for the use of structural material based on low-value softwood for bridges on logging roads]. *Sovremennye mashiny, oborudovanie i IT-resheniya lesopromyshlennogo kompleksa: teoriya i praktika: materialy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern machines, equipment and IT solutions for the forest industry complex: theory and practice: materials of the All-Russian scientific and practical conference], Voronezh, 17 iyunya 2021 g. Voronezh: Voronezhskiy gosudarstvennyy lesotekhnicheskii universitet im. G.F. Morozova, 2021, pp. 240–244.
- [24] Garus I.A., Ogar P.M., Runova E.M. *Analiz usloviy ekspluatatsii i obosnovanie transportnykh skhem v usloviyakh stroitel'stva lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Analysis of operating conditions and substantiation of transport schemes in the conditions of construction of logging roads]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2020, no. 3(47), pp. 81–87.
- [25] Garus I.A., Ogar P.M., Runova E.M. *Teoreticheskoe obosnovanie otsenki transportno-ekspluatatsionnykh kachestv lesovoznoy avtomobil'noy dorogi po pokazatelyu marshrutnoy skorosti dvizheniya* [Theoretical substantiation of the assessment of the transport and operational qualities of a logging road based on the route speed indicator]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2020, no. 3(47), pp. 88–94.
- [26] Kozlov D.G. *On the issue of choosing tires and ballasting a tractor when performing technological operations* [On the issue of choosing tires and ballasting a tractor when performing technological operations]. *Bulletin of the Voronezh State Agrarian University* [Bulletin of the Voronezh State Agrarian University], 2015, no. 3(46), pp. 119–125.

- [27] Chudinov S.A. *Issledovanie nabora prochnosti fibrotsementogrunta v dorozhnoy odezhde lesovoznoy avtomobil'noy dorogi* [Study of the strength gain of fiber cement soil in the road surface of a logging road]. Resources and Technology [Resources and Technology], 2024, t. 21, no. 2, pp. 1–14.
- [28] Majstorovic A., Jajac N. Maintenance Management Model for Nonurban Road Network. *Infrastructures*, 2022, no. 6 (7), p. 80.
- [29] Porin V.O., Chudinov S.A., Filimoshkin D.V. *Primenenie mnogokomponentnoy dobavki dlya ukrepleniya gruntov v dorozhnykh odezhдах lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Application of a multicomponent additive for soil stabilization in road surfaces of logging roads]. *Effektivnyy otvet na sovremennye vyzovy s uchetom vzaimodeystviya cheloveka i prirody, cheloveka i tekhnologii: materialy XV mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [An effective response to modern challenges taking into account the interaction of man and nature, man and technology: Proceedings of the XV International Scientific and Technical Conference], Ekaterinburg, 08 fevralya 2024 g. Ekaterinburg: Ural'skiy gosudarstvennyy lesotekhnicheskii universitet, 2024. pp. 399–404.
- [30] Sushkov S.I., Burmistrova O.N., Mikhieevskaya M.A. Metodika dinamicheskogo rascheta nasypi lesovoznykh avtomobil'nykh dorog [Methodology for dynamic calculation of the embankment of logging roads]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering J.], 2013, no. 4(12), pp. 89–93.
- [31] Burmistrova O.N., Burgonutdinov A.M., Pil'nik Yu.N. *Mekhanizm obrazovaniya morozoboynykh treshchin na avtomobil'nykh dorogakh, ekspluatiruemyykh v umerenno-kontinental'nom klimate* [Mechanism of frost crack formation on roads operated in a temperate continental climate]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry J.], 2016, v. 6, no. 4 (24), pp. 133–138.
- [32] Burgonutdinov A.M., Kolobova A.A. *Primenenie neftesoderzhashchikh otkhodov i neftezagryaznennykh gruntov dlya ustroystva parogidrozoliruyushchikh prosloek v zemlyanom polotne lesovoznoy avtomobil'noy dorogi* [Application of oil-containing waste and oil-contaminated soils for the construction of vapor-water-insulating layers in the roadbed of a logging road]. *Teoriya i praktika sovremennoy nauki* [Theory and practice of modern science], 2022, no. 3(81), pp. 60–66.
- [33] Improving the efficiency of logging machines: a review // Australia. Forest wood, 2010, 48 p.
- [34] Manukovsky A.Yu., Grigoriev I.V., Ivanov V.A., Gasparyan G.D., Lapshina M.L., Makarova Ju.A., Chetverikova I.V., Yakovlev K.A., Afonichev D.N., Kunitskaya O.A. Improving the efficiency of logging roads by reducing the intensity of trackage: Mathematical modeling. *J. of Research and Development in Mechanical Engineering*, 2018, no. 41 (2), pp. 35–41.
- [35] Makarova Yu.A., Manukovskiy A.Yu. *Ispol'zovanie geosinteticheskikh materialov dlya zashchity otkosov zemlyanogo polotna lesovoznoy avtomobil'noy dorogi v usloviyakh podtopleniy* [Use of geosynthetic materials to protect the slopes of the roadbed of a logging road in flooded conditions]. *Russian Lesnoy zhurnal*, 2017, no. 3(357), pp. 114–122.
- [36] Birulya A.K. *Ekspluatatsiya avtomobil'nykh dorog* [Operation of Highways]. Moscow: Transport, 1966, 326 p.
- [37] Kaluzhskiy N.A. *Povyshenie effektivnosti tekhnologii proizvodstva glinozema i poputnykh produktov* [Improving the Efficiency of Alumina and By-Products Production Technology]. *Sb. nauch. tr. VNIPI alyuminievoy, magnievoy i elektrodnoy promyshlennosti* [Collection of scientific papers of VNIPI of the Aluminum, Magnesium and Electrode Industry]. Ed. N.A. Kaluzhskiy. Leningrad: VAMI, 1984, 136 p.

Authors' information

Borovlev Yuriy Alekseevich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, borov.borov.ar@yandex.ru

Kozlov Dmitriy Gennadievich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, dimvsau@mail.ru

Skrypnikov Aleksey Vasil'evich — Dr. Sci. (Tech.), Dean of the Faculty of Management and Computer Science in Technological systems of the Voronezh State University of Engineering Technologies, skrypnikovvsafe@mail.ru

Sergeev Aleksandr Sergeevich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Perm National Research Polytechnic University, pnpu_sk@mail.ru

Yarovenko Aleksandr Andreevich — Assistant of the Voronezh State University of Engineering Technologies, skrypnikovvsafe@mail.ru

Received 06.03.2025.

Approved after review 25.03.2025.

Accepted for publication 29.05.2025.

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

ПОВЫШЕНИЕ ТРАНСПОРТНО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЛЕСОТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

И.Н. Кручинин¹✉, В.В. Никитин², О.Н. Бурмистрова³,
Е.Н. Щербаков², Э.Р. Ахтямов⁴, Д.В. Овсяйчик¹

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

²ФГАОУ 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

³ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», Россия, 169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Первомайская, д. 13

⁴ООО «Уральский научно-исследовательский институт строительных материалов» («УралНИИСтром»), Россия, 454047, г. Челябинск, ул. Сталеваров, д. 5

kruchininin@m.usfeu.ru

Представлены результаты повышения транспортно-эксплуатационного состояния снежных дорожных покрытий зимних лесных дорог. Приведена методика оценки состояния снежных дорожных покрытий зимних лесных дорог с использованием обобщенного комплексного показателя. Установлено, что, что в качестве основных критериев обобщенного показателя необходимо использовать показатель по коэффициенту сцепления колес лесовозного транспорта со снежным покрытием и прочностной показатель покрытия, по модулю динамического прогиба. Рассмотрено влияние на коэффициент сцепления плотности снежного дорожного покрытия и количества распределения различных фрикционных материалов. Установлено влияние размеров зерен фрикционных материалов и их видов на сцепные свойства покрытий. Выявлено, что наибольший коэффициент сцепления достигается при плотности распределения по покрытию от 5,0 до 6,0 кг/м², для щебня фракции 5–10. Для древесной щепы плотность распределения составила не менее 5 м³ на 100 м² снежного дорожного покрытия. При этом значении был зафиксирован коэффициент сцепления со снежной дорожной поверхностью не менее 0,4 и модуль динамического прогиба не менее 195 МПа. Показано, что полученные значения снежных покрытий лесных дорог характеризуется неопределенностью в данных, поэтому для анализа обобщенного показателя использовалась адаптивная нейронечеткая сеть типа ANFIS (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System). Установлено, что значение обобщенного показателя транспортно-эксплуатационного состояния должно быть не менее 0,605. Рекомендуется, для оценки коэффициента сцепления использовать прибор ППК – МАДИ, а для оценки прочности снежных дорожных покрытий использовать динамический плотномер со свободно падающим грузом типа ZFG-3000 GPS. Соблюдение представленных рекомендаций позволяет оперативно оценивать и влиять на транспортно-эксплуатационные показатели зимних лесных дорог и всей лесотранспортной инфраструктуры.

Ключевые слова: зимние лесные дороги, снежное дорожное покрытие, коэффициент сцепления, модуль динамического прогиба снежного дорожного покрытия

Ссылка для цитирования: Кручинин И.Н., Никитин В.В., Бурмистрова О.Н., Щербаков Е.Н., Ахтямов Э.Р., Овсяйчик Д.В. Повышение транспортно-эксплуатационных показателей лесотранспортной инфраструктуры в зимний период // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 4. С. 156–169. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-156-169

Стратегия устойчивого развития лесопромышленного комплекса Российской Федерации предусматривает повышение транспортно-эксплуатационных показателей лесных дорог лесотранспортной инфраструктуры при освоении лесосырьевых баз. Обычно транспортное освоение лесосырьевых баз рассмат-

ривается для летнего периода года, причем только по лесотранспортным путям постоянного действия [1]. При этом практически все исследователи рассматривают строительство и эксплуатацию лесных дорог только для летнего периода [1, 2], даже для северных территорий. В то же время проблемы строительства и эксплуатации зимних лесных дорог практически не рассматриваются [3, 4]. Поскольку зимние лесные дороги относятся к дорогам временного

пользования, большинство исследователей в области эксплуатации этих временных лесотранспортных путей пришли к выводу о том, что для обеспечения требуемых транспортно-эксплуатационных показателей следует совершенствовать технологии по их сохранению именно в отношении зимних лесных дорог [5, 6]. При анализе условий строительства и эксплуатации зимних лесных дорог в уплотненном снежном дорожном покрытии был сделан вывод о том, что в пределах действующей нормативно-технической документации необходим пересмотр основных требований к эксплуатационным показателям рассматриваемых покрытий.

Известно, что для зимних лесных дорог характерно исполнение дорожных одежд, состоящих из снега, снежно-ледяных отложений, уплотненного снежного покрова или ледяных покрытий [5, 7–11].

Важно учитывать, что лесовозный подвижной состав, эксплуатируемый в условиях лесосырьевых баз, значительно отличается от традиционных грузовых автомобилей, эксплуатируемых на дорогах общего пользования [1–3]. В современных условиях при транспортном освоении лесосырьевых баз в условиях глобального изменения климата изменились оценочные параметры физико-механических характеристик снежных дорожных покрытий зимних лесных дорог. Традиционные показатели уже не могут обеспечить требуемое транспортно-эксплуатационное качество лесных дорог.

Для дальнейшего уменьшения затрат на строительство и эксплуатацию зимней лесотранспортной инфраструктуры важное значение имеет разработка комплекса мероприятий по проведению оценок основных транспортно-эксплуатационных показателей лесотранспортной инфраструктуры [1].

Как было показано в наших исследованиях [4, 12, 13], снежный покров может оказывать не только положительное влияние на прочностные свойства дорожных покрытий лесных дорог, но и существенно изменить их транспортно-эксплуатационные показатели, а именно коэффициент сцепления и несущую способность дорожного покрытия. Некоторые ученые даже предположили, что при изменении технологий строительства снежных покрытий, может появиться возможность воздействия на эксплуатационные показатели зимних лесных дорог даже в весенний период [5, 14].

В работах [7, 15, 16] была сделана попытка провести оценку физико-механических характеристик снежного дорожного покрова только за счет измерения физико-механических свойств снега и снежно-ледяного покрытия.

Были получены положительные результаты, однако нестабильность свойств снежного материала привела к неопределенностям в полученных результатах. Стало очевидно, что традиционные методы оценки транспортно-эксплуатационного состояния покрытий зимних лесных дорог не способны обеспечить эти решения.

В этой связи повышение транспортно-эксплуатационного состояния дорожных покрытий зимних лесных дорог с использованием методов нечетких множеств является актуальным направлением исследований, что и определило цель настоящей работы.

Цель работы

Цель работы — повышение транспортно-эксплуатационного состояния снежных дорожных покрытий зимних лесных дорог с использованием методов нейро-нечетких сетей.

Материалы и методы

В практике строительства и эксплуатации лесотранспортной инфраструктуры в зимний период, уплотненный снежный покров на дорожном покрытии рассматривают как специально сформированный и уплотненный слой снега. От его физико-механических показателей зависят основные транспортно-эксплуатационные показатели зимних лесных дорог. Особенности строительства автозимников и их эксплуатации посвящено значительное количество работ [5, 7, 8, 11, 12, 13, 14]. В этих работах важное место отводится не только условиям строительства снежных дорожных покрытий и особенностям природно-климатических условий расположения автомобильных дорог, но и технологиям строительства и эксплуатации.

Итогом многолетних наблюдений за климатическими условиями, в которых функционируют лесосырьевые базы [5, 17–19], стало подробное изучение основных условий и закономерностей формирования на этих территориях снежного покрова.

Известно, что снег послойно накапливается и может образовывать снежный покров значительной мощности [7]. Поскольку доля зимних твердых осадков на северных территориях может достигать почти половину общего количества годовых осадков, то решение проблемы строительства и эксплуатации зимних лесных дорог приобретает первостепенное значение [8, 19]. Обычно в условиях лесосырьевых баз прирост снежного покрова, в зависимости от погодных условий, может изменяться в течение одних суток от 0,01 до 0,25 м.

Строительство и эксплуатация зимней лесотранспортной инфраструктуры для условий северных территорий Урала имеет свои особенности. Следует учитывать, что в условиях лесосырьевых баз снежное покрытие формируется несколько по другим принципам, чем на местности, лишенной древесной растительности [20]. Происходит интенсивное перераспределение снежных осадков за счет лесонасаждений. Оказывают влияние изменения ветровых нагрузок на снежный покров. В работе [19] было отмечено влияние даже породного состава древесной растительности на толщину снежного покрова.

Таким образом, при строительстве и эксплуатации зимних лесных дорог необходимо учитывать существенное количество таких факторов, как физическо-механические и природно-климатические.

Обычно проводятся следующие оценки: измерение толщины снежного дорожного покрытия, измерение плотности снежного покрытия, измерение температуры окружающего воздуха, измерение жесткости снежного дорожного покрытия, измерение коэффициента сцепления. В наших исследованиях предлагается проводить инструментальное обследование различных видов снежных дорожных покрытий с оценкой не только коэффициента сцепления, но и прочностных показателей, а именно модуля динамического прогиба снежного дорожного покрытия [12, 13].

Выполненные исследовательские работы позволили сделать вывод о том, что в качестве выходного параметра для оценки транспортно-эксплуатационных показателей зимних лесных дорог следует принять коэффициент сцепления колес лесовозного транспорта со снежной поверхностью и модуль динамического прогиба снежного дорожного покрытия [21–25].

В общем виде коэффициент сцепления колес лесовозных автомобилей со снежной поверхностью $\varphi_{\text{сц}}$ достаточно полно можно определить как функцию

$$\varphi_{\text{сц}} = f(P_{\text{сн}}, \Phi_p, N_p), \quad (1)$$

где $P_{\text{сн}}$ — плотность снежного дорожного покрытия, г/см³;

Φ_p — размер зерен эксплуатационного материала, мм;

N_p — плотность распределения фрикционных материалов, кг/м².

Анализ результатов измерения коэффициента сцепления колес лесовозных автомобилей с дорожными покрытиями зимних лесных дорог показал, что он изменяется в широком диапазоне [8, 26, 27]. На сцепные свойства колес

оказывают влияние плотность снежного дорожного покрытия, его прочность, тип фрикционного материала, его плотность распределения, размер и фракционный состав материала, вид распределения фрикционного материала по дорожному покрытию, способ распределения и расположения на проезжей части лесной дороги, погодно-климатические факторы.

То же самое можно сказать и о прочностных показателях снежных дорожных покрытий. Выполненные нами исследования [13, 28] позволили сделать вывод о том, что в качестве дополнительного выходного параметра при оценке транспортно-эксплуатационных показателей зимних лесных дорог следует выбрать модуль динамического прогиба снежной дорожной поверхности. При анализе результатов измерения динамических прогибов снежных покрытий было выявлено, что они могут изменяться в достаточно широком диапазоне, поскольку оказываются под влиянием степени уплотнения снежной поверхности, типа снежной поверхности, его толщины, способа уплотнения снежного покрытия и природно-климатических факторов [11, 12, 29, 30].

Оценку прочностных свойств снежного дорожного покрытия D_n адекватно можно описать с помощью выражения

$$D_n = f(H_{\text{сн}}, N_p, P_{\text{сн}}), \quad (2)$$

где $H_{\text{сн}}$ — толщина снежного покрытия, см;

N_p — плотность распределения фрикционных материалов, кг/м²;

$P_{\text{сн}}$ — плотность снежного дорожного покрытия, г/см³.

Отсюда следует, что проблема оценки основных транспортно-эксплуатационных показателей зимних лесных дорог со снежными дорожными покрытиями относится к чрезвычайно сложной, многопараметрической задаче с взаимозависимыми параметрами и характеризуется неопределенностью в данных, т. е. ее решение в обычной формулировке невозможно. В связи с этим рекомендуется использовать методы, разработанные на основе построения обобщенного комплексного показателя.

В данном случае оценка транспортно-эксплуатационных показателей зимней лесной дороги будет заключаться в определении таких параметров, как значения коэффициента сцепления с дорожным покрытием через коэффициент сцепления и значения прочности дорожного покрытия по модулю динамического прогиба.

За обобщенный показатель эффективности примем сумму частных показателей. Ввиду того, что частные показатели имеют различные

физическую природу, размерности, способы измерения, их необходимо привести к обобщенному безразмерному виду.

Для возможности учета доли вклада для каждого частного показателя воспользуемся оценкой по коэффициентам весов, которые, в свою очередь, также номеруются таким образом, чтобы сумма коэффициентов была равна единице. При этом назначение приоритетов для любых частных показателей будет осуществляться присвоением отдельных весовых коэффициентов. Все весовые коэффициенты, в данном случае это k_1 и k_2 , при каждом частном показателе будут определяться только пользователем.

Таким образом, в общем виде разработанный обобщенный показатель эффективности транспортно-эксплуатационного состояния зимней лесной дороги C принимает вид

$$C = \frac{k_1 (\varphi_{\text{сц}_i} - \varphi_{\text{сц}_i, \text{min}})}{\varphi_{\text{сц}_i, \text{max}} - \varphi_{\text{сц}_i, \text{min}}} + \frac{k_2 (D_{\text{п}_i} - D_{\text{п}_i, \text{min}})}{D_{\text{п}_i, \text{max}} - D_{\text{п}_i, \text{min}}}, \quad (3)$$

где k_i — весовые коэффициенты частных критериев;

$\varphi_{\text{сц}_i, \text{min}}$, $\varphi_{\text{сц}_i, \text{max}}$ — минимальные и максимальные значения показателей коэффициента сцепления со снежной дорожной поверхностью;

$D_{\text{п}_i, \text{min}}$, $D_{\text{п}_i, \text{max}}$ — минимальные и максимальные значения модуля динамического прогиба снежного дорожного покрытия, МПа.

До начала проведения работ по оценке транспортно-эксплуатационного состояния лесотранспортной инфраструктуры в зимний период была разработана программа исследований их физико-механических характеристик (табл. 1).

В табл. 1 приняты следующие сокращения:

Сн — снежное дорожное покрытие;

Л — ледяное дорожное покрытие;

СДП — уплотненное снежное дорожное покрытие;

ЭП — эксплуатируемое снежное дорожное покрытие, обработанное песком;

ЭЩ — эксплуатируемое снежное дорожное покрытие, обработанное щебнем;

ЭПЩ — эксплуатируемое снежное дорожное покрытие, обработанное песчано-щебеночной смесью;

СЛДП — снежно-ледяное дорожное покрытие;

ЭСДП — эксплуатируемое обработанное фрикционными материалами снежное дорожное покрытие;

ЭСЛДП — эксплуатируемое обработанное фрикционными материалами снежно-ледяное дорожное покрытие;

Щ.СДПЩ — обработанное снежное дорожное покрытие с распределенной по нему щепой древесной;

ЩО.ЩСДП — обработанное снежное дорожное покрытие с распределенной по нему щепой древесной.

В качестве эксплуатационных материалов для повышения транспортно-эксплуатационных показателей использовали каменные — песок, щебень, песчано-щебеночные смеси [31–33] и древесные материалы — опил, щепа из отходов древесины [34, 35].

При обработке полученных опытно-экспериментальных данных применили методы обработки статистических данных [36].

Результаты и обсуждение

Основные физико-механические показатели снежных дорожных покрытий были получены в процессе эксплуатации участков зимних лесных дорог на полигоне, расположенном на территории Пермского края в период февраль — март 2024 г. Для обеспечения требуемых транспортно-эксплуатационных показателей были использованы эксплуатационные материалы (табл. 2).

В результате выполненных исследований получены значения прочностных показателей и коэффициентов сцепления зимних лесных дорог в зависимости от вида снежного покрытия и способов его содержания.

В качестве эксплуатационных показателей был использован коэффициент сцепления, полученный с помощью прибора ППК-МАДИ, а оценка прочностных показателей проводилась с применением электронного динамического плотномера типа ZFG-3000 GPS.

Методика измерения коэффициента сцепления предполагает подготовку дорожного покрытия перед измерением. Измерение толщины снежного или снежно-ледяного покрытия проводится измерительной линейкой. Измерение плотности снежного дорожного покрытия — методом режущего кольца с использованием набора ПГ-400. Норма распределения фрикционного материала проводилась методом взвешивания контрольного лотка. Прибор ППК-МАДИ устанавливался на подготовленную горизонтальную поверхность в полосе наката на дорожном покрытии (рис. 1).

Динамический плотномер со свободно падающим грузом ZFG-3000 GPS позволяет оценивать динамический прогиб дорожного

Т а б л и ц а 1

**Фрагмент программы оценки транспортно-эксплуатационного состояния
лесотранспортной инфраструктуры в зимний период**

**Fragment of the program for assessing the transport and operational state
of forestry transport infrastructure in the winter period**

Код серии	Условия эксплуатации	Код серии	Условия эксплуатации
Эксплуатируемое снежное дорожное покрытие, не обработанное		Эксплуатируемое снежное дорожное покрытие, обработанное щебнем фракции 5–10 мм	
1.1. Сн	СДП, плотность 0,35 г/см ³	6.2. ЭЩС	ЭСДП, плотность 0,35 г/см ³ , плотность посыпки 3,0 кг/м ²
1.3. Сн	СДП, плотность 0,55 г/см ³	6.4. ЭЩС	ЭСДП, плотность 0,65 г/см ³ , плотность посыпки 3,0 кг/м ²
1.5. Сн	СДП, плотность 0,65 г/см ³	6.5. ЭЩС	ЭСДП, плотность 0,65 г/см ³ , плотность посыпки 5,0 кг/м ²
1.8. Л	СЛДП, плотность 0,80 г/см ³	6.6. ЭЩС	ЭСЛДП, плотность 0,76 г/см ³ , плотность посыпки 1 кг/м ²
Эксплуатируемое снежное дорожное покрытие, обработанное песком фракции 0...5 мм		Эксплуатируемое снежное дорожное покрытие, обработанное щебнем фракции 10...15 мм	
2.2. ЭП	ЭСДП, плотность 0,35 г/см ³ , плотность посыпки 0,3 кг/м ²	4.2. ЭЩ	ЭСДП, плотность 0,35 г/см ³ , плотность посыпки 5,0 кг/м ²
2.4. ЭП	ЭСДП, плотность 0,55 г/см ³ , плотность посыпки 0,2 кг/м ²	4.3. ЭЩ	ЭСДП, плотность 0,65 г/см ³ , плотность посыпки 3,0 кг/м ²
2.6. ЭП	ЭСЛДП, плотность 0,76 г/см ³ , плотность посыпки 0,2 кг/м ²	4.6. ЭЩ	ЭСЛДП, плотность 0,76 г/см ³ , плотность посыпки 1 кг/м ²
2.7. ЭП	ЭСЛДП, плотность 0,76 г/см ³ , плотность посыпки 0,5 кг/м ²	4.7. ЭЩ	ЭСЛДП, плотность 0,76 г/см ³ , плотность посыпки 3 кг/м ²
Эксплуатируемое снежное дорожное покрытие, обработанное песчано-щебеночной смесью С2 (фракции 0...20)		Эксплуатируемое снежное дорожное покрытие, обработанное щебнем фракции 15...20 мм	
5.1. ЭПЩ	ЭСДП, плотность 0,35 г/см ³ , плотность посыпки 4,0 кг/м ²	3.2. ЭЩ	ЭСДП – плотностью 0,35 г/см ³ , плотность посыпки – 7,0 кг/м ²
5.4. ЭПЩ	ЭСДП, плотность 0,65 г/см ³ , плотность посыпки 6,5 кг/м ²	3.3. ЭЩ	ЭСДП, плотность 0,65 г/см ³ , плотность посыпки 5,0 кг/м ²
5.7. ЭПЩ	ЭСЛДП, плотность 0,76 г/см ³ , плотность посыпки 2 кг/м ²	3.5. ЭЩ	ЭСДП, плотность 0,65 г/см ³ , плотность посыпки 8,0 кг/м ²
5.8. ЭПЩ	ЭСЛДП, плотность 0,76 г/см ³ , плотность посыпки 35 кг/м ²	3.6. ЭЩ	ЭСЛДП, плотность 0,76 г/см ³ , плотность посыпки 3 кг/м ²
Эксплуатируемое снежное дорожное покрытие, обработанное щепой древесной из отходов фракции 5...10 (опил)		Эксплуатируемое снежное дорожное покрытие, обработанное щепой древесной из отходов фракции 20...100	
10.1. Щ. СЩДП	ЭСДП, плотность 0,60 г/см ³ , плотность посыпки 1,0 м ³ /м ²	11.1. ЩО. СЩДП	ЭСДП, плотность 0,60 г/см ³ , плотность посыпки 2,0 м ³ /м ²
10.2. Щ. СЩДП	ЭСДП, плотность 0,35 г/см ³ , плотность посыпки 2,0 м ³ /м ²	11.2. ЩО. СЩДП	ЭСДП, плотность 0,35 г/см ³ , плотность посыпки 3,0 м ³ /м ²
10.3. Щ. СЩДП	ЭСДП, плотность 0,60 г/см ³ , плотность посыпки 4,0 м ³ /м ²	11.3. ЩО. СЩДП	ЭСДП, плотность 0,60 г/см ³ , плотность посыпки 3,0 м ³ /м ²
10.4. Щ. СЩДП	ЭСЛДП, плотность 0,76 г/см ³ , плотность посыпки 1,0 кг/м ²	11.4. ЩО. СЩДП	ЭСЛДП, плотность 0,76 г/см ³ , плотность посыпки 4,0 кг/м ²
Эксплуатируемое снежное дорожное покрытие, обработанное щепой древесной из отходов фракции 10...50		Эксплуатируемое снежное дорожное покрытие, обработанное щепой древесной из отходов фракции 20...160	
20.1. Щ. СЩДП	ЭСДП, плотность 0,58 г/см ³ , плотность посыпки 1,0 м ³ /м ²	22.1. Щ. СЩДП	ЭСДП, плотность 0,61 г/см ³ , плотность посыпки 2,0 м ³ /м ²
20.2. Щ. СЩДП	ЭСДП, плотность 0,40 г/см ³ , плотность посыпки 2,0 м ³ /м ²	22.2. Щ. СЩДП	ЭСДП, плотность 0,41 г/см ³ , плотность посыпки 3,0 м ³ /м ²
20.3. Щ. СЩДП	ЭСДП, плотность 0,60 г/см ³ , плотность посыпки 4,0 м ³ /м ²	22.3. Щ. СЩДП	ЭСДП, плотность 0,62 г/см ³ , плотность посыпки 8,0 м ³ /м ²
20.4. Щ. СЩДП	ЭСЛДП, плотность 0,76 г/см ³ , плотность посыпки 2,0 кг/м ²	22.4. Щ. СЩДП	ЭСЛДП, плотность 0,76 г/см ³ , плотность посыпки 5,0 кг/м ²

Т а б л и ц а 2

**Характеристика эксплуатационных материалов, применяемых для
повышения транспортно-эксплуатационных показателей дорожных
покрытий зимних лесных дорог**

**Characteristics of operational materials used to improve the transport
and operational performance of road surfaces on winter forest roads**

Эксплуатационные материалы	Фракция, мм	Размер зерен материала, мм	Прочность, МПа	Норма распределения, кг/м ² (м ³ /100 м ²)
Песок	0...5	0,16...5,0	–	0,2...0,5
Посыпка антигололедная	0...2,5	0,16...2,5	600	0,2...0,6
Щебень	5...10	5...10	800	2,0...7,0
Щебень	5...15	5...15	800	2,0...5,0
Щебень	10...15	10...15	1000	3,0...7,0
Щебень	15...20	15...20	1000	5,0...8,0
Песчано-щебеночная смесь марки С2	0,16...20	0,16...20,0	1200	0,5...3,0
Древесные опилки	0...5	0,16...5,0	–	1,0...3,0 (м ³ /100 м ²)
Щепа древесная	10...50	10...50	–	2,0...4,0 (м ³ /100 м ²)
Щепа древесная	20...100	20...100	–	2,0...5,0 (м ³ /100 м ²)
Щепа древесная	20...160	20...160	–	2,0...8,0 (м ³ /100 м ²)

покрытия при падении груза на нагрузочную плиту, установленную на подлежащую испытанию обработанную снежную поверхность. Результаты испытаний в виде модуля динамического прогиба снежного дорожного покрытия, измеряемого в мегапаскалях (кН/м²), автоматически записываются на карту памяти.

При решении задачи оценки коэффициента сцепления по выражению (1) в качестве выходного параметра принималось значение сцепления колес лесовозного транспорта со снежной поверхностью, оцениваемого коэффициентом сцепления со снежной поверхностью в пределах изменения от 0,1 до 0,71. В качестве входных были использованы такие параметры, как плотность снежного дорожного покрытия, оцениваемого от свежеснежного до снежно-ледяных отложений (г/см³), размер зерен эксплуатационных материалов, используемых для обработки снежных дорожных покрытий лесных дорог (мм) и плотность распределения эксплуатационных материалов (кг/м²).

Динамический плотномер ZFG-3000 GPS имеет встроенную функцию построения графических зависимостей динамических прогибов в зависимости от времени. Для динамических деформаций характерны незначительные амплитуды и быстрое изменение значений (рис. 2, 3). Как видно из этих рисунков, распределение эксплуатационных материалов на покрытии существенно изменяет динамические показатели.

Анализ графиков динамических прогибов снежных покрытий показал, что на величину

прогибов оказывают влияние плотность дорожного покрытия и плотность распределения эксплуатационных материалов. С возрастанием нормы распределения изменяются и динамические показатели покрытий.

Анализ результатов измерения динамических прогибов снежных дорожных покрытий показывает, что они изменяются в широком диапазоне. Выбор в качестве критерия обобщенного показателя показал, что оценка транспортно-эксплуатационных показателей дорожных покрытий зимних лесных дорог характеризуется взаимозависимыми параметрами.

Из приведенного выше ясно, что задача оценки коэффициента сцепления и прочности зимних снежных дорожных покрытий лесных дорог характеризуется неопределенностью данных. Поэтому для ее решения следует использовать методы, разработанные на основе интеллектуальных систем. В данном случае при разработке интеллектуальной системы была использована адаптивная нейро-нечеткая продукционная сеть типа ANFIS (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System). Эта сеть имеет свойства продукционных нечетких систем на основе базы правил и свойства простых нейронных сетей, поэтому относится к системам гибридного типа. Сеть разработана в среде MatLab [38].

Рассмотрим параметры обучающих выборок для оценки транспортно-эксплуатационных показателей зимних лесных дорог по критерию коэффициента сцепления и модуля динамического прогиба (табл. 3).



а



б



в



г

Рис. 1. Опытно-экспериментальные исследования обработанных снежных дорожных покрытий: а — оценка прочности снежного покрытия, обработанного щебнем; б — оценка прочности снежного покрытия, обработанного щепой с помощью динамического плотнмера ZFG-3000 GPS; в — оценка коэффициента сцепления снежного покрытия, обработанного щебнем с помощью прибора ППК-МАДИ; г — оценка коэффициента сцепления снежного покрытия, обработанного щепой древесной с помощью прибора ППК-МАДИ

Fig. 1. Experimental studies of snow road surface: а — assessment of the strength of snow cover treated with crushed stone; б — assessment of the strength of the snow cover treated with wood chips using a dynamic density meter ZFG-3000 GPS; в — assessment of the coefficient of adhesion of snow cover treated with crushed stone using the PPK-MADI device; г — assessment of the coefficient of adhesion of snow cover treated with wood chips using the PPK-MADI device

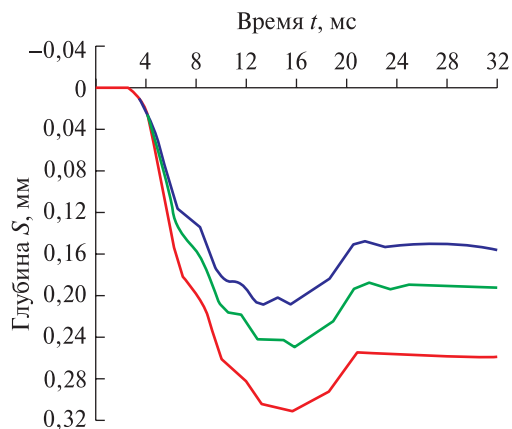


Рис. 2. Функция динамического прогиба снежного дорожного покрытия толщиной 15 см с плотностью $0,65 \text{ г/см}^3$. Динамический модуль $D_n = 116,8 \text{ МПа}$. Здесь и на рис. 3: красная линия — первый динамический прогиб; голубая линия — второй динамический прогиб; синяя линия — третий динамический прогиб

Fig. 2. Dynamic deflection function of a snow road surface 15 cm thick and $0,65 \text{ г/см}^3$ in density. Dynamic modulus $D_n = 116,8 \text{ МПа}$. Here and in fig. 3: red line — first dynamic deflection; blue line — second dynamic deflection; blue line — third dynamic deflection

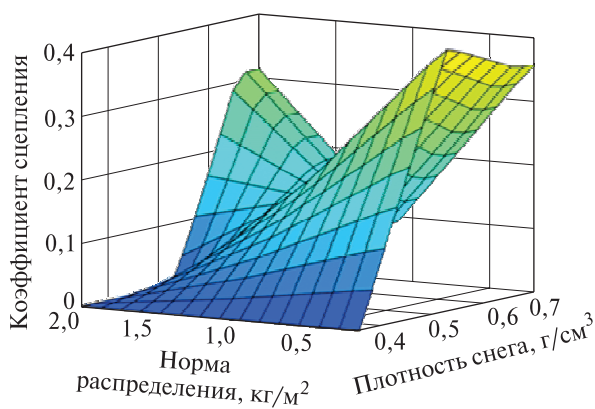


Рис. 4. Изменение коэффициента сцепления со снежным дорожным покрытием в зависимости от плотности снега и плотности распределения эксплуатационного материала (кг/м^2) для песка фракции $0...5 \text{ мм}$

Fig. 4. Change in the coefficient of adhesion to the snow road surface depending on the density of the snow and the distribution density of the operating material (кг/м^2) for sand fr. $0...5 \text{ мм}$

Выполнена оценка транспортно-эксплуатационных показателей снежной поверхности зимних лесных дорог по коэффициенту сцепления (рис.4, 5).

Можно наблюдать участки снежного покрытия с одинаковыми показателями по коэффициенту сцепления, но отличающиеся количественным распределением каменного материала.

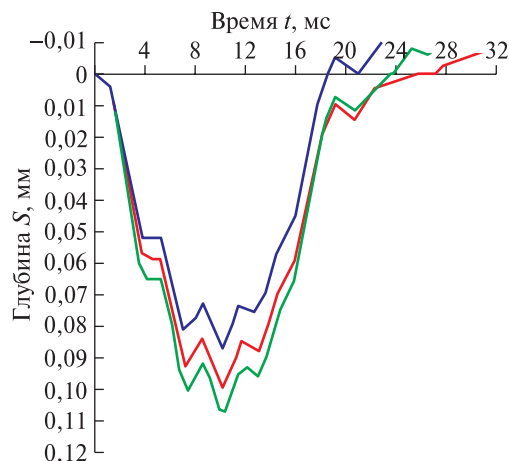


Рис. 3. Функция динамического прогиба снежного дорожного покрытия толщиной 18 см с плотностью $0,65 \text{ г/см}^3$, обработанного щебнем фракции $5...20$, плотность посыпки 10 кг/м^2 . Динамический модуль $D_n = 225,2 \text{ МПа}$

Fig. 3. Dynamic deflection function of a snow road surface 18 cm thick, thick and $0,65 \text{ г/см}^3$ in density treated with crushed stone of fraction $5...20$, sprinkling density 10 кг/м^2 . Dynamic modulus $D_n = 225,2 \text{ МПа}$

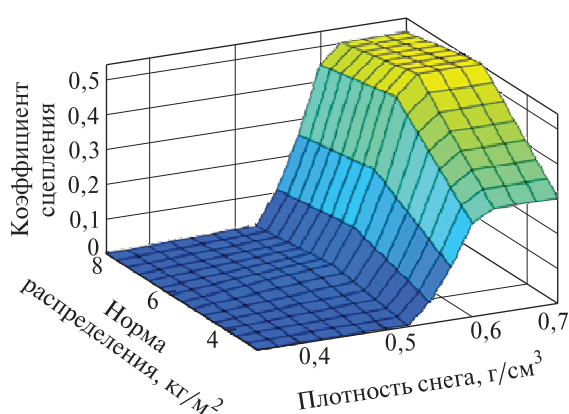


Рис. 5. Изменение коэффициента сцепления со снежным дорожным покрытием в зависимости от плотности снега и плотности распределения эксплуатационного материала (кг/м^2) для щебня фракции $5...15 \text{ мм}$

Fig. 5. Change in the coefficient of adhesion to the snow road surface depending on the density of the snow and the distribution density of the operating material (кг/м^2) for crushed stone fr. $5...15 \text{ мм}$

Решение задачи оценки прочностных свойств снежного дорожного покрытия проводилось с помощью выражения (2). В качестве выходного параметра принималась динамическая прочность уплотненного снежного дорожного покрытия, оцениваемого модулем динамического прогиба снежного дорожного покрытия.

Т а б л и ц а 3

Параметры обучающих выборок по критерию обобщенного показателя эффективности
Parameters of training samples according to the criterion of the generalized performance indicator

Номер выборки	Вид снежного дорожного покрытия	Плотность снежного дорожного покрытия, г/см ³	Фракция	Размер зерен эксплуатационного материала, мм	Плотность распределения эксплуатационных материалов, кг/м ² (м ³ /100 м ²);	Коэффициент сцепления	Модуль динамического прогиба снежного дорожного покрытия, МПа
1	Уплотненное	0,65	Не обработанное	Не обработанное	Не обработанное	0,28	110,8
2	Не уплотненное	0,35	5...10	5...10	2,0	0,31	36,4
3	Уплотненное	0,65	15...20	15...20	6,0	0,63	225,2
4	Не уплотненное	0,35	15...20	15...20	5,0	0,39	46,8
5	Снежно-ледяное покрытие	0,76	0... 20	0,16...20	3,0	0,32	284,6
6	Уплотненное	0,65	0...5	0,16...5	0,2	0,28	116,8
7	Уплотненное	0,65	0... 20	0,16...20	5,0	0,40	267,8
8	Уплотненное	0,65	8...16	8...16	4,0	0,36	172,5
9	Не уплотненное	0,35	5...20	5...20	5,0	0,33	46,5
10	Уплотненное	0,65	5...20	5...20	10,0	0,48	212,2
11	Снежно-ледяное покрытие	0,76	10...15	10...15	3,0	0,31	210,2
12	Не уплотненное	0,35	5...15	5...15	5,0	0,32	46,8
13	Ледяное покрытие	0,78	0...5	0,16...5	0,2	0,28	292,1
14	Уплотненное	0,65	5...10	5...10	5,0	0,42	192,2
15	Ледяное покрытие	0,78	5...10	5...10	5,0	0,32	277,8
16	Уплотненное	0,65	0,16...20	0,16...20	5,0	0,35	208,1
17	Уплотненное	0,65	0...5	0,16...5	2,0	0,25	98,3
18	Уплотненное	0,65	10...50	10...50	3,0	0,40	38,2
19	Уплотненное	0,65	20...100	20...100	5,0	0,36	36,4
20	Не уплотненное	0,35	20...160	20...160	5,0	0,33	24,5

Т а б л и ц а 4

Оценка параметров транспортно-эксплуатационных показателей снежного дорожного покрытия лесных дорог при плотности 0,65 г/см³
Evaluation of the parameters of transport and operational indicators of snow road's surfaces of forest roads at a density of 0,65 g/cm³

Наименование параметра	Варианты обработки снежных дорожных покрытий				
	I	II	III	IV	V
Размер зерен эксплуатационного материала Φ_p , мм	0...5	5...10	10...15	5...20	0...20
Плотность распределения материалов N_p , кг/м ² (м ³ /100 м ²)	0,2	5,0	4,0	7,0	5,0
Толщина снежного покрытия $H_{сн}$, см	9	17	23	18	19
Коэффициент сцепления $\Phi_{сц}$	0,28	0,49	0,36	0,48	0,37
Модуль динамического прогиба снежного покрытия $D_{п}$, МПа	116,8	192,2	172,5	212,2	208,1
Обобщенный показатель эффективности транспортно-эксплуатационного состояния снежного дорожного покрытия C	0,215	0,605	0,440	0,461	0,550

Наблюдаемый диапазон был зафиксирован в пределах от 38,2 до 277,3 МПа. В качестве входных параметров были использованы: плотность снежного дорожного покрытия (г/см^3), плотность распределения эксплуатационных материалов (кг/м^2 ; $\text{м}^3/100 \text{ м}^2$), толщина снежного дорожного покрытия (см). Для решения именно такого класса задач следует использовать методы теории оптимизации по весовым коэффициентам. Постановка задачи в содержательном виде выполнялась на основе выражения (3). Введем ограничения по показателям:

коэффициент сцепления с уплотненным снежным дорожным покрытием

$$\varphi_{\text{сц, min}} = 0,10; \varphi_{\text{сц, max}} = 0,71. \quad (4)$$

Модуль динамического прогиба снежного дорожного покрытия зимней лесной дороги, МПа

$$D_{\text{п, min}} = 38,2; D_{\text{п, max}} = 277,3. \quad (5)$$

Результаты исследований и расчетов по полученным уравнениям параметров сведены в табл. 4.

Выводы

1. Разработанный метод повышения транспортно-эксплуатационного состояния снежных дорожных покрытий зимних лесных дорог позволяет учитывать значительное количество внешних факторов, меняющихся в процессе эксплуатации дорог.

2. Использование обобщенного комплексного показателя позволяет оперативно оценивать эффективность зимнего содержания лесных дорог и влиять на основные транспортно-эксплуатационные показатели.

3. Особенностью методики является не только визуальное наблюдение за зимними лесными дорогами, но и их инструментальное обследование по критерию сцепления и динамического прогиба.

4. При проведении обследования используются приборы, получившие апробацию в дорожной отрасли, что положительно сказывается на полученные результаты измерений.

5. Выработаны требования к прочности снежных дорожных покрытий, к типам используемых фрикционных материалов и нормам их распределения по дорожным покрытиям.

6. Учитывая специфику эксплуатации зимних лесных дорог, с целью повышения их транспортно-эксплуатационных показателей предпочтение следует отдавать каменным фрикционным материалам фракции 5...10 мм.

Список литературы

- [1] Алябьев В.И., Ильин Б.А., Кувалдин Б.И., Грехов Г.Ф. Сухопутный транспорт леса. М.: Лесная промышленность, 1990. 416 с.
- [2] Вырко Н.П. Сухопутный транспорт леса. Минск: Высшая школа, 1987. 437 с.
- [3] Леонович И.И., Вырко Н.П., Мартынихин В.Д., Матвейко А.П. Дороги и транспорт лесной промышленности. Минск: Высшая школа, 1979. 416 с.
- [4] Козлов В.Г., Скрыпников А.В., Чернышова Е.В., Чирков Е.В., Поставничий С.А., Могутов Р.В. Теоретические основы и методы математического моделирования лесовозных автомобильных дорог // ИзВУЗ Лесной журнал, 2018. № 6 (366). С. 117–127.
- [5] Морозов С.И., Павлов Ф.А., Плакса Л.Н., Савельев Э.Н. Зимние дороги в лесной промышленности. М.: Лесная промышленность, 1969. 168 с.
- [6] Shapiro L.H., Johnson J.B., Sturm M., Blaisdell G.L. Snow Mechanics Review of the State of Knowledge and Applications // Cold Regions Research and Engineering Laboratory, CRREL, 1997, rep. 97–3, 126 p.
- [7] Дюнин А.К. В царстве снега. Новосибирск: Наука, 1983. 128 с.
- [8] Саблин С.Ю., Скрыпников А.В., Высоцкая И.А., Болтнев Д.Е., Никитин В.В., Жук А.Ю. Методика вычисления транспортно-эксплуатационных затрат на содержание лесовозной автомобильной дороги // Системы. Методы. Технологии, 2021. № 1 (49). С. 78–81.
- [9] Lee J. An improved slip-based model for tire-snow interaction // SAE Int. J. Mater. Manuf., 2011, v. 4(1), pp. 278–288.
- [10] Thompson M.P. Contemporary forest road management with economic and environmental objectives. PhD Dissertation, Oregon State University, Pro Quest Dissertations Publishing, 2009, 284 p.
- [11] ВСН 137–89 Проектирование, строительство и содержание зимних автомобильных дорог в условиях Сибири и северо-востока СССР. Введ. 1990.01.01 М.: Транспорт, 1991. 157 с.
- [12] Лабькин А.А., Кручинин И.Н., Ахтямов Э.Р., Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Овсейчик Д.В. Совершенствование методов технологического контроля уплотненного снежного покрова при строительстве и эксплуатации зимней транспортной инфраструктуры лесов // Системы. Методы. Технологии, 2023. № 4 (60). С. 147–154.
- [13] Лабькин А.А., Кручинин И.Н., Побединский В.В., Ахтямов Э.Р. Оценка транспортно-эксплуатационного состояния уплотненного снежного покрова зимних лесных дорог с использованием нейронных сетей // Деревообрабатывающая пром-ть, 2023. № 3. С. 3–10.
- [14] Коруннов М.М. Ускоренный способ постройки зимних дорог. М.: Гослестехиздат, 1946. 34 с.
- [15] Вуори А.Ф. Механические свойства снега как строительного материала // Физические методы исследования льда и снега. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 118 с.
- [16] Richmond P.W., Blaisdell G.L., Green C.E. Wheels and tracks in snow: Second validation study of the CRREL shallow snow mobility model // Cold Regions Research and Engineering Laboratory, CRREL, 1997, report 90–13. DOI:10.21236/ada230102

- [17] Кузьмин П.П. Физические свойства снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1957. 178 с.
- [18] Рихтер Г.Д. Снежный покров, его формирование и свойства. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1945. 76 с.
- [19] Галахов Н.Н. Снежный покров в лесу // Метеорология и гидрология, 1940. № 3. С. 15–16.
- [20] Войтковский К.Ф. Механические свойства снега. М.: Наука, 1977. 158 с.
- [21] Кожевников А.Н., Беляков В.В., Малыгин В.А. Уравнения связи параметров состояния снега и зависимости их от деформации снежного покрова // Проектирование, испытания, эксплуатация и маркетинг автотракторной техники. Н. Новгород: Изд-во НГТУ, 1997. С. 121–129.
- [22] Yong R.N., Fukue M. Performance of snow under confined compression // J. of Terramechanics, 1977, v. 14 (1), pp. 37–49.
- [23] Крагельский И.В., Шахов А.А. Изменение механических свойств снежного покрова во времени (затвердение) // Физико-механические свойства снега и их использование в аэродромном строительстве. М.: Изд-во АН СССР, 1945. С. 10–13.
- [24] Соустова Л.И., Чуйко И.Ю. Определение коэффициента сцепления колеса с дорогой расчетно-экспериментальным путем // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование, 2019. Т. 62. № 2. С. 68–77. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).68–77
- [25] Юшков В.С. Диагностика и оценка состояния автомобильных дорог // Молодой ученый, 2011. № 12 (35). Т. 1. С. 67–69.
- [26] СП 288.1328000.2016 Дороги лесные. Правила проектирования и строительства. М.: Стандартинформ, 2017. 66 с.
- [27] Руководство по оценке уровня содержания автомобильных дорог (временное). ОДМ 218.0.000-2003 Утверждено распоряжением Государственной службы дорожного хозяйства Министерства транспорта Российской Федерации от 19.12.2003 № ИС-28/8938-ис Росавтодор. М.: Информавтодор, 2003. 57 с.
- [28] Лабыкин А.А., Кручинин И.Н., Ахтямов Э.Р. Разработка требований к уплотненному снежному покрову зимних лесных дорог // Деревообрабатывающая пром-сть, 2023. № 2. С. 10–19.
- [29] Кручинин И.Н., Лабыкин А.А., Овсейчик Д.В., Побединский В.В., Бурмистрова О.Н., Авдеева В.С. Устройство для формирования уплотненного снежного покрытия. Патент на полезную модель № 219114.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО УГЛУТУ, RU. № 2023112508 заявл. 16.05.2023 г. опубл. 28.06.2023 г. 3 с.
- [30] Кандауров И.И. Механика зернистых сред и ее применение в строительстве. Л.: Стройиздат, Ленинградское отделение, 1988. 281 с.
- [31] Гарус И.А., Огар П.М., Рунова Е.М. Анализ условий эксплуатации и обоснование транспортных схем в условиях строительства лесовозных автомобильных дорог // Системы. Методы. Технологии, 2020. № 3 (47). С. 81–87.
- [32] Проваторова Г.В. Зимнее содержание автомобильных дорог. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2021. 67 с.
- [33] Гелес И.С., Коржицкая З.А. Биомасса дерева и ее использование. Петрозаводск: Изд-во КНЦ РАН, 1992. 230 с.
- [34] Черкасова Н.Г. Проблемы обращения с древесными отходами, образующимися в процессе лесозаготовки // Лесной и химический комплексы — проблемы и решения: сб. материалов по итогам Всерос. науч.-практ. конф., Красноярск, 29 октября 2021 года. Красноярск: Изд-во Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2022. С. 319–321.
- [35] Измаилов А.Ф., Солодов М.В. Численные методы оптимизации. М.: Физматлит, 2008. 320 с.
- [36] Piegat A. Fuzzy Modeling and Control: with 96 tables // Andrzej Piegat. Heidelberg; New York: Physic-Verl, 2001, 760 с.

Сведения об авторах

Кручинин Игорь Николаевич  — д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», kinaa.k@yandex.ru

Никитин Владимир Валентинович — д-р техн. наук, доцент, ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), nikitinvv@bmstu.ru

Бурмистрова Ольга Николаевна — д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», oburmistrova@ugtu.net

Щербakov Евгений Николаевич — канд. техн. наук, доцент, ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), scherbakov@bmstu.ru

Ахтямов Эльдар Рашидович — канд. техн. наук, директор ООО «Уральский научно-исследовательский институт строительных материалов» («УралНИИСтром»), ra@7359808.ru

Овсейчик Дарья Васильевна — аспирант, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», davbondarenko@mail.ru

Поступила в редакцию 20.12.2024.

Одобрено после рецензирования 10.04.2025.

Принята к публикации 21.05.2025.

IMPROVING TRANSPORT AND OPERATIONAL PERFORMANCE OF FORESTRY TRANSPORT INFRASTRUCTURE IN WINTER

I.N. Kruchinin¹✉, O.F. Nikitin², O.N. Burmistrova³,
E.N. Scherbakov², E.R. Akhtyamov⁴, D.V. Ovseychik¹

¹Ural State Forestry Engineering University, 37, Sibirsky tract st., 620100, Ekaterinburg, Russia

²BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

³Ukhta State Technical University, 13, Pervomaiskaya st., 169300, Ukhta, Komi Republic, Russia

⁴LLC UralNIIstrom, 5, Stalevarov st., 454047, Chelyabinsk, Russia

kruchininin@m.usfeu.ru

The results of improving methods for assessing the transport and operational condition of snow road surfaces on winter forest roads using a generalized complex indicator are presented. As the practice of developing timber resource bases shows, compacted snow cover is most often used as road surfaces in the winter. The use of snow as a road-building material causes significant difficulties in the operation of winter forest roads. The problem will be solved by the first developed methodology for assessing the transport and operational condition of snow road surfaces on winter forest roads using a generalized indicator, which determined the purpose of this work. The purpose of the research was to develop a method for assessing the transport and operational condition of snow road surfaces on winter forest roads based on a generalized complex indicator. The objectives of the research included: assessment of the transport and operational condition of road surfaces on winter forest roads; justification of the criteria for the generalized indicator of snow road surfaces; formation of training samples for setting up a neural network to assess the transport and operational state of snow road surfaces on winter forest roads for various criteria. The criteria for the generalized indicator were: the coefficient of adhesion between the wheels of timber transport vehicles and the snow surface and the strength of the snow road surface, modulo dynamic deflection. A set of studies has shown that the adhesion coefficient and strength of the snow cover will depend on the type of treatment and the distribution density of operating materials. In terms of overall properties, preference should be given to the treatment option with materials of fraction 5–10. In this case, the value of the generalized indicator of transport and operational condition should be at least 0,605, the coefficient of adhesion to the snowy road surface should be at least 0,4, with a dynamic deflection modulus of at least 195 MPa. Considering the sufficient adequacy of the data obtained, they can be recommended for increasing the transport and operational performance of winter forest roads and developing optimal plans for the winter maintenance of forest roads.

Keywords: winter forest roads, snow road surface, adhesion coefficient, dynamic deflection module of snow road surface

Suggested citation: Kruchinin I.N., Nikitin V.V., Burmistrova O.N., Shcherbakov E.N., Akhtyamov E.R., Ovseychik D.V. *Povyshenie transportno-ekspluatatsionnykh pokazateley lesotransportnoy infrastruktury v zimniy period* [Improving transport and operational performance of forestry transport infrastructure in winter]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 4, pp. 156–169.
DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-156-169

References

- [1] Alyab'ev V.I., Il'in B.A., Kuvaldin B.I., Grekhov G.F. *Sukhoputnyy transport lesa* [Land transport of forests]. Moscow: Lesnaya prom-st' [Forest industry], 1990, 416 p.
- [2] Vyrko N.P. *Sukhoputnyy transport lesa* [Land transport of forests]. Minsk: Vysshaya shkola [Higher School], 1987, 437 p.
- [3] Leonovich I.I., Vyrko N.P., Martynikhin V.D., Matveyko A.P. *Dorogi i transport lesnoy promyshlennosti* [Roads and transport of the forest industry]. Minsk: Vysshaya shkola [Higher. school], 1979, 416 p.
- [4] Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Chernyshova E.V., Chirkov E.V., Postavnichiy S.A., Mogutnov R.V. *Teoreticheskie osnovy i metody matematicheskogo modelirovaniya lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Theoretical foundations and methods of mathematical modeling of logging roads]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2018, no. 6 (366), pp. 117–127.
- [5] Morozov S.I., Pavlov F.A., Plaksa L.N., Savel'ev E.N. *Zimnie dorogi v lesnoy promyshlennosti* [Winter roads in the forestry industry]. Moscow: Lesnaya Promyshlennost' [Forest industry], 1969, 168 p.
- [6] Shapiro L.H., Johnson J.B., Sturm M., Blaisdell G.L. Snow Mechanics Review of the State of Knowledge and Applications. Cold Regions Research and Engineering Laboratory, CRREL, 1997, rep. 97–3, 126 p.
- [7] Dyunin A.K. *V tsarstve snega* [In the kingdom of snow]. Novosibirsk: Nauka, 1983, 128 p.
- [8] Sablin S.Yu., Skrypnikov A.V., Vysotskaya I.A., Boltnev D.E., Nikitin V.V., Zhuk A.Yu. *Metodika vychisleniya transportno-ekspluatatsionnykh zatrat na soderzhanie lesovoznoy avtomobil'noy dorogi* [Methodology for calculating transport and operating costs for the maintenance of a logging road]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2021, no. 1 (49), pp. 78–81.
- [9] Lee J. An improved slip-based model for tire–snow interaction. *SAE Int. J. Mater. Manuf.*, 2011, v. 4(1), pp. 278–288.
- [10] Thompson M.P. Contemporary forest road management with economic and environmental objectives. PhD Dissertation, Oregon State University, Pro Quest Dissertations Publishing, 2009, 284 p.

- [11] *VSN 137–89 Proektirovanie, stroitel'stvo i sodержanie zimnikh avtomobil'nykh dorog v usloviyakh Sibiri i severo-vostoka SSSR* [VSN 137–89 Design, construction and maintenance of winter roads in Siberia and the north-east of the USSR]. Introduced. 1990.01.01 Moscow: Transport, 1991, 157 p.
- [12] Labykin A.A., Kruchinin I.N., Akhtyamov E.R., Gorokhovskiy A.G., Shishkina E.E., Ovseychik D.V. *Sovershenstvovanie metodov tekhnologicheskogo kontrolya uplotnennogo snezhnogo pokrova pri stroitel'stve i ekspluatatsii zimney transportnoy infrastruktury lesov* [Improving the methods of technological control of compacted snow cover during the construction and operation of winter forest transport infrastructure]. *Sistemy Metody Tekhnologii* [Systems Methods Technologies], 2023, no. 4 (60), pp. 147–154.
- [13] Labykin A.A., Kruchinin I.N., Pobedinskiy V.V., Akhtyamov E.R. *Otsenka transportno-ekspluatatsionnogo sostoyaniya uplotnennogo snezhnogo pokrova zimnikh lesnykh dorog s ispol'zovaniem neyronnykh setey* [Assessment of the transport and operational state of compacted snow cover on winter forest roads using neural networks]. *Derevoobrabatyvayushchaya prom-t'* [Woodworking industry], 2023, no. 3, pp. 3–10.
- [14] Korunov M.M. *Uskorennyy sposob postroyki zimnikh dorog* [Accelerated method for constructing winter roads]. Moscow: Goslestekhzdat, 1946, 34 p.
- [15] Vuori A.F. *Mekhanicheskie svoystva snega kak stroitel'nogo materiala* [Mechanical properties of snow as a building material]. *Fizicheskie metody issledovaniya l'da i snega* [Physical methods for studying ice and snow]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1975, 118 p.
- [16] Richmond P.W., Blaisdell G.L., Green C.E. Wheels and tracks in snow: Second validation study of the CRREL shallow snow mobility model. Cold Regions Research and Engineering Laboratory, CRREL, 1997, report 90–13. DOI:10.21236/ada230102
- [17] Kuz'min P.P. *Fizicheskie svoystva snezhnogo pokrova* [Physical properties of snow cover]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1957, 178 p.
- [18] Rikhter G.D. *Snezhnyy pokrov, ego formirovanie i svoystva* [Snow cover, its formation and properties]. Moscow: Izd-vo Akademii nauk SSSR [Publishing house of the USSR Academy of Sciences], 1945, 76 p.
- [19] Galakhov N.N. *Snezhnyy pokrov v lesu* [Snow cover in the forest]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology], 1940, no. 3, pp. 15–16.
- [20] Voytkovskiy K.F. *Mekhanicheskie svoystva snega* [Mechanical properties of snow]. Moscow: Nauka, 1977, 158 p.
- [21] Kozhevnikov A.N., Belyakov V.V., Malygin V.A. *Urvneniya svyazi parametrov sostoyaniya snega i zavisimosti ikh ot deformatsii snezhnogo pokrova* [Equations for the relationship between snow state parameters and their dependence on snow cover deformation]. *Proektirovanie, ispytaniya, ekspluatatsiya i marketing avtotraktornoy tekhniki* [Design, testing, operation and marketing of automotive equipment]. N. Novgorod: NSTU, 1997, pp. 121–129.
- [22] Yong R.N., Fukue M. Performance of snow under confined compression. *J. of Terramechanics*, 1977, v. 14 (1), pp. 37–49.
- [23] Kragel'skiy I.V., Shakhov A.A. *Izmenenie mekhanicheskikh svoystv snezhnogo pokrova vo vremeni (zatverdenie)* [Changes in the mechanical properties of snow cover over time (hardening)]. *Fiziko-mekhanicheskie svoystva snega i ikh ispol'zovanie v aerodromnom stroitel'stve* [Physical and mechanical properties of snow and their use in airfield construction]. Moscow: Publ. USSR Academy of Sciences, 1945, pp. 10–13.
- [24] Soustova L.I., Chuyko I.Yu. *Opreделение koefitsienta stsepleniya koleasa s dorogoy raschetno-eksperimental'nyy putem* [Determination of the coefficient of adhesion of a wheel to the road by calculation and experiment]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. Systems analysis. Modeling], 2019, v. 62, no. 2, pp. 68–77. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).68–77
- [25] Yushkov V.S. *Diagnostika i otsenka sostoyaniya avtomobil'nykh dorog* [Diagnostics and assessment of the condition of highways]. *Molodoy uchenyy* [Young scientist], 2011, no. 12 (35), t. 1, pp. 67–69.
- [26] *SP 288.1328000.2016 Dorogi lesnye. Pravila proektirovaniya i stroitel'stva* [SP 288.1328000.2016 Forest roads. Design and construction rules.]. Moscow: Standartinform, 2017, 66 p.
- [27] *Rukovodstvo po otsenke urovnya sodержaniya avtomobil'nykh dorog (vremennoe). ODM 218.0.000-2003 Utverzhdeno rasporyazheniem Gosudarstvennoy sluzhby dorozhnogo khozyaystva Ministerstva transporta Rossiyskoy Federatsii ot 19.12.2003 № IS-28/8938-is Rosavtodor* [Guidelines for assessing the level of maintenance of roads (temporary). ODM 218.0.000-2003 Approved by the order of the State Road Service of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated 19.12.2003 No. IS-28/8938-is Rosavtodor]. Moscow: Informavtodor, 2003, 57 p.
- [28] Labykin A.A., Kruchinin I.N., Akhtyamov E.R. *Razrabotka trebovaniy k uplotnennomu snezhnomu pokrovu zimnikh lesnykh dorog* [Development of requirements for compacted snow cover of winter forest roads]. *Derevoobrabatyvayushchaya prom-st'* [Woodworking industry], 2023, no. 2, pp. 10–19.
- [29] Kruchinin I.N., Labykin A.A., Ovseychik D.V., Pobedinskiy V.V., Burmistrova O.N., Avdeeva V.S. *Ustroystvo dlya formirovaniya uplotnennogo snezhnogo pokrytiya* [Device for forming compacted snow cover]. Patent for utility model No. 219114.; applicant and patent holder FSBEI HE USLTU, RU. No. 2023112508 declared 16.05.2023 published 28.06.2023, 3 p.
- [30] Kandaurov I.I. *Mekhanika zernistyykh sred i ee primeneniye v stroitel'stve* [Mechanics of granular media and its application in construction]. Leningrad: Stroyizdat, Leningrad Branch, 1988, 281 p.
- [31] Garus I.A., Ogar P.M., Runova E.M. *Analiz usloviy ekspluatatsii i obosnovaniye transportnykh skhem v usloviyakh stroitel'stva lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Analysis of operating conditions and substantiation of transport schemes in the conditions of construction of logging roads]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2020, no. 3 (47), pp. 81–87.
- [32] Provatorova G.V. *Zimnee sodержanie avtomobil'nykh dorog* [Winter maintenance of roads]. Vladimir: VISU Publishing House, 2021, 67 p.

- [33] Geles I.S., Korzhitskaya Z.A. *Biomassa dereva i ee ispol'zovanie* [Wood biomass and its use]. Petrozavodsk: KSC RAS, 1992, 230 p.
- [34] Cherkasova N.G. *Problemy obrashcheniya s drevesnymi otkhodami, obrazuyushchimisya v protsesse lesozagotovok* [Problems of handling wood waste generated during logging]. Lesnoy i khimicheskiy komplekсы – problemy i resheniya: sb. mater. po itogam Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Forestry and chemical complexes — problems and solutions: collection of materials based on the results of the All-Russian scientific and practical conference], Krasnoyarsk, October 29, 2021. Krasnoyarsk: Sibirskiy gosudarstvennyy universitet nauki i tekhnologii imeni akademika M.F. Reshetneva [Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev], 2022, pp. 319–321.
- [35] Izmailov A.F., Solodov M.V. *Chislennyye metody optimizatsii* [Numerical optimization methods]. Moscow: Fizmatlit, 2008, 320 p.
- [36] Piegat A. *Fuzzy Modeling and Control: with 96 tables*. Andrzej Piegat. Heidelberg; New York: Physic-Verl, 2001, 760 c.

Authors' information

Kruchinin Igor' Nikolaevich✉ — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Ural State Forestry University, kinaa.k@yandex.ru

Nikitin Vladimir Valentinovich — Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), nikitinvv@bmstu.ru

Burmistrova Ol'ga Nikolaevna — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Ukhta State Technical University, oburmistrova@ugtu.net

Shcherbakov Evgeniy Nikolaevich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), scherbakov@bmstu.ru

Akhtyamov El'dar Rashidovich — Cand. Sci. (Tech.), Director of UralNIИstrom LLC, ra@7359808.ru

Ovseychik Dar'ya Vasil'evna — pg. of the Ural State Forestry University, davbondarenko@mail.ru

Received 20.12.2024.

Approved after review 10.04.2025.

Accepted for publication 21.05.2025.

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КОНТРОЛЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ ОТПАДА В ЛЕСУ

С.П. Карпачев¹✉, В.И. Запруднов¹, С.В. Посыпанов²

¹ФГАОУ 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

²ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), 163002, Россия, г. Архангельск, Набережная Северной Двины, д. 17

karpachevs@mail.ru

Рассмотрен комплекс санитарно-оздоровительных мероприятий в лесу, включающий в себя уборку древесины отпада с одновременной количественной и качественной оценкой характеристик древесины отпада на всем участке леса с заданной точностью в реальном масштабе времени в процессе уборки. Рассмотрен вариант уборки отпада с переработкой древесины на щепу в лесу. Указаны основные машины осуществляющие уборку по технологическим полосам, в частности мобильная лебедка и рубительная машина. С использованием натурных данных, на математической модели проведены исследования оценки объема и качества древесины отпада методами имитационного моделирования на основе метода линейных пересечений. Установлено, что при объеме древесины отпада от 5 до 50 м³/га потребная общая длина технологических полос для показателя точности $P = 20\%$ находится в пределах от 500 до 6000 м. Определено, что ошибки между истинными значениями объема отпада и его оценками не превысили по абсолютной величине 11,3 %. Установлено, что время учета и оценки объема древесины отпада уменьшается с увеличением объема древесины отпада на участке. Установлено, что основными факторами являются длина технологических полос и объем древесины отпада на участке. Показано, что производительность на учете и оценке объема древесины отпада увеличивается с увеличением объема древесины отпада на участке.

Ключевые слова: древесина отпада, санитарно-оздоровительные мероприятия, метод линейных пересечений, имитационное моделирование, математическая модель

Ссылка для цитирования: Карпачев С.П., Запруднов В.И., Посыпанов С.В. Моделирование технологии контроля и регулирования древесины отпада в лесу // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 4. С. 170–182. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-170-182

В целях устойчивого развития урбанизированных лесных экосистем и неистощимого лесопользования следует проводить исследования скоплений древесины отпада в лесу, давать им оценку и регулировать накопление.

Под древесиной отпада понимают упавшие и лежащие на земле в лесу стволы деревьев, их части и ветви.

Падение деревьев в насаждении может быть вызвано различными причинами, в частности естественным отмиранием, связанным с жизнедеятельностью лесных биосистем и природными факторами, например, ветровалом, снеговалом и т. п.

Ежегодный естественный отпад древесины в лесах достигает большого объема. В Московской области такой объем составляет в среднем 2 м³/га или около 3 млн м³ на всю территорию области, занятую лесами [1]. С учетом

накопленного за годы отпада, его объем на отдельных участках леса превышает 20 м³/га. В захламленных лесах проводятся санитарные мероприятия с удалением древесины отпада, назначаемые по результатам лесопатологических обследований. Уборка древесины отпада актуальна прежде всего для часто посещаемых урбанизированных территорий леса.

К древесному отпаду, подлежащему удалению, относятся усыхающие, ветровальные и буреломные деревья, а также деревья, пораженные стволовыми вредителями. Часть древесины отпада можно использовать как биотопливо, например в качестве дров для местных нужд, а часть — следует оставить в лесу на перегнивание как удобрение [1–3]. В еловых древостоях этот объем составляет порядка 40 % запаса древостоя [4].

Таким образом, для оценки и прогнозирования развития лесопатологической ситуации в лесу, оценки возможного объема переработки отпада на биотопливо, информация об объеме

и качестве древесины отпада, степени поражения ее стволовыми вредителями и о других характеристиках является чрезвычайно важной. В настоящее время эту информацию получают в результате визуальных обследований участков леса [5]. На основе полученных таким путем данных о древесине отпада делается вывод о необходимости проведения санитарных мероприятий и планируются работы по уборке отпада. Точность визуальных оценок объема и качества отпада не велика и зависит от опыта учетчика. Вместе с тем для прогнозирования влияния отпада на санитарное состояние леса и определения объема древесины отпада, которую можно использовать, например для производства дров, необходима точная информация.

Цель работы

Цель работы — в рамках проведения санитарно-оздоровительных мероприятий предложить и исследовать технологию уборки древесины отпада с одновременной количественной и качественной оценкой характеристик древесины отпада на обследуемом участке леса с заданной точностью и в реальном масштабе времени в процессе уборки (далее — технология уборки отпада).

Материалы и методы

Для оценки количественных и качественных характеристик древесины отпада используется метод линейных пересечений (МЛП) [6–28]. Он заключается в том, что на обследованном участке леса разбивают отрезки прямых линий в определенном порядке [1, 6, 25]. Эти линии в МЛП называют линиями отбора. Затем учитываются все стволы отпада, которые пересеклись с линиями отбора. По отпаду, как по статистической выборке, делают вывод о характеристиках совокупности древесины отпада на всем участке. С заданной точностью определяют объем древесины отпада, процент поражения отпада стволовыми вредителями, объем древесины, пригодной для переработки в полезную продукцию, например на топливную щепу или на дрова и т. д.

Математический аппарат МЛП сочетается с технологией уборки отпада мобильными машинами с лебедкой. Размотанный по участку трос лебедки, в теории МЛП, можно рассматривать как линию отбора. Длина троса лебедки зависит как от технических параметров машины, так и от природных характеристик леса, в частности от плотности растущего древостоя. На практике

длина троса составляет 20...30 м. Как показал опыт работы в лесу, линию троса такой длины в среднем пересекают 1–2 ствола древесины отпада.

В лесу учет отпада удобно проводить не по всему участку, а по технологическим полосам, на которые предварительно разбивают обследуемый участок леса.

Рассматриваемая технология уборки отпада по МЛП предусматривает выполнение нескольких последовательных действий (рис. 1).

На первом этапе работ участок леса, на котором проводят оценку и уборку древесины отпада, разбивают на технологические полосы шириной, равной или больше чем максимальная длина стволов отпада ($b > l_{\max}$).

Далее в начале каждой технологической полосы устанавливают мобильную лебедку. После этого рабочий-чокеровщик разматывает трелевочный трос на всю длину, двигаясь вдоль технологической полосы по прямой линии. Все стволы отпада, оказавшегося на линии троса, учитываются, при этом измеряется их длина и диаметр. Дополнительно, в зависимости от целей оценки отпада, можно проводить учет деловой части стволов, степень их поражения вредителями, гнилью, определять породу и другие характеристики.

После учета, отпад трелюют с каждой технологической полосы с помощью лебедки в начало полосы, где его оставляют в пачках для дальнейшей переработки, например измельчения, переработки на дрова или разделки на коротыши с последующей укладкой в поленицы на перегнивание в лесу.

Следует отметить, что в случае сильно захламленных полос сначала обозначают линию троса, например вешками и трелевку начинают с ближайших к лебедке стволов отпада. Учет отпада в этом случае проводят по мере очистки полосы.

Пересеченный тросом лебедки отпад является статистической выборкой, по которой, используя математический аппарат МЛП, можно определить характеристики всего отпада на участке. Причем если результаты учета сразу заносить, например в карманный компьютер, то оценку отпада можно получать в реальном масштабе времени и в соответствии с этими данными оперативно вносить корректировку в процесс уборки отпада. Точность оценки зависит от объема выборки, т. е. числа учтенных стволов отпада по технологическим полосам. Благодаря этому, с переходом от одной технологической полосы к каждой последующей увеличивается объем выборки и, следовательно, точность оценки будет расти.

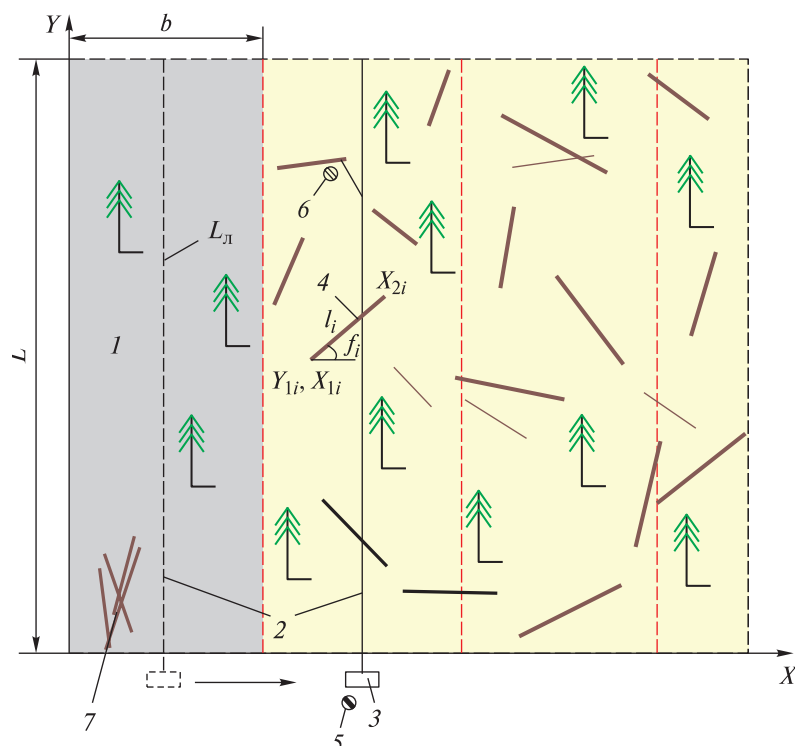


Рис. 1. Схема учета и уборки древесины отпада: 1 — технологическая полоса; 2 — трелевочный трос лебедки; 3 — лебедка; 4 — ствол древесины отпада; 5 — оператор лебедки; 6 — чокеровщик; 7 — стрелеванная с технологической полосы пачка древесины отпада; X_{1i} , Y_{1i} — координаты вершины i -го ствола отпада; X_{2i} , Y_{2i} — координаты комля i -го ствола отпада; l_i — длина i -го ствола отпада; f_i — угол ориентации i -го ствола отпада; b — ширина технологической полосы; L_n — длина троса лебедки

Fig. 1. Scheme of accounting and harvesting of waste wood: 1 — technological strip; 2 — skidding winch cable; 3 — winch; 4 — fallen timber trunk; 5 — winch operator; 6 — choker; 7 — fallen timber bundle shot from the technological strip; X_{1i} , Y_{1i} — coordinates of the top of the i -th fallen wood bundle; X_{2i} , Y_{2i} — coordinates of the top of the i -th fallen wood bundle; l_i — length of the i -th waste wood bundle; f_i — orientation angle of the i -th fallen wood bundle; b — width of the technological strip; L_n — length of the winch cable

Объем древесины отпада, приходящийся на 1 га площади участка, определяется по формуле

$$V_{\text{га}} = \frac{5000\pi}{L_n l_{\text{cp}}} \left(\frac{\sum_{i=1}^k v_i}{n} \right), \quad (1)$$

где $V_{\text{га}}$ — объем древесины естественного отпада, приходящийся на 1 га площади участка, м³/га;

L_n — длина троса лебедки, м;

l_{cp} — средняя длина ствола древесины отпада, м;

v_i — объем i -го ствола древесины естественного отпада, пересекшегося с тросом лебедки, м³;

k — число стволов древесины естественного отпада, пересекшихся на n технологических полосах с тросом лебедки, шт.;

n — число технологических полос, шт.

Средняя длина ствола древесины отпада определяется по результатам измерения длины всех стволов отпада, пересекшихся с линией троса на всех n технологических полосах

$$l_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^k l_i}{n}. \quad (2)$$

Объем i -го ствола древесины естественного отпада v_i , пересекшегося с тросом лебедки, может быть определен как объем цилиндра



Рис. 2. Стволовые части древесины отпада с сучьями (Тверская область, фото С.П. Карпачева)

Fig. 2. Stem parts of waste wood with branches (Tver region, photo by S.P. Karpachev)

или усеченного конуса по результатам прямых измерений его диаметра и длины.

Стволы отпада могут значительно отличаться от цилиндров и конусов. Иногда отпад представляют упавшие деревья с сучьями и ветками (рис. 2). Если требуется высокая точность оценки объема отпада, например в исследовательских целях, то в формуле (1) объем ствола древесины отпада уместно рассматривать как его атрибут. На практике значение этого атрибута можно получить по результатам измерения объема щепы, полученной в результате измельчения отпада. Тогда объем древесины в плотных кубических метрах (пл. м³) всего стрелеванного отпада будет равен

$$\sum_{i=1}^k v_i = K_{\text{пдр}} \sum_{i=1}^k v_{\text{щ}_i}, \quad (3)$$

где $v_{\text{щ}_i}$ — насыпной объем щепы, полученный из i -го ствола древесины отпада, пересекшегося с тросом лебедки, нас.м³;

$K_{\text{пдр}}$ — коэффициент полнодревесности щепы.

Для определения объема щепы по формуле (3) может применяться объемный или весовой метод учета щепы. Для этого рубительная машина должна быть снабжена устройством для учета щепы. В самом простом виде это может быть мерная емкость, например мягкий контейнер типа *bigbag* объемом 1 м³.

Математический аппарат МЛП, применяемый в рассматриваемой технологии уборки отпада, позволяет определять кроме объема и другие характеристики древесины отпада, в частности долю той или иной породы в скоплении отпада, степень поражения древесины вредителями, долю деловой древесины и пр. [1, 3, 25]. Например, процент древесины, пригодной для переработки на топливную щепу или на дрова, в общем объеме отпада может быть установлен по выборке пересеченных тросом стволов отпада по формуле

$$P_V = \frac{V_{\text{сум}} - V_{\text{тщд}}}{V_{\text{сум}}} 100, \quad (4)$$

где $V_{\text{сум}}$ — общий объем древесины в выборке отпада, м³;

$V_{\text{тщд}}$ — объем древесины, пригодной для переработки в топливную щепу (дрова), м³.

Следует иметь в виду, что полусгнившая и сгнившая часть древесины отпада не может быть стрелевана (рис. 3). Такую древесину, попавшую на линию троса, учитывают и оставляют на месте ее нахождения.

Точность и эффективность оценки отпада была исследована на математических моделях методами имитационного моделирования [29–41]. Моделировался участок леса с технологическими полосами размером $L \times b$. Считалось, что



Рис. 3. Частично и полностью сгнившая древесина отпада, не подлежащая трелевке (Тверская область, фото С.П. Карпачева)

Fig. 3. Partially and completely rotten waste timber not subject to skidding (Tver Oblast, photo by S.P. Karpachev)

через середину ширины каждой технологической полосы по всей ее длине проходит трос лебедки, который в модели представлялся в виде отрезка прямой линии.

В имитационных экспериментах использовались данные визуального и инструментального обследования древесины отпада на лесных участках в Тверской области (Селижаровский район, 2020–2024 гг., см. рис. 2, 3), характеризующиеся высокой степенью захламленности (более 20 м³/га). Стволы древесины отпада представляли собой упавшие деревья разных лет. Уборка отпада на этих участках леса не проводилась.

Для древесины отпада были приняты следующие законы распределения:

- координат стволов древесины отпада по участку — равномерный;
- угла ориентации стволов отпада по участку — равномерный;
- длины стволов отпада — нормальный.

В модели по каждому i -му стволу отпада на технологической полосе определяли (см. рис. 1) координаты верхней части X_{1i} и Y_{1i} , угол ориентации f_i , длину l_i , которые разыгрывались по принятым выше законам.

Координата ствола отпада в его верхней части X_{1i} определялась на интервале

$$0 < X_{1i} \leq b, \quad (5)$$

где b — ширина технологической полосы (в модели принята равной 20 м).

Угол ориентации ствола отпада f_i на участке определялся на интервале

$$-\frac{\pi}{2} < f_i \leq +\frac{\pi}{2}. \quad (6)$$

Координата нижней части ствола отпада X_{2i} определялась расчетом

$$X_{2i} = X_{1i} + l_i \cos f_i. \quad (7)$$

Факт пересечения ствола отпада с тросом лебедки в данной технологической полосе определялся условием

$$X_{1i} < \frac{b}{2}; \quad X_{2i} \geq \frac{b}{2}. \quad (8)$$

Координата Y_{1i} ствола отпада в его верхней части определялась на интервале

$$0 < Y_{1i} \leq L, \quad (9)$$

где L — длина технологической полосы, равная максимальной длине троса лебедки $L_{л. \max}$.

Для j -й технологической полосы координата Y_{1i} в модели принималась равной

$$Y_{1i} = L_{л. ji}, \quad (10)$$

где $L_{л. ji}$ — текущая длина троса лебедки, где произошло пересечение со стволом отпада.

Длина ствола отпада l_i устанавливалась по нормальному закону со средним значением 8 м и стандартным отклонением 1 м.

Каждому стволу древесины отпада назначался атрибут — его объем v_i , который зависит от его диаметра и длины. Собранные нами данные натурных измерений не выявили корреляцию между этими величинами. Исходя из этого в модели объем ствола отпада определяли независимо от его длины по нормальному закону со средним значением 0,2 м³ и стандартным отклонением 0,05 м³. Точность оценки общего объема древесины отпада на участке определяли по формуле (1).

Полученную в экспериментах оценку объема сравнивали с его действительным значением и определяли ошибку оценки по формуле

$$\text{Error} = \frac{V_{\text{оц}} - V_{\text{д}}}{V_{\text{оц}}} \cdot 100 \%, \quad (11)$$

где $V_{\text{оц}}$ — оценка объема древесины естественного отпада на участке, м³/га;

$V_{\text{д}}$ — действительный объем древесины отпада на участке, м³/га.

Количество технологических полос, необходимое для оценки объема древесины отпада на участке, определялось для показателя точности $P = 20 \%$ с вероятностью результата 0,95. На практике, в первом приближении, число технологических полос можно установить по результатам первичного визуального лесопатологического обследования с последующей корректировкой по результатам фактического учета отпада на технологических полосах.

В модели было задано количество стволов отпада на участке. Потребное число технологических полос определялось по формуле

$$n_L = \frac{Var \cdot t^2}{P^2}, \quad (12)$$

где Var — коэффициент вариации, %;

P — показатель точности, %;

t — показатель достоверности.

Коэффициент вариации определи по формуле

$$Var = \frac{100\sigma}{M}, \quad (13)$$

где σ — стандартное отклонение;

M — математическое ожидание числа стволов отпада, пересекших линию троса лебедки в данной технологической полосе.

Математическое ожидание числа пересечений стволов отпада с линией троса лебедки определяли по формуле

$$M = pN_{\text{сум}}, \quad (14)$$

где $N_{\text{сум}}$ — общее число стволов древесины отпада на технологической полосе, шт.;

p — вероятность пересечения линии троса лебедки со стволом древесины отпада, определяемая уравнением

$$p = \frac{2l_{\text{ср}}}{b\pi}. \quad (15)$$

Стандартное отклонение определяли по формуле

$$\sigma = \sqrt{p(1-p)N_{\text{сум}}}. \quad (16)$$

Для оценки эффективности технологии уборки древесины отпада с одновременной количественной и качественной оценкой характеристик древесины отпада достаточно рассмотреть только работу лебедки, поскольку именно на этом этапе производится учет отпада. Для более полной оценки предложенной технологии уборки отпада следует рассмотреть весь технологический процесс, включая и переработку собранного отпада.

В настоящее время при очистке леса от захламленности собранную древесину отпада либо распиливают бензопилами на короткие бревна и укладывают в поленницы для дальнейшего перегнивания в лесу, либо измельчают в щепу, которую оставляют на месте [29–35]. В настоящей работе рассмотрен вариант технологии, когда всю собранную древесину отпада измельчают на щепу. При этом часть щепы остается в лесу на удобрение, а часть используется как топливная щепа для нужд биоэнергетики.

По принятой технологии общее время цикла $T_{\text{сум}}$ на выполнение операций на каждой технологической полосе, включающее в себя время на учет отпада, трелевку и переработку его на щепу, будет составлять

$$T_{\text{сум}} = \sum_{j=1}^n \left((t_{1j} + t_{2j}) + \sum_{i=1}^{N_j} (t_{3ji} + t_{4ji} + t_{5ji}) \right), \quad (17)$$

где n — число технологических полос на участке;

N_j — число стволов отпада на j -й технологической полосе;

t_{1j} — время перемещения мобильной рубительной машины к j -й технологической полосе, с;

t_{2j} — время на разматывание троса лебедки и учета числа пересечений стволов древесины отпада на j -й технологической полосе, с;

t_{3ij} — время на чокеровку i -го ствола древесины отпада на j -й технологической полосе, с;

t_{4ij} — время трелевки i -го ствола древесины отпада на j -й технологической полосе, с;

t_{5ij} — время на измельчение i -го ствола древесины отпада в щепу и ее учета на j -й технологической полосе, с.

В случае если пересечение стволов отпада равно нулю, то, соответственно, время цикла на такой технологической полосе определяется как

$$T_{\text{сум}} = \sum_{j=1}^n (t_{1j} + t_{2j}). \quad (18)$$

Отметим, что все временные циклы являются случайными величинами. В модели все циклы были заданы как случайные величины, распределенные по экспоненциальному закону.

Часовую производительность без учета простоев определяли как сумму всего стрелеванного и оцененного отпада за 1 ч

$$П_{\text{ч}} = \frac{3600V_{\text{сум}}}{T_{\text{сум}}}, \quad (19)$$

где $V_{\text{сум}}$ — общий объем стрелеванной и оцененной древесины отпада, м³.

Результаты и обсуждение

При планировании имитационных экспериментов была принята длина технологической полосы, равной длине троса лебедки 20 м (она же длина линии отбора в теории МЛП). Ширина полосы $b = 20$ м.

Число стволов древесины отпада на участке определялось как отношение среднего объема древесины отпада на участке к среднему объему одного ствола отпада.

Матрица планирования имитационных экспериментов для оценки объема древесины отпада на участке представлена в таблице.

Как следует из формулы (12), необходимое число технологических полос уменьшается по степенной зависимости с увеличением количества стволов древесины отпада на полосе. На практике уместно определять не необходимое число технологических полос, а их общую длину — суммарную длину полос, равную суммарной длине линий троса лебедки. По результатам экспериментов была получена такая зависимость (рис. 4). Для показателя точности $P = 20$ % потребная суммарная длина технологических полос находится в пределах от 500 до 6000 м при изменении объема древесины отпада от 50 до 5 м³/га.

Для того чтобы на практике определить потребную суммарную длину технологических полос для получения характеристик отпада с заданной точностью, можно воспользоваться графиком зависимости среднего числа пересечений стволов отпада с линией троса лебедки. На рис. 5 представлена зависимость числа пе-

Матрица планирования имитационных экспериментов

Simulation experiments planning matrix

Номер опыта	Заданный объем древесины отпада на участке, м ³ /га	Расчетное число стволов древесины отпада на участке, шт./га	Расчетный объем древесины отпада на полосе, м ³ /полоса	Расчетное число стволов древесины отпада на полосе, шт./полоса
1	5	25	0,2	1
2	10	50	0,4	2
3	15	75	0,6	3
4	20	100	0,8	4
5	25	125	1	5
6	30	150	1,2	6
7	35	175	1,4	7
8	40	200	1,6	8
9	45	225	1,8	9
10	50	250	2	10

ресечений стволов отпада на технологической полосе длиной 20 м, что соответствует длине линии троса лебедки, позволяющая уже после учета стволов отпада на 10...20 технологических полосах определить по среднему числу пересечений примерный объем древесины отпада и по графику (см. рис. 4) установить потребную суммарную длину технологических полос. В дальнейшем в процессе учета отпада следует постоянно переоценивать объем отпада и корректировать потребную суммарную длину технологических полос.

Точность оценки объема древесины отпада устанавливали по расхождению между истинным значением объема и его оценкой. В сериях экспериментов (рис. 6) были получены оценки объема древесины отпада и их истинные значения в зависимости от объема древесины отпада.

Анализ результатов серий имитационных экспериментов показал, что ошибки в оценке объема между истинными значениями объема отпада и его оценками, рассчитанными по формуле (11), не превысили по абсолютной величине 11,3 %. При этом отклонение оценок не зависит от объема отпада на участке (см. рис. 6).

Результаты имитационного моделирования позволили установить потребное время на учет и оценку объема древесины отпада на участке (рис. 7) по формулам (17) и (18). Кроме того, была установлена производительность труда по учету и оценке объема отпада на участке (рис. 8) по формуле (19).

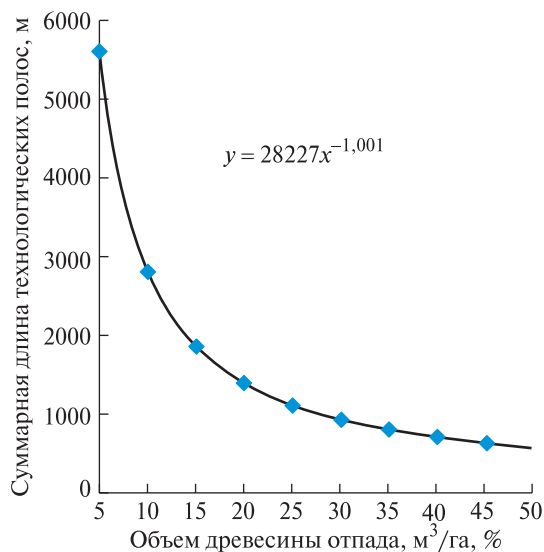


Рис. 4. Зависимость необходимой суммарной длины технологических полос от объема древесины отпада
Fig. 4. Dependence of the required total length of technological strips on the volume of waste wood

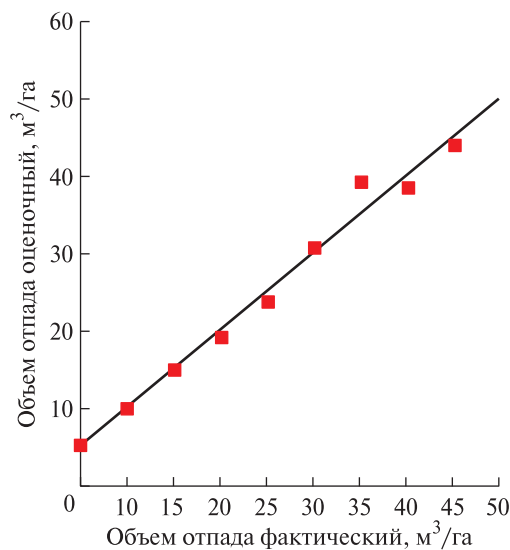


Рис. 6. Оценка и истинные значения объема древесины отпада
Fig. 6. Estimated and true values of waste wood volume

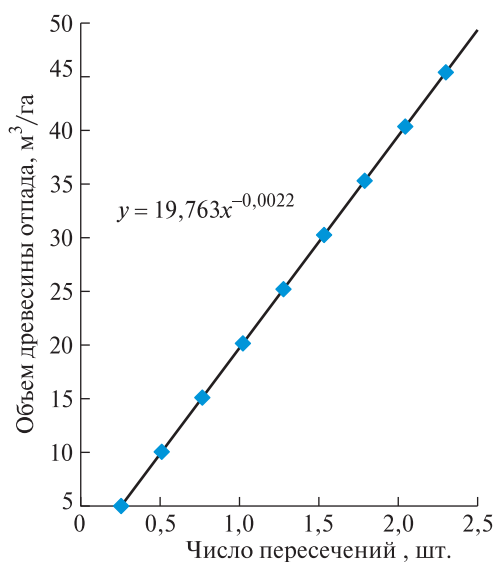


Рис. 5. Зависимость объема древесины отпада на участке от числа пересечений стволов отпада с линией троса лебедки на технологической полосе длиной 20 м
Fig. 5. Dependence of the volume of waste wood on the site on the number of crossings of fallen trunks with the winch cable line on the 20 m long technological strip

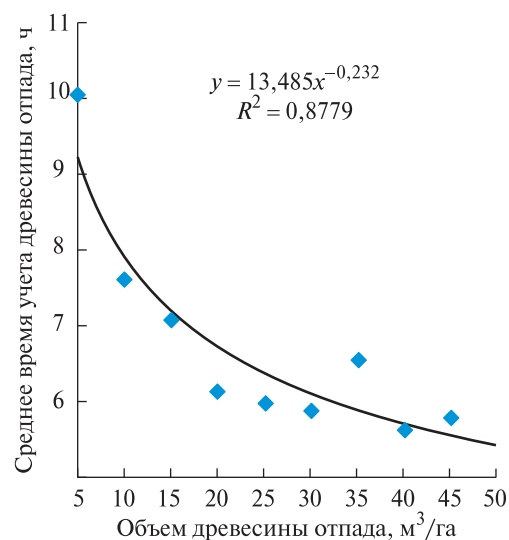


Рис. 7. Потребное время на учет древесины отпада
Fig. 7. Time required to count waste wood

Под производительностью следует понимать учитываемый объем древесины отпада за 1 ч.

В имитационных экспериментах по определению затрат времени и уровня производительности при учете и оценке объема отпада временные циклы были заданы на основе ограниченных выборок хронометража

отдельных операций и разной степени захламливаемости полос, поэтому полученные результаты следует рассматривать как предварительные. В дальнейшем при совершенствовании приемов оценки возможны уменьшение времени на учет и оценку объема отпада и повышение производительности.

Как и ожидалось, время учета уменьшается с увеличением объема древесины отпада на участке. Основным фактором здесь служит уменьшение суммарной длины технологических полос с увеличением объема древесины отпада на участке (см. рис. 4). Однако эта зависимость не является линейной. Так, например, время на учет и оценку отпада составило:

- 10 ч для объема отпада 5 м³/га;
- 6 ч при объеме отпада 25 м³/га;
- 5,6 ч для объема отпада 50 м³/га.

Это связано с тем, что с увеличением объема отпада число стволов отпада, пересекающих линию троса лебедки (а именно эти стволы необходимо учитывать) увеличивается, при этом общая потребная длина технологических полос уменьшается.

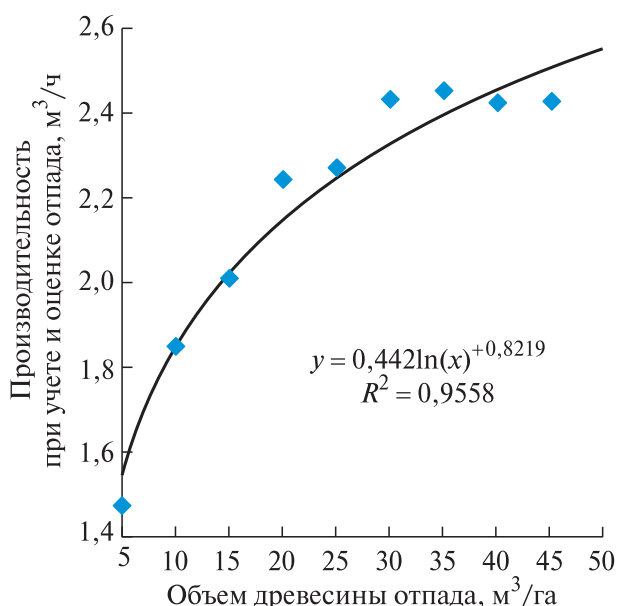


Рис. 8. Производительность при учете отпада в зависимости от объема древесины отпада

Fig. 8. Productivity depending on waste volume

Характер изменения времени на учет и оценку объема отпада (см. рис. 7) отражается и на производительности (см. рис. 8).

Производительность при учете и оценке объема древесины отпада повышается с увеличением объема древесины отпада на участке. Эта зависимость также не является линейной. Например, производительность при учете и оценке объема отпада составила:

- 1,472 м³/ч для объема отпада 5 м³/га;
- 2,270 м³/ч для объема отпада 25 м³/га;
- 2,464 м³/ч для объема отпада 50 м³/га.

Обращает на себя внимание тот факт, что производительность на интервале 30...50 м³/ч в экспериментах не повышалась (см. рис. 8).

Выводы

Предложена технология уборки древесины отпада, позволяющая проводить одновременно с уборкой оценку отпада на всем участке леса, в частности его объем, долю деловой древесины, степень поражения гнилью и т. п. В процессе уборки в реальном масштабе времени определяется объем убранного отпада и объем еще остающегося на участке древесины отпада. Это позволяет регулировать объемы убираемой и оставляемой древесины отпада в лесу.

Рассмотрена технология уборки отпада мобильной лебедкой на технологических полосах с одновременной оценкой объема и характеристик древесины отпада. Результаты учета позволяют получать оценки характеристик древесины отпада с заданной точностью.

Заданный показатель точности определяется суммарной длиной технологических полос, которая принимается равной максимальной длине троса лебедки. Так, для показателя точности $P = 20\%$ потребная суммарная длина технологических полос находится в пределах от 500 м до 6000 м при изменении объема древесины отпада от 50 до 5 м³/га.

На практике первоначальную оценку объема отпада рекомендуется проводить по результатам его учета на технологических полосах суммарной длиной 200...600 м. В процессе уборки отпада следует корректировать его объем за счет дополнительного учета отпада.

Предложенный метод обеспечивает быстрое и более надежное получение результатов оценки и регулирования древесины отпада при проведении санитарно-оздоровительных мероприятий в лесу по сравнению с известными методами.

Список литературы

- [1] Карпачев С.П., Диев Р.И. Моделирование технологических процессов уборки древесины естественного отпада на нужды биоэнергетики // Техника и оборудование для села, 2017. № 6. С. 46–48.
- [2] Мошников С.А., Ананьев В.А. Запас древесного детрита основных насаждений Южной Карелии // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства, 2013. № 2. С. 22–28.
- [3] Tiryana T. Simulating harvest schedule for timber management and multipurpose management in teak plantation // Journal Manajemen Hutan Tropika, 2016, v. 22 (1), pp. 1–12. <http://dx.doi.org/10.7226/jtfm.2.1.1>.
- [4] Сергиенко В.Г., Иванов А.М., Власов Р.В., Антонов О.И. Древесный отпад и биоразнообразие на участках выборочных рубок в Ленинградской области // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства, 2015. № 3. С. 4–19.

- [5] Руководство по проведению санитарно-оздоровительных мероприятий. Приложение 2 к приказу Рослесхоза от 29.12.2007. № 523. 32 с.
- [6] Andini S., Budiaman A., Muhdin M. Development of Line Intersect Method for Logging Residue Assessment of Teak // *Journal Manajemen Hutan Tropika*, 2017, v. 23(2), pp. 51–60.
- [7] Daniel P. Bebbier and Sean C. Thomas. Prism sweeps for coarse woody debris // *Can. Journal Forest Resource*, 2003, v. 33, pp. 1737–1743.
- [8] Bouriaud O., Stefan G., Flocea M. Predictive models of forest logging residues in Romanian spruce and beech forests // *Biomass and Bioenergy* 2013, v. 54, pp. 59–66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.03.022>.
- [9] Bate L., Torgersen T., Wisdom M., Garton E. Biased estimation of forest log characteristic using intersect diameters // *Forest Ecology and Management*, 2009, v. 258(5), pp. 635–640.
- [10] Bell G., Kerr A., McNickle D., Woollons R. Accuracy of the line intersect method of post-logging sampling under orientation bias // *Forest Ecology and Management*, 1996, v. 84(1), pp. 23–28.
- [11] Pedlar J.H., Pearce J.L., Venier L.A., McKenney D.W. Coarse woody debris in relation to disturbance and forest type in boreal Canada // *Forest Ecology and Management*, 2002, v. 158, pp. 189–194.
- [12] Michael S. Williams and Jeffrey H. Perpendicular distance sampling: an alternative method for sampling downed coarse woody debris // *Can. Journal Forest Resource*, 2003, v. 33, pp. 1564–1579.
- [13] Ducey M.J., Williams M.S., Gove J.H., Roberge S. Distance-limited perpendicular distance sampling for coarse woody debris: theory and field results // *Forestry*, 2013, v. 86, pp. 119–128. DOI: 10.1093/forestry/cps059
- [14] Waddell K.L. Sampling Coarse Woody Debris for Multiple Attributes in Extensive Resource Inventories Extensive Resource Inventories // *Ecological Indicators*, 2002, v. 1, pp. 139–153.
- [15] Bartels R., Dell J.D., Knight R.L., Schaefer G. Dead and down woody material / Ed. E.R. Brown. *Management of Wildlife and Fish Habitats in Forests of Western Oregon and Washington*, R6-F&WL-192-1985, USDA Forest Service, Portland, OR, 1985, pp. 171–186.
- [16] Budiaman A., Komalasari P. Waste of felling and on-site production of teak squarewood of the community forest // *Journal Manajemen Hutan Tropika*, 2012, v. 18 (3), pp. 164–168.
- [17] De Vries P.G. *Sampling Theory for Forest Inventory*. Springer-Verlag. New York, 1986, 399 p, chapter 13, pp. 242–279.
- [18] Ghaffariyan M.R. Remaining slash in different harvesting operation sites in Australian plantations // *Silva Balcanica*, 2013, v. 14(1), pp. 83–93.
- [19] Timothy G. Gregoire and Harry T. Valentine. Line intersect sampling: Ell-shaped transects and multiple intersections // *Environmental and Ecological Statistics*, 2003, v. 10, pp. 263–279.
- [20] Hazard J.W., Pickford S.G. Simulation studies on line intersect sampling of forest residue. Part II // *Forest Sci.*, 1986, v. 32(2), pp. 447–470.
- [21] Howard S.O., Ward F.R. Measurement of logging residue alternative applications of the line intersect method // *USDA Forest Serv. Res Note PNW-183*, Pac. Northwest Forest and Range Exp. Stn., Portland, Oregon, 1972, 8 p.
- [22] Ghaffariyan M.R., Acuna M., Brown M. Analysing the effect of five operational factors on forest residue supply chain costs: A case study in Western Australia // *Biomass and Bioenergy*, 2013, v. 59, pp. 486–493. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.08.029>.
- [23] Grushecky S.T., Wang J., McGill D.W. Influence of site characteristics and costs of extraction and trucking on logging residue utilization in southern West Virginia // *Forest Product Journal*, 2007, v. 57, pp. 63–67.
- [24] Helmsaari H.-S., Hanssen K.H., Jacobson S., Kukkola M., Luiro J., Saarsalmi A., Tamminen P., Tveite B. Logging residue removal after thinning in Nordic boreal forests: Long-term impact on tree growth // *Forest Ecology Management*, 2011, v. 261, pp. 1919–1927.
- [25] Karpachev S.P., Zaprudnov V.I., Bykovskiy M.A., Karpacheva I.P. Simulation Studies on Line Intersect Sampling of Residues Left After Cut-to-Length Logging // *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2020, v. 41 (1), pp. 95–107.
- [26] Keane R.E., Gary K. Comparing three sampling techniques for estimating fine woody down dead biomass // *International Journal of Wildland Fire*, 2013, v. 22, pp. 1093–1107. <http://dx.doi.org/10.1071/WF13038>
- [27] Nemec A.F.L., Davis G. Efficiency of six line intersect sampling designs for estimating volume and density of coarse woody debris. Nanaimo, Forest Service British Columbia, Technical Report TR-021/2002, 2002, 12 p.
- [28] Marshall P.L., Davis G., LeMay V.M. Using Line Intersect Sampling for Coarse Woody Debris. Technical Report TR-003 March, Research Section, Vancouver Forest Region, 2000, BCMOF, 34 p.
- [29] Moriana R., Vilaplana F., Ek M. Forest residues as renewable resources for bio-based polymeric materials and bioenergy: chemical composition, structure and thermal properties // *Cellulose*, 2015, v. 22, pp. 3409–3423. DOI 10.1007/s10570-015-0738-4
- [30] Sari D.R., Ariyanto A. The potential of woody waste biomass from the logging activity at the natural forest of Berau District, East Kalimantan // *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2018, v. 144(1), p. 012061. DOI: 10.1088/1755-1315/144/1/012061
- [31] Zamora-Cristales R., Sessions J. Modeling harvest forest residue collection for bioenergy production // *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2016, v. 37(2), pp. 287–296.
- [32] Zbiec M., Franc-Dabrowska., Drejerska N. Wood waste management in Europe through the lens of the circular bioeconomy // *Energies*, 2022, v. 15(12), p. 4352.
- [33] Behjou F., Ramezan M., Esfahan E.Z., Eftekhari A. Wood waste during full-length and cut-to-length harvesting systems in caspian forests // *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 2016, v. 3(8), pp. 52–56. DOI:10.21833/ijaas.2016.08.009
- [34] Dalya N., Wahyuni W., Muin A.V.F. Utilization of community forest wood harvesting waste in Bone Pute Village, Berau District, East Luwu Regency // *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2021, v. 886, p. 012021. DOI:10.1088/1755-1315/886/1/012021
- [35] Woldendorp G., Keenan R., Barry S., Spencer R. Analysis of sampling methods for coarse woody debris // *Forest Ecology and Management*, 2004, v. 198(1), pp. 133–148.

- [36] Ширнин Ю.А., Ширнин А.Ю., Денисов С.А., Петухов И.В., Анисимов П.Н. Обоснование технологии лесосечных работ в горельниках с содействием естественному восстановлению сосны // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование, 2024. № 1 (61). С. 66–75.
- [37] Рукомойников К., Сергеева Т., Гилязова Т., Царев Е., Комисар В. Имитационное моделирование технологических процессов лесозаготовки // ИзВУЗ. Лесной журнал, 2025. № 1. С. 145–63.
- [38] Герасимов Ю.Ю., Перский С.Н. Имитационная модель сплошных рубок на основе ГИС-технологий // Моделирование, оптимизация и интенсификация производственных процессов и систем: Материалы Междунар. науч.-практ. конф., Вологда, 19–21 мая 2004 г. Вологда: ВоГТУ, 2004. С. 286–289.
- [39] Заикин А.Н. Моделирование режимов работы лесосечных машин // Изв. вузов. Лесной журнал, 2009, № 1. С. 71–77.
- [40] Тарасов Н.М., Роженцов А.П., Войтко П.Ф. Статистическая оценка скопления затонувшей древесины методом латинских квадратов // Мелиорация и водное хозяйство, 2003. № 5. С. 38–41.
- [41] Тарасов Н.М., Гайсин И.Н., Роженцов А.П., Войтко П.Ф. Технология обнаружения и оценки качества затонувшей древесины в водных объектах Республики Марий Эл // Мелиорация и водное хозяйство, 2003. № 5. С. 41–45.

Сведения об авторах

Карпачев Сергей Петрович — д-р техн. наук, профессор, ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), karpachevs@mail.ru

Запруднов Вячеслав Ильич — д-р техн. наук, профессор, ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), zaprudnov@bmstu.ru

Посыпанов Сергей Валентинович — д-р техн. наук, профессор, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), s.posypanov@narfu.ru

Поступила в редакцию 03.04.2025.

Одобрено после рецензирования 21.05.2025.

Принята к публикации 26.05.2025.

FOREST LITTER CONTROL AND REGULATION MODELLING TECHNOLOGY

S.P. Karpachev¹, V.I. Zaprudnov¹, S.V. Posypanov²

¹BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 163002, Arkhangelsk, Russia

karpachevs@mail.ru

The complex of sanitary and health-improving measures in the forest is considered, which includes harvesting of waste wood with simultaneous quantitative and qualitative assessment of characteristics of waste wood in the whole forest area with a given accuracy in real time in the process of harvesting. The variant of waste wood harvesting with wood processing for wood chips in the forest is considered. The main machines carrying out harvesting on technological strips are specified, in particular mobile winch and chipper. With the use of natural data, mathematical model studies of estimation of the volume and quality of waste wood by simulation modelling methods based on the method of linear intersections have been carried out. It was found that at the volume of waste wood from 5 to 50 m³/ha the required total length of technological strips for the accuracy indicator $P = 20\%$ is in the range from 500 to 6000 metres. It was determined that the errors between the true values of the waste wood volume and its estimates did not exceed 11,3 % in absolute value. It was found that the time to record and estimate the volume of waste wood decreases with increasing volume of waste wood in the plot. It was found that the main factors are the length of technological strips and the volume of waste wood on the plot. It was shown that the productivity of waste wood volume counting, and estimation increases as the volume of waste wood on the plot increases.

Keywords: waste wood, sanitary measures, linear intersection method, simulation modeling, mathematical model

Suggested citation: Karpachev S.P., Zaprudnov V.I., Posypanov S.V. *Modelirovaniye tekhnologii kontrolya i regulirovaniya drevesiny otpada v lesu* [Forest litter control and regulation modelling technology]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2025, vol. 29, no. 4, pp. 170–182. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-170-182

References

- [1] Karpachev S.P., Diev R.I. *Modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov uborki drevesiny estestvennogo otpada na nuzhdy bioenergetiki* [Modeling of technological processes for harvesting natural wood debris for bioenergy needs]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* [Machinery and equipment for the village], 2017, no. 6, pp. 46–48.
- [2] Moshnikov S.A., Anan'ev V.A. *Zapas drevesnogo detrita osnovnykh nasazhdeniy Yuzhnoy Karelii* [Stock of wood detritus in the main stands of Southern Karelia]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva* [Transactions of the St. Petersburg Forestry Research Institute], 2013, no. 2, pp. 22–28.
- [3] Tiryana T. Simulating harvest schedule for timber management and multipurpose management in teak plantation. *Journal Manajemen Hutan Tropika*, 2016, v. 22 (1), pp. 1–12. <http://dx.doi.org/10.7226/jtfm.2.1.1>.
- [4] Sergienko V.G., Ivanov A.M., Vlasov R.V., Antonov O.I. *Drevesnyy otpad i bioraznoobrazie na uchastkakh vyborochnykh rubok v Leningradskoy oblasti* [Wood debris and biodiversity in selective logging areas in the Leningrad Region]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva* [Transactions of the St. Petersburg Forestry Research Institute], 2015, no. 3, pp. 4–19.
- [5] *Rukovodstvo po provedeniyu sanitarno-ozdorovitel'nykh meropriyatiy. Prilozhenie 2 k prikazu Rosleskhoza ot 29.12.2007* [Guide to sanitation. Appendix 2 to the Order of the Federal Forestry Agency of December 29, 2007], no. 523, 32 p.
- [6] Andini S., Budiaman A., Muhdin M. Development of Line Intersect Method for Logging Residue Assessment of Teak. *Journal Manajemen Hutan Tropika*, 2017, v. 23(2), pp. 51–60.
- [7] Daniel P. Bebbber and Sean C. Thomas. Prism sweeps for coarse woody debris. *Can. Journal Forest Resource*, 2003, v. 33, pp. 1737–1743.
- [8] Bouriaud O., Stefan G., Flocea M. Predictive models of forest logging residues in Romanian spruce and beech forests. *Biomass and Bioenergy* 2013, v. 54, pp. 59–66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.03.022>.
- [9] Bate L., Torgersen T., Wisdom M., Garton E. Biased estimation of forest log characteristic using intersect diameters. *Forest Ecology and Management*, 2009, v. 258(5), pp. 635–640.
- [10] Bell G., Kerr A., McNickle D., Woollons R. Accuracy of the line intersect method of post-logging sampling under orientation bias. *Forest Ecology and Management*, 1996, v. 84(1), pp. 23–28.
- [11] Pedlar J.H., Pearce J.L., Venier L.A., McKenney D.W. Coarse woody debris in relation to disturbance and forest type in boreal Canada. *For. Ecol. Manage.*, 2002, v. 158, pp. 189–194.
- [12] Michael S. Williams and Jeffrey H. Perpendicular distance sampling: an alternative method for sampling downed coarse woody debris. *Can. Journal Forest Resource*, 2003, v. 33, pp. 1564–1579.
- [13] Ducey M.J., Williams M.S., Gove J.H., Roberge S. Distance-limited perpendicular distance sampling for coarse woody debris: theory and field results. *Forestry*, 2013, v. 86, pp. 119–128. DOI: 10.1093/forestry/cps059
- [14] Waddell K.L. Sampling Coarse Woody Debris for Multiple Attributes in Extensive Resource Inventories Extensive Resource Inventories. *Ecological Indicators*, 2002, v. 1, pp. 139–153.
- [15] Bartels R., Dell J.D., Knight R.L., Schaefer G. Dead and down woody material. /Ed. E.R. Brown. *Management of Wildlife and Fish Habitats in Forests of Western Oregon and Washington*, R6-F&WL-192-1985, USDA Forest Service, Portland, OR, 1985, pp. 171–186.
- [16] Budiaman A., Komalasari P. Waste of felling and on-site production of teak squarewood of the community forest. *Journal Manajemen Hutan Tropika*, 2012, v. 18 (3), pp. 164–168.
- [17] De Vries P.G. *Sampling Theory for Forest Inventory*. Springer-Verlag. New York, 1986, 399 p, chapter 13, pp. 242–279.
- [18] Ghaffariyan M.R. Remaining slash in different harvesting operation sites in Australian plantations. *Silva Balcanica*, 2013, v. 14(1), pp. 83–93.
- [19] Timothy G. Gregoire and Harry T. Valentine. Line intersect sampling: Ell-shaped transects and multiple intersections. *Environmental and Ecological Statistics*, 2003, v. 10, pp. 263–279.
- [20] Hazard J.W., Pickford S.G. Simulation studies on line intersect sampling of forest residue. Part II. *Forest Sci.*, 1986, v. 32(2), pp. 447–470.
- [21] Howard S.O., Ward F.R. Measurement of logging residue alternative applications of the line intersect method. *USDA Forest Serv. Res Note PNW-183*, Pac. Northwest Forest and Range Exp. Stn., Portland, Oregon, 1972, 8 p.
- [22] Ghaffariyan M.R., Acuna M., Brown M. Analysing the effect of five operational factors on forest residue supply chain costs: A case study in Western Australia. *Biomass and Bioenergy*, 2013, v. 59, pp. 486–493. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.08.029>.
- [23] Grushecky S.T., Wang J., McGill D.W. Influence of site characteristics and costs of extraction and trucking on logging residue utilization in southern West Virginia. *Forest Product Journal*, 2007, v. 57, pp. 63–67.
- [24] Helmissaari H.-S., Hanssen K.H., Jacobson S., Kukkola M., Luiro J., Saarsalmi A., Tamminen P., Tveite B. Logging residue removal after thinning in Nordic boreal forests: Long-term impact on tree growth. *Forest Ecology Management*, 2011, v. 261, pp. 1919–1927.
- [25] Karpachev S.P., Zaprudnov V.I., Bykovskiy M.A., Karpacheva I.P. Simulation Studies on Line Intersect Sampling of Residues Left After Cut-to-Length Logging // *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2020, v. 41 (1), pp. 95–107.
- [26] Keane R.E., Gary K. Comparing three sampling techniques for estimating fine woody down dead biomass. *International Journal of Wildland Fire*, 2013, v. 22, pp. 1093–1107. <http://dx.doi.org/10.1071/WF13038>
- [27] Nemec A.F.L., Davis G. Efficiency of six line intersect sampling designs for estimating volume and density of coarse woody debris. *Nanaimo, Forest Service British Columbia, Technical Report TR-021/2002*, 2002, 12 p.
- [28] Marshall P.L., Davis G., LeMay V.M. Using Line Intersect Sampling for Coarse Woody Debris. *Technical Report TR-003 March*, Research Section, Vancouver Forest Region, 2000, BCMOF, 34 p.

- [29] Moriana R., Vilaplana F., Ek M. Forest residues as renewable resources for bio-based polymeric materials and bioenergy: chemical composition, structure and thermal properties. *Cellulose*, 2015, v. 22, pp. 3409–3423. DOI 10.1007/s10570-015-0738-4
- [30] Sari D.R., Ariyanto A. The potential of woody waste biomass from the logging activity at the natural forest of Berau District, East Kalimantan. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2018, v. 144(1), p. 012061. DOI: 10.1088/1755-1315/144/1/012061
- [31] Zamora-Cristales R., Sessions J. Modeling harvest forest residue collection for bioenergy production. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2016, v. 37(2), pp. 287–296.
- [32] Zbiec M., Franc-Dabrowska., Drejerska N. Wood waste management in Europe through the lens of the circular bioeconomy. *Energies*, 2022, v. 15(12), p. 4352.
- [33] Behjou F., Ramezan M., Esfahan E.Z., Eftekhari A. Wood waste during full-length and cut-to-length harvesting systems in caspian forests. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 2016, v. 3(8), pp. 52–56. DOI:10.21833/ijaas.2016.08.009
- [34] Dalya N., Wahyuni W., Muin A.V.F. Utilization of community forest wood harvesting waste in Bone Pute Village, Berau District, East Luwu Regency. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2021., v. 886, p. 012021. DOI:10.1088/1755-1315/886/1/012021
- [35] Woldendorp G., Keenan R., Barry S., Spencer R. Analysis of sampling methods for coarse woody debris. // *Forest Ecology and Management*, 2004, v. 198(1), pp. 133–148.
- [36] Shirnin Yu.A., Shirnin A.Yu., Denisov S.A., Petukhov I.V., Anisimov P.N. *Obosnovanie tekhnologii lesosechnykh rabot v gorel'nikakh s sodeystviem estestvennomu vosstanovleniyu sosny* [Justification of logging technology in burnt areas with assistance to natural restoration of pine]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Forest. Ecology. Nature Management], 2024, no. 1 (61), pp. 66–75.
- [37] Rukomoynikov K., Sergeeva T., Gilyazova T., Tsarev E., Komisar V. *Imitatsionnoe modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov lesozagotovki* [Simulation modeling of technological processes of logging]. *Russian Forest Journal*, 2025, no. 1, pp. 145–63.
- [38] Gerasimov Yu.Yu., Perskiy S.N. *Imitatsionnaya model' sploshnykh rubok na osnove GIS-tekhnologiy* [Simulation model of clear-cutting based on GIS technologies]. *Modelirovanie, optimizatsiya i intensivatsiya proizvodstvennykh protsessov i sistem: mater. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Modeling, optimization and intensification of production processes and systems: Proc. Int. scientific-practical. conf.], Vologda, May 19–21, 2004. Vologda: VoGTU, 2004, pp. 286–289.
- [39] Zaikin A.N. *Modelirovanie rezhimov raboty lesosechnykh mashin* [Modeling of operating modes of logging machines]. *Russian Forest Journal*, 2009, no. 1, pp. 71–77.
- [40] Tarasov N.M., Rozhentsov A.P., Voytko P.F. *Statisticheskaya otsenka skopleniya zatonuvshykh drevesiny metodom latinskikh kvadratov* [Statistical assessment of the accumulation of sunken wood using the Latin square method]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Melioration and water management], 2003, no. 5, pp. 38–41.
- [41] Tarasov N.M., Gaisin I.N., Rozhentsov A.P., Voytko P.F. *Tekhnologiya obnaruzheniya i otsenki kachestva zatonuvshykh drevesiny v vodnykh ob'yektakh Respubliki Mariy El* [Technology for detecting and assessing the quality of sunken wood in water bodies of the Mari El Republic]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Melioration and Water Management], 2003, no. 5, pp. 41–45.

Authors' information

Karpachev Sergey Petrovich✉ — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), karpachevs@mail.ru

Zaprudnov Vyacheslav Il'ich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), zaprudnov@bmstu.ru

Posypanov Sergey Valentinovich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, s.posypanov@narfu.ru

Received 03.04.2025.

Approved after review 21.05.2025.

Accepted for publication 26.05.2025.

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