

ЛЕСНОЙ ВЕСТНИК / FORESTRY BULLETIN

Научно-информационный журнал

№ 2 ' 2026 Том 30

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,
Нижегород

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 ВГЛУ 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, УГЛУ,
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

Классен Николай Владимирович, канд. физ.-мат. наук,
ИФТТ РАН, Черноголовка

Ковачев Атанас, д-р архитектуры, профессор, член-корр.
Болгарской АН, профессор Международной Академии
Архитектуры, Иностраный член Российской академии
архитектуры и строительных наук (РААСН), Почетный профессор
Московского архитектурного института (Государственной
академии), Варненский свободный университет им. «Черноризца
Храбра», Варна, Болгария.

Кожухов Николай Иванович, д-р экон. наук, профессор, академик
РАН, МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Комаров Евгений Геннадиевич, д-р техн. наук, профессор,
МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Кох Нильс Элерс, д-р агрономии в области лесной политики,
профессор, Президент IUFRO, Центр лесного и ландшафтного
планирования университета, Копенгаген, Дания

Кротт Макс, профессор, специализация «Лесная политика»,
Георг-Аугуст-Университет, Геттинген, Германия

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

Полужков 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,
ИГУ 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

Щепаченко 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 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. Рязжской

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

Статьи журнала публикуются на условиях лицензии Creative Commons
Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

ИЗДАТЕЛЬ: ООО «Эко-Вектор»

Адрес: Россия, 191181, Санкт-Петербург, Аптекарский переулоч,

д. 3, литера А, помещение 1Н,

E-mail: info@eco-vector.com WEB: https://eco-vector.com

Адрес редакции: Россия, 141005, Мытищи-5, Московская обл.,

1-я Институтская, д. 1, тел.: (498) 687-41-33, E-mail: les-vest@bmstu.ru

Дата выхода в свет 03.04.2026

Тираж 600 экз. Заказ №

Объем 19,0 п. л.

Цена свободная

LESNOY VESTNIK / FORESTRY BULLETIN

Scientific Information journal

No. 2 ' 2026 Vol. 30

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 Gennadievich, 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 policy 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 Aleksey Anatol'evich, 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
Shchepashchenko Dmitry Gennadievich, Associate Professor,
Dr. Sci. (Biol.), Senior Researcher, International Institute
for Applied Systems Analysis (IIASA), Austria
Shimkovich Dmitriy Grigor'evich, Professor, Dr. Sci. (Tech.),
OOO «Kudesnik», Moscow
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 TSNIIIMASH, Korolev

Responsible Secretary Raseva Elena Aleksandrovna

Editor L.V. Sivay

Translation by M.A. Karpukhina

Electronic version by Yu.A. Ryazhskaya

*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*

*All articles in this journal are licensed under a Creative Commons
Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)*

PUBLISHER: Eco-Vector
Address: 3 liter A, 1H, Aptekarsky pereulok, 191181,
Saint Petersburg, Russian Federation,
E-mail: info@eco-vector.com WEB: https://eco-vector.com
Publishing house: 1, 1st Institutskaya street, 141005,
Mytishi, Moscow Region, Russian Federation
(498) 687-41-33, E-mail: les-vest@bmstu.ru

It is sent for the press 03.04.2026
Circulation 600 copies
Order №
Volume 19,0 p. p.

СОДЕРЖАНИЕ

БИОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА

Грязькин А.В., Гаврилова О.И., Климов Б.Б. Индикация состояния подроста сосны по величине прироста и количеству ветвей в мутовке	5
Дубенок Н.Н., Лебедев А.В., Гостев В.В. Использование мобильного приложения Arboreal Forest для таксации еловых древостоев	18
Марков Н.Г., Мачука К.Р. Обнаружение очагов уссурийского полиграфа с помощью нейросетевого анализа изображений деревьев пихты	31
Беляев М.Ю., Есаков А.М., Ильясов Х.Х., Назайкинский В.Е. Совместное использование спектральных и фотографических снимков из космоса для мониторинга пожаров	43

ЛАНДШАФТНАЯ АРХИТЕКТУРА

Кругляк В.В., Гурьева Е.И. Адаптивная система озеленения города Боброва Воронежской области с учетом образования туристско-рекреационного кластера	58
Залывская О.С., Бабич Н.А. Форзиция европейская — уникальный инорайонный кустарник в озеленении г. Архангельска	76
Сродных Т.Б., Протазанова П.С. Планировка и состояние скверов центральной части города Екатеринбурга	89

ДЕРЕВООБРАБОТКА И ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

Валеев К.В., Сафин Р.Г. Исследование процесса извлечения биологически активных веществ из коры сосны	102
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

ЛЕСОИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО

Голякевич С. А. Математическая модель технологических процессов заготовки древесного сырья комплексом машин «харвестер + форвардер»	113
Перфильев П.Н., Григорьев И.В., Мурашова О.В., Задраускайте Н.О., Перфильева М.Г. Анализ методов учета круглых лесоматериалов для удаленных лесных терминалов	127
Пискунов М.А. Исследование влияния проездов техники на статистические характеристики микропрофиля волока в условиях изменяющихся свойств почвогрунтов	140

CONTENTS

BIOLOGICAL AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF FORESTRY

Gryaz'kin A.V., Gavrilova O.I., Klimov B.B. State indication of pine undergrowth by gain figure and number of branches in whorl	5
Dubenok N.N., Lebedev A.V., Gostev V.V. Arboreal Forest mobile application for spruce stands inventory	18
Markov N.G., Machuca C.R. Detection of small spruce bark beetle outbreaks using neural network analysis of siberian fir trees images	31
Belyaev M.Yu., Esakov A.M., Il'yasov Kh.Kh., Nazaykinskiy V.E. Use of spectral and photographic images from space to monitor wildfires	43

LANDSCAPE ARCHITECTURE

Kruglyak V.V., Gur'eva E.I. Adaptive system of greening in Bobrov city (Voronezh region) within tourist and recreational cluster	58
Zalyvskaya O.S., Babich N.A. European forsythia as unique nondistrict shrubbery in Arkhangelsk landscape	76
Srodnykh T.B., Protazanova P.S. Planning and condition of public gardens in central part of Yekaterinburg	89

WOODWORKING AND CHEMICAL WOOD PROCESSING

Valeyev K.V., Safin R.G. Study of extracting process of biologically active substances from pine bark	102
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

FOREST ENGINEERING

Golyakevich S.A. Math model of technological processes of wood raw material harvesting by «harvester + forwarder» machine complexes	113
Perfil'ev P.N., Grigor'ev I.V., Murashova O.V., Zadrauskayte N.O., Perfil'eva M.G. Analysis of round wood accounting methods for remote timber terminals	127
Piskunov M.A. Effect of vehicle traffic on statistical characteristics of skidding trail microprofile in conditions of altering soil properties	140

ИНДИКАЦИЯ СОСТОЯНИЯ ПОДРОСТА СОСНЫ ПО ВЕЛИЧИНЕ ПРИРОСТА И КОЛИЧЕСТВУ ВЕТВЕЙ В МУТОВКЕ

А.В. Грязькин¹✉, О.И. Гаврилова², Б.Б. Климов¹

¹ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова» (СПбГЛТУ им. С.М. Кирова), Россия, 194021, г. Санкт-Петербург, Институтский пер., д. 5, литера У

²ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет» (ПетрГУ), Россия, 185960, Республика Карелия, г. Петрозаводск, пр. Ленина, д. 33

lesovod@bk.ru

Представлены оригинальные данные о зависимости состояния подроста сосны от количества ветвей в мутовке и величины прироста. Проведен учет подроста, подлеска и живого напочвенного покрова по свободному маршрутному ходу на круговых учетных площадках радиусом 178,5 см. Установлено, что в лесном фонде Республики Бурятия чистый по составу сосняк брусничный 70...80 лет сформировался на гаях прошлых лет. Определено, что под его пологом общая численность подроста не превышает 1000 экз./га. Подлесок представлен единичными особями *Sorbus aucuparia subsp. Sibirica* (Hedl.) Krylov, *Juniperus sibirica* Burgsd., *Lonicera maximowiczii* Maxim. В составе живого напочвенного покрова выявлено 12 видов сосудистых растений и несколько видов мхов и лишайников. В ходе полевых исследований у подроста сосны определяли высоту, возраст, количество ветвей в мутовке, жизнеспособность подроста, величину прироста и возраст хвои. Для живого напочвенного покрова устанавливали видовой состав, встречаемость и проективное покрытие по видам. Показано, что максимальное количество ветвей в мутовке у жизнеспособного подроста достигает 6 шт., в мутовке нежизнеспособного подроста – не более 1–2. В отдельных случаях боковые ветви в мутовке нежизнеспособного подроста не формируются. Выявлено, что такая же картина чаще всего характерна и для сухого подроста. Установлена взаимосвязь между количеством ветвей в мутовке и величиной среднего текущего прироста. Определено, что абсолютные значения среднего общего прироста подроста сосны достигают у крупного подроста до 36 см/год, у нежизнеспособного подроста эта величина изменяется в пределах от 1 до 4 см/год. Полученные результаты могут быть использованы для сравнения основных характеристик подроста сосны, произрастающего в других лесорастительных условиях.

Ключевые слова: Республика Бурятия, сосняки, гари прошлых лет, численность и состояние подроста, средний общий прирост, мутовки

Ссылка для цитирования: Грязькин А.В., Гаврилова О.И., Климов Б.Б. Индикация состояния подроста сосны по величине прироста и количеству ветвей в мутовке // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2026. Т. 30. № 2. С. 5–17. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-2-5-17

Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) — одна из основных лесообразующих пород в лесном фонде России, занимающая в покрытой лесом площади второе место (около 120 млн га) после лиственницы (почти 275 млн га). Эта древесная порода относится к светолюбивым растениям и может произрастать в широком диапазоне почвенно-грунтовых условий как на переувлажненных и заболоченных почвах, так и на сухих песчаных почвах [1–6].

Сосна обыкновенная успешно возобновляется и наилучшие результаты успешного восстановления сосняков многими авторами отмечаются на гаях [7–15]. На вырубках естественное возобновление сосны в большинстве случаев протекает успешно [16–22]. Подрост

сосны появляется даже на участках лесных культур независимо от культивируемой древесной породы [23, 24]. На заболоченных и на бедных песчаных почвах формируются молодняки сосны, чистые по составу, поскольку конкуренты сосны, как правило, в таких условиях не произрастают [9, 25–32]. На богатых почвах сосна рано или поздно вытесняется лиственными породами и елью [1, 4, 7, 11, 19, 22].

Под пологом древостоев молодое поколение сосны чаще всего не выживает, здесь преобладает нежизнеспособный и сухой подрост [2, 3, 21, 33–37]. Исследованиями А.А. Фетисовой и др. показано, что если за точку отсчета брать стену леса, то получается симметричная картина по состоянию подроста сосны под пологом и на вырубке [1]. Кроме того, тем же автором было установлено, что на вырубке, вплоть до стены леса, преобладает жизнеспособный

подрост, а под пологом, начиная от стены леса и вглубь него — нежизнеспособный и сухой. Доля сухого подроста сосны на вырубках и гарях составляет не более 3 %, а под пологом древостоев может достигать 25...50 % [1, 7, 14, 18, 19].

К биологическим особенностям сосны как светолюбивой породы следует отнести ее низкую конкурентную способность по отношению к травяно-кустарничковому ярусу [3, 8, 23]. Мохово-лишайниковый ярус и дернина препятствуют прорастанию семян [1–3, 7, 8, 23].

Республика Бурятия характеризуется высокой долей сосновых лесов [2, 12, 25–27]. Сухие боры Бурятии чаще всего встречаются на склонах холмов разной крутизны и на сухих песчаных почвах [2, 12, 25–27, 37]. В этих условиях складываются неоднородные условия для роста молодых растений. При практически отсутствующем гумусовом горизонте интенсивная промываемость почв обуславливает быстрое уменьшение количества минеральных веществ [25–27, 37–39].

На территории Зун-Хурайского лесничества преобладают сосняки брусничные и лишайниковые. Чаще всего это чистые по составу древостои с единичными примесями березы и лиственницы. Основная часть сосняков распространена по склонам разных экспозиций и крутизны. В силу указанных особенностей сосняки в данном лесничестве регулярно подвергаются пожарам. Ежегодно выгорают большие площади сосняков [2, 25–27, 37].

Если динамика роста молодого поколения сосны исследована достаточно подробно, то о биометрических характеристиках подроста сосны сведений существенно меньше [1–3, 7–15]. Имеются единичные публикации, в которых упоминаются мутовки в связи с динамикой роста молодого поколения сосны. Т.Н. Новикова и др. отмечают, что показателем энергии роста молодняков являются не только биометрические показатели хвои, но и количество ветвей в мутовке [38]. В работе Е.Г. Парамонова и А.Н. Шульца отмечается, что количество ветвей в мутовке зависит от высоты подроста, и приводятся следующие данные о количестве ветвей в мутовке: для мелкого подроста — в среднем 1,9 шт., для среднего — 2,6 шт., для крупного подроста — 4,4 шт. [34].

Условия роста и развития молодого поколения сосны на гарях отличаются от условий на вырубках, пустырях и других категориях земель [7–15, 37]. Основное отличие состоит в том, что в результате сгорания большого объема органического вещества происходит залпо-

вый вброс элементов минерального питания в лесную экосистему. Это способствует формированию на гари за короткий период времени благоприятных условий для роста растений, включая и лесообразующие породы [2, 7, 8, 37].

Моделированию динамики роста молодняков сосны посвящено множество опубликованных работ, в которых обосновывается прогнозирование продуктивности и качественного состава древостоев, сформировавшихся из подроста [1, 6, 16, 18, 40–44].

Из опубликованных работ известно, что хвоя подроста сосны характеризуется широким варьированием длины и массы. Авторы работ [37, 39, 40] отмечают, что на открытом месте удельная масса хвои больше, чем в условиях затенения

Цель работы

Цель работы — установление зависимости между средним общим приростом и количеством ветвей в мутовках для подроста сосны, произрастающего под пологом древостоев сухих сосняков.

Материалы и методы

Сосняки на объектах исследования расположены на юге Республики Бурятия на территории Зун-Хурайского лесничества. На опытных участках сосняки произрастают на сухих песчаных почвах и представлены древостоями брусничного типа леса 4–5 классов бонитета. Древостои чистые по составу с участием единичных деревьев березы и лиственницы. Сосняки произрастают на склонах холмов северо-восточной экспозиции. Высота над уровнем моря (н. у. м.) составляет от 670 (подножие склона) до 845 м (верхняя часть склона). Возраст сосняков на объектах исследования — от 70 до 80 лет.

Сосняки в лесном фонде Республики Бурятия — особые формации, характеризующиеся преобладанием чистых по составу древостоев. Практически всегда формирование лесных фитоценозов происходит на гарях прошлых лет. Любой древостой спелого возраста за период развития, как правило, несколько раз подвергается воздействию низовых пожаров с периодичностью в 20...30 лет.

Морфологическая особенность почв на опытных участках — мощный горизонт слабо-разложившейся лесной подстилки (6...12 см). Основа верхнего горизонта почвы — хвоя сосны, шишки урожаев прошлых лет, кусочки коры и сухие побеги.

Под пологом сосняков встречается подрост сосны разной высоты и возраста, произрастающий, как правило, в окнах и прогалинах (рис. 1). Общая численность подроста не превышает 1000 экз./га. По возрасту подрост сосны представлен разными генерациями — от 3 лет до 21 года. Ступенчатая возрастная структура подроста, соответствует пов торяемости семенных лет. Урожайные годы в данных условиях наблюдаются с периодом 5...8 лет.

Биометрические характеристики подроста сосны исследовали на трех опытных участках: подножие, средняя и верхняя части склона. Учет подроста, подлеска и живого напочвенного покрова проводили методом круговых площадок (всего заложено 136 учетных площадок площадью по 10 м²). Учетные площадки закладывали по свободному маршрутному ходу поперек склона, у подножия, а также в средней и верхней частях склона [45]. На каждой учетной площадке в качестве модельных учитывали все экземпляры подроста сосны.

Для подлеска устанавливали видовой состав, численность и высоту. Для живого напочвенного покрова были определены видовой состав, величина встречаемости и проективное покрытие.

Синхронно с проведением учетных работ на площадках измеряли освещенность и температуру. Для изучения режима освещенности использовали современный люксметр «ТКА-Люкс». Измерения освещенности приходящего и отраженного света проводили на каждой учетной площадке у поверхности почвы и на высоте 1,5 м от поверхности земли. Одновременно с измерением освещенности измеряли радиационный фон, температуру воздуха (на высоте 1,5 м от поверхности земли) и почвы электронным термометром TP-101. Температуру почвы измеряли на поверхности, на глубине 5 и 10 см (рис. 2).

Результаты и обсуждение

Подрост сосны под пологом материнского древостоя в виде одиночно растущих экземпляров встречается весьма редко. Основная часть молодого поколения сосны произрастает куртинами в окнах и прогалинах. Размах варьирования общей численности подроста в куртине зависит от размеров куртины и составляет от 30 до 189 экз. В целом под пологом сосняков общая численность подроста сосны не превышает 1000 экз./га. Подрост сосны характеризуется выраженной дифференциацией по высоте и возрасту.



Рис. 1. Куртина с крупным подростом сосны в окне большого диаметра
Fig. 1. Grove with large pine undergrowth in large-diameter



Рис. 2. Измерение радиационного фона и температуры почвы под пологом сосняка брусничного
Fig. 2. Measurement of radiation background and soil temperature under the canopy of a vaccinium type pinery

Подлесок на объектах исследования практически отсутствует, встречаются единичные особи рябины сибирской (*Sorbus aucuparia* subsp. *Sibirica* (Hedl.) Krylov), можжевельника сибирского (*Juniperus sibirica* Burgsd), жимолости Максимовича (*Lonicera maximowiczii* (Rupr. Ex Maxim.) Maxim.). Средняя высота подлеска — менее 1,3 м. Численность подлеска, в зависимости от места произрастания (подножие, средняя или верхняя часть склона), варьирует от 85 до 150 экз./га.

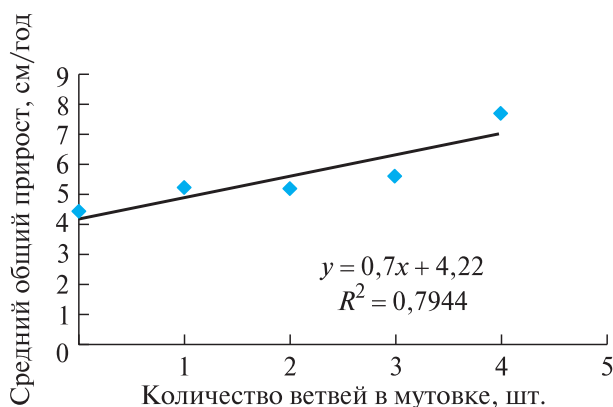


Рис. 3. Зависимость величины среднего общего прироста от количества ветвей в мутовке для подроста сосны высотой 51...100 см

Fig. 3. Dependence of average total growth on the number of branches in the whorl for pine undergrowth 51...100 cm high

Т а б л и ц а 1

Линейные уравнения связи среднего общего прироста с количеством ветвей в мутовке

Linear equations the relationship between average total growth and the number of branches

Группа подроста сосны по высоте, см	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации R^2
51...100	$y = 0,7x + 4,22$	0,7944
101...150	$y = 0,66x + 6,55$	0,8575
151...200	$y = 0,74x + 9,02$	0,9422
201...250	$y = 0,49x + 11,44$	0,9528
251...300	$y = 0,5x + 13,733$	0,9494
301...350	$y = 0,15x + 17,367$	0,9643
351...400	$y = 0,9x + 17,167$	0,8322
401...450	$y = 2,35x + 15,283$	0,8874

Живой напочвенный покров представлен небольшим количеством видов — от 6 до 12, в зависимости от местоположения на склоне. В нижней части склона зафиксировано максимальное количество видов, в верхней — минимальное. Основная часть видов представлена ксерофитами и олиготрофами. По встречаемости и проективному покрытию доминируют 2–3 вида сосудистых растений (купена многоцветковая — *Polygonatum multiflorum* (L.) All., вереск — *Calluna vulgaris* (L.) Hill) и несколько видов мхов и лишайников. Встречаемость растений живого напочвенного покрова варьирует от 6 до 82 %. Проективное покрытие для большинства видов составляет менее 1,0 %.

На всем протяжении северо-восточного склона от подножия до вершины холма почвы сухие песчаные, гумусовый горизонт практически отсутствует, лесная подстилка мощная — от 7 до 15 см.

В составе моделей подрост сосны представлен особями, разными по размеру, возрасту и категориям жизнеспособности — жизнеспособными, нежизнеспособными и сухими. У каждого модельного экземпляра определяли возраст, измеряли высоту, величину прироста по годам, устанавливали возраст хвои и количество ветвей в мутовке каждого года. Общее количество модельных экземпляров жизнеспособного подрост сосны составило 195 экз. Количество нежизнеспособного подрост сосны высотой от 10 до 150 см — 62 экз., сухого высотой менее 100 см — 8 экз.

Установлено, что динамика роста в высоту прямо зависит от высоты подрост и его возраста. О динамике роста можно судить и по количеству ветвей в мутовке. Выявлена также устойчивая связь количества ветвей в мутовке с величиной прироста и его жизнеспособностью.

Если анализировать зависимость количества ветвей в мутовке от среднего общего прироста, то можно установить определенную зависимость. Во всех группах высот с увеличением прироста количество ветвей в мутовке также увеличивается. И наоборот, с увеличением количества ветвей в мутовке величина прироста также увеличивается. При этом коэффициент детерминации во всех случаях выше 0,7. Поскольку количество ветвей в мутовке закладывается по окончании предыдущего вегетационного периода, то прирост является производной от количества ветвей в мутовке.

Выявлена зависимость прироста от количества ветвей для 52 моделей подрост сосны высотой от 51 до 100 см (рис. 3).

Для подрост сосны высотой от 51 до 100 см количество ветвей в мутовке (ось X) составляет от 0 до 4. При этом величина среднего общего прироста изменяется от 4,3 до 7,7 см/год (ось Y). Зависимость описывается линейным уравнением вида $y = 0,7x + 4,22$ с коэффициентом детерминации 0,79.

Установленные закономерности справедливы и для подрост из других групп по высоте. Во всех случаях связь описывается линейным уравнением с коэффициентом детерминации от 0,79 до 0,95 (табл. 1).

С увеличением высоты подрост количество ветвей в мутовке, как правило, увеличивается, в частности для жизнеспособного подрост сосны высотой от 0,5 до 4,5 м. В зависимости от

Таблица 2

**Распределение величины среднего общего прироста по количеству ветвей
в мутовке для подроста сосны**

Distribution of average total growth by number of branches in whorl for pine undergrowth

Количество ветвей в мутовке, шт.	Средний общий прирост подроста сосны по группам высот, см/год							
	51...100	101...150	151...200	201...250	251...300	301...350	351...400	401...450
0	4,4	—	—	—	—	—	—	—
1	5,2	7,5	10,1	—	—	—	—	—
2	5,2	7,6	10,2	12,5	—	—	—	—
3	5,6	8,2	11,1	13	15,3	17,5	20,3	—
4	7,7	9,5	11,8	13,1	15,6	17,7	20,5	24,5
5	—	—	13	13,9	16,3	17,8	21,9	28
6	—	—	—	14,5	—	—	—	28,7

высоты подроста количество ветвей в мутовке изменяется от 0 до 6, а величина среднего общего прироста — от 4,4 до 28,7 см/год (табл. 2). Одинаковое количество ветвей в мутовке встречается у подроста любой высоты, например, по четыре ветки в мутовке отмечается у подроста высотой от 51 до 450 см (см. табл. 2).

Получены данные о связи общего среднего прироста с количеством ветвей в мутовке у подроста сосны разной высоты (рис. 4).

Из данных, представленных на рис. 4, следует, что для подроста любой высоты с увеличением количество ветвей в мутовке величина прироста растет. Если у подроста высотой до 100 см формируются мутовки без ветвей или с одной-двумя ветвями, то у подроста высотой более 200 см мутовки без ветвей или с одной ветвью не встречаются. В то же время у подроста высотой до 150 см не формируются мутовки, состоящие из пяти ветвей и более (см. рис. 4, табл. 3).

Приведенные в табл. 3 усредненные значения по основным характеристикам подроста сосны — средняя высота, средний возраст, средний общий прирост и средний возраст хвои представлены для каждой группы подроста по высоте с градацией 50 см (10...50, 51...100, 101...150 см и т. д.). Таким образом, с увеличением возраста подроста количество ветвей в мутовке увеличивается. Это характерно для всех групп по высоте.

Как показывает анализ литературных источников по данному направлению исследований, количество ветвей в мутовке для прогнозирования отдельных характеристик сосны в публикациях практически не используется. В связи с этим для установления зависимости динамики

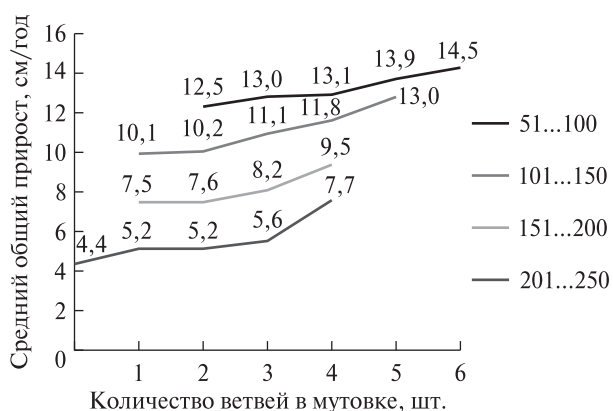


Рис. 4. Зависимость общего среднего прироста с количеством ветвей в мутовке для подроста высотой от 51 до 250 см

Fig. 4. Dependence of total average growth with the number of branches in the whorl for undergrowth from 51 to 250 cm in height

роста молодого поколения сосны и его жизнеспособности от количества ветвей в мутовке зависимость прироста и числа ветвей оказалась наиболее интересной и содержательной. Величина среднего общего прироста зависит от количества ветвей в мутовке, сформировавшейся в текущий вегетационный период (рис. 5). Зависимость тесная линейная при коэффициенте детерминации 0,97.

Рассчитаны усредненные значения среднего прироста и количество ветвей в мутовках модельных экземпляров подроста сосны (см. рис. 5). Вариационный ряд представлен экземплярами жизнеспособного подроста разной высоты (от 10 до 610 см) и разного возраста (от 4 лет до 21 года) в количестве 356 экз.

Т а б л и ц а 3

Зависимость количества растущих ветвей в мутовке от биометрических характеристик жизнеспособного подроста сосны

Dependence of the number of growing branches in a whorl on biometric characteristics of viable pine undergrowth

Средняя высота, см	Средний возраст, лет	Количество моделей, шт.	Возраст хвои, лет	Средний общий прирост, см/год	Количество ветвей в мутовке по годам формирования		
					2024	2023	2022
43,6	11,7	10	4,4	3,8	1,3	1,1	1,1
74,8	13,6	52	4,9	5,5	2,2	1,7	1,4
126,1	15,2	25	5,4	8,4	2,7	2,6	2,4
181,0	15,8	39	5,9	11,5	3,4	3,3	3,0
220,1	16,9	24	5,9	12,9	3,7	3,4	3,1
269,9	17,2	20	6	15,9	4,2	3,9	3,6
316,5	18,2	12	5,9	17,3	4,2	4,1	3,7
375,0	18	4	5,5	20,8	4,3	4,0	3,8
425,2	16,8	6	6,2	25,5	4,8	5,4	5
537,5	17,3	3	6,3	31,9	4,5	4,8	4,5

Примечание. Ошибка средней величины менее 3 %, за исключением тех случаев, когда количество моделей менее 5 экз.

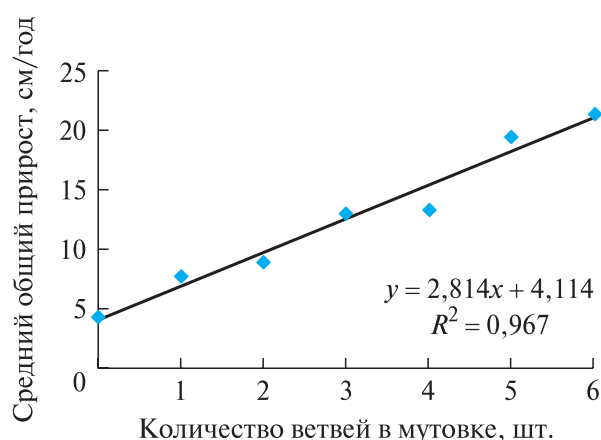


Рис. 5. Зависимость среднего общего прироста от количества ветвей в мутовке для подроста сосны любой высоты

Fig. 5. Dependence of average total growth on the number of branches in a whorl for pine undergrowth of any height

Максимальное количество ветвей в мутовке в целом — не более 6. Лишь в единичных случаях мутовка может содержать 7–8 ветвей. Чаще всего в мутовке формируется от 2 до 4 ветвей. Как видно из полученных данных ($Z_{\text{ср}}$, см. табл. 3), количество ветвей в мутовке коррелирует с величиной среднего общего прироста. Общая закономерность для жизнеспособного подроста состоит в том, что в целом количество ветвей в мутовке растет с увеличением высоты подроста и его возраста. Рост количества ветвей в мутовке сопровождается повышением

величины прироста, что является объективным показателем для оценки жизнеспособности подроста сосны.

Максимальное количество ветвей в одной мутовке характерно для жизнеспособного подроста. В кроне нежизнеспособного подроста формируется не более двух ветвей. Подрост категории «сухой» в мутовках не содержит или содержит лишь одну ветвь.

Особенность подроста сосны высотой до 30...40 см, независимо от жизнеспособности, состоит в том, что боковые ветви на таких экземплярах, как правило, не формируются. Мелкий подрост произрастает, как правило, под кроной более крупных экземпляров. Это обстоятельство приводит к уменьшению светового довольствия для мелкого подроста, вследствие чего формирование полноценной мутовки невозможно.

Нежизнеспособный подрост сосны — промежуточная категория молодого поколения между жизнеспособным и сухим. Все характеристики нежизнеспособного подроста по абсолютному значению существенно ниже, чем у жизнеспособного подроста (табл. 4).

При одинаковой высоте нежизнеспособный подрост имеет возраст на 1...4 года больше, чем жизнеспособный. Различия этих категорий состояния отмечены по количеству ветвей в мутовке. Например, для подроста высотой до 50 см среднее количество ветвей в мутовке для нежизнеспособного подроста составляет 0,2...0,3 побега, у жизнеспособного — 1,1...1,3 ветви, т. е. в 5–6 раз больше.

Т а б л и ц а 4

Зависимость количества растущих ветвей в мутовке от биометрических характеристик нежизнеспособного подроста сосны

Dependence of the number of growing branches in the whorl on the biometric characteristics of non-viable pine undergrowth

Средняя высота $H_{\text{ср}}$, см	Количество моделей, шт.	Средний возраст подроста $A_{\text{ср}}$, лет	Средний возраст хвои $A_{\text{хв}}$, лет	Средний прирост $Z_{\text{ср}}$, см/год	Количество ветвей в мутовке по годам формирования		
					2024	2023	2022
22,3 ± 0,9	56	7,1 ± 0,3	2,4 ± 0,1	3,0 ± 0,2	0,2	0,2	0,3
68,0	3	12,0	3,0	5,5	0	0,5	0,5
103,0	3	16,0	5,5	6,0	1,0	1,0	0,5

Примечание. Для случаев с минимальным количеством моделей в группе по высоте основные статистические показатели не определялись.

Т а б л и ц а 5

Световой режим, температура воздуха и почвы под пологом сосняков на опытных участках

Light regime, air and soil temperature under the canopy of pine forests in experimental plots

Место измерения	Положение в рельефе			
	Подножие склона	Средняя часть склона	Верхняя часть склона	
Освещенность, люкс				
На поверхности почвы	в куртине	1 217 ± 198	1 290 ± 172	1 422 ± 144
	под пологом	2 377 ± 314	2 418 ± 224	2 508 ± 269
На высоте 1,5 м от поверхности земли	в куртине	1 931 ± 118	1 989 ± 106	2 283 ± 129
	под пологом	6 814 ± 341	7 108 ± 292	7 25 ± 410
На открытом месте	–	66 220	66 820	67 170
Температура, °С				
На поверхности почвы	в куртине	23,7	23,9	24,5
	под пологом	28,4	29,7	29,9
На глубине 5 см от поверхности земли	в куртине	19,2	19,7	19,6
	под пологом	19,9	19,9	21,4
На глубине 10 см от поверхности земли	в куртине	15,0	15,1	15,8
	под пологом	15,5	15,4	15,9

Примечание. Освещенность и температура на поверхности почвы измерялись на площадках без растительности (на опаде хвои сосны).

Для подроста высотой 101...150 см различия достигают 270 %.

Как правило, сухой и нежизнеспособный подрост по высоте относится к мелкому и среднему. Подрост таких категорий состояния выше 1,5 м на опытных объектах не встречается. Это можно связать как с уменьшением конкуренции со стороны рядом растущего подроста, так и с увеличением освещения. На поверхности почвы освещенность в куртинах подроста сосны составляет 1,2...1,4 тыс. люкс, а на высоте 1,5 м — от 1,9 до 2,3 тыс. люкс. Вне куртин подрост освещенность под пологом древостоев достигает 7,4 тыс. люкс. При этом достаточно широки диапазоны температуры воздуха и почвы (табл. 5).

Неполноценное развитие мутовок (минимальное количество ветвей с минимальной густотой охвоения боковых побегов) является объективным показателем индикации жизненного состояния подроста и отнесения его к категории «нежизнеспособный». Переход подроста в категорию «жизнеспособный» невозможен при минимальном количестве ветвей в мутовках или при их полном отсутствии. Следовательно, количество ветвей в мутовке можно считать объективным показателем для дифференциации подроста сосны по виталитету.

Количество ветвей в мутовке связано и с высотой подроста. Количество ветвей в мутовке мелкого подроста чаще всего не более одной.

Т а б л и ц а 6

Зависимость количества растущих ветвей в мутовке от биометрических характеристик жизнеспособного подростa сосны высотой от 33 до 50 см

Dependence of the number of growing branches in a whorl on biometric characteristics of viable pine undergrowth 33 to 50 cm high

Средняя высота $H_{\text{ср}}$, см	Средний возраст $A_{\text{ср}}$, лет	Средний возраст хвои $A_{\text{хв}}$, лет	Средний прирост $Z_{\text{ср}}$, см/год	Количество ветвей в мутовке по годам				
				2024	2023	2022	2021	2020
33	10	4	3,3	0	1	1	1	1
39	10	3	3,9	1	2	1	1	1
39	9	3	4,3	0	0	0	2	–
39	12	5	3,3	2	1	–	–	–
45	12	4	3,8	3	2	1	1	3
46	12	4	3,9	2	1	1	0	–
48	12	5	4	2	1	2	1	1
48	12	5	4	1	1	2	1	1
49	13	5	3,7	1	1	1	1	1
50	15	6	3,3	1	1	2	1	1
43,6	11,7	4,4	3,75	1,3	1,1	1,1	0,9	0,9

Примечание. Здесь и далее жирным шрифтом выделены средние значения.

Т а б л и ц а 7

Зависимость количества растущих ветвей в мутовке от биометрических характеристик жизнеспособного подростa сосны высотой 50 см

Dependence of the number of growing branches in a whorl on biometric characteristics of viable pine undergrowth 50 cm high

Средняя высота подростa $H_{\text{ср}}$, см	Средний возраст подростa $A_{\text{ср}}$, лет	Средний возраст хвои $A_{\text{хв}}$, лет	Средний прирост $Z_{\text{ср}}$, см/год	Количество ветвей в мутовке по годам						
				2024	2023	2022	2021	2020	2019	2018
416	18	7	23,1	5	6	5	5	4	4	5
420	15	6	28,0	6	6	5	6	5	5	–
420	15	6	28,0	5	5	3	5	4	4	–
430	18	6	23,9	4	5	6	5	6	4	4
440	18	6	24,4	4	5	6	4	4	5	–
425,2	16,8	6,2	25,5	4,8	5,4	5	5	4,6	4,4	4,5

В отдельные годы у отдельных экземпляров мелкого подростa в мутовке иногда встречается 2–3 ветви (табл. 6).

Для сравнения представлены основные характеристики крупного подростa сосны и данные по количеству ветвей в мутовке (табл. 7).

Количество ветвей в мутовке у подростa сосны высотой от 401 до 450 см составляет не менее 4 шт.

Выводы

Установлена прямая связь среднего общего прироста подростa сосны с количеством ветвей в мутовке. Величина коэффициента детерминации

для подростa разной высоты составляет от 0,79 до 0,95. Чем больше ветвей в мутовке, тем больше средний общий прирост. Такая закономерность справедлива для жизнеспособного подростa. Этот показатель вполне может служить индикатором жизненного состояния молодого поколения сосны независимо от условий места произрастания. У нежизнеспособного подростa в отдельные годы мутовка не формируется вовсе или формируется только одна боковая ветвь. Сухой подрост, как правило, содержит в мутовке не более одной ветви. Следовательно, по количеству ветвей в мутовке можно устанавливать и разряды по виталитету подростa сосны. Количество ветвей в мутовке зависит


от высоты подроста. В мутовках мелкого подроста сосны обычно формируется от одной до трех ветвей, а в мутовках подроста сосны высотой более 5 м количество ветвей в мутовке всегда больше четырех. Чем выше подрост сосны, тем выше освещение ассимиляционного аппарата, а следовательно, выше продуктивность и больше величина текущего прироста.

Список литературы

- [1] Тихомирова А.А., Грязькин А.В., Гаврилова О.И. Возобновительный потенциал сосны. СПб.: Лань, 2025. 112 с.
- [2] Климов Б.Б., Грязькин А.В., Гаврилова О.И. Особенности естественного возобновления сосны под пологом сухих сосняков Бурятии. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2024. № 248. С. 123–137.
- [3] Грязькин А.В., Беляева Н.В., Кази И.А. Особенности роста подроста сосны под пологом древостоев на сухих бедных почвах // Research Science (BanskáBystrica, Словакия), 2019. № 8. С. 3–6.
- [4] Marqués L., Camarero J.J., Zavala M.A. Evaluating tree-to-tree competition during stand development in a relict Scots pine forest: How much does climate matter? // Trees, 2021, no. 35, pp. 1207–1219. DOI: 10.1007/s00468-021-02109-8
- [5] Mostarin A., Barbeito I., Christer R., Nilsson U. Regeneration failure of Scots pine changes the species composition of young forests // Scandinavian J. of forest research, 2021, v. 37, no. 1, pp. 14–22. DOI: 10.1080/02827581.2021.2005133
- [6] Лебедев А.В. Динамическая модель роста сосновых древостоев европейской части России по данным повторных наблюдений // Сибирский лесной журнал, 2024. № 4. С. 72–83.
- [7] Беляева Н.В., Сергеева А.С., Кази И.А. Формирование подроста хвойных пород на гарях в зависимости от парцеллярной структуры фитоценоза // Актуальные проблемы лесного комплекса, 2020. № 58. С. 6–11.
- [8] Гаврилова О.И., Грязькин А.В. Особенности восстановления лесного фитоценоза после сгоревшего сосняка на скальниках // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2022. № 241. С. 21–29.
- [9] Данчева А.В., Залесов С.В. Особенности лесовозобновления гарей в условиях сухих сосняков Казахского мелкосопочника (на примере Баянаульского ГНПП) // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2018. № 224. С. 150–160.
- [10] Ильичев Ю.Н., Бушков Н.Т., Тараканов В.В. Естественное лесовосстановление на гарях среднеобских боров. Новосибирск: Наука, 2003. 195 с.
- [11] Кряжевских Н.А., Сорокин И.В. Состояние лесовосстановления после пожаров и сплошных рубок в условиях сосняков и березняков разнотравного типа леса // Леса России и хозяйство в них, 2020. № 2 (73). С. 72–78.
- [12] Санникова Н.С., Санников С.Н., Гриценюк А.П., Егоров Е.В., Петрова И.В. Экогеографические особенности семенения и естественного возобновления сосны на гарях в сосновых лесах Забайкалья // Сибирский экологический журнал, 2010. № 2. С. 231–237.
- [13] Усень В.В., Гордей Н.В., Тегленков Е.А. Оценка постпирогенного формирования естественных насаждений в сосновых фитоценозах // Труды БГТУ, 2016. № 1. С. 79–83.
- [14] Гаврилова О.И., Грязькин А.В. Особенности самовозобновления сосны на гарях // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 3. С. 69–74. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-69-74
- [15] Санникова Н.С., Санников С.Н., Кочубей А.А., Петрова И.В. Естественное возобновление сосны на гарях в лесостепи Западной Сибири // Сибирский лесной журнал, 2019. № 5. С. 22–29.
- [16] Gryaz'kin A.V., Gurov S.V., Beliaeva N.V., Kovalev N.V., Sokolova V.A. A model of natural renewal of pine trees in taiga zone // Agriculture and Forestry, 2016, v. 62 (1), pp. 249–258. DOI: 10.17707/AgricultureForest.62.1.28
- [17] Gerelbaatar S., Baatarbileg N., Battulga P., Batsaikhan G., Khishigjargal M., Batchuluun T., Alexander G. Which selective logging intensity is most suitable for the maintenance of soil properties and the promotion of natural regeneration in highly continental Scots pine forests – results 19 years after harvest operations in Mongolia // J. For., 2019, v. 10 (141), pp. 21–22. DOI: 10.3390/f10020141
- [18] Фетисова А.А., Ковалев Н.В., Гуталь М., Грязькин А.В. Моделирование развития подроста в Рошинском лесничестве Ленинградской области // Леса России в XXI веке: Материалы Седьмой Международ. науч.-техн. интернет-конф., Санкт-Петербург, 01–30 июня 2011 г. СПб.: Изд-во СПбГЛТА, 2011. С. 108–112.
- [19] Фетисова А.А., Грязькин А.В., Ковалев Н.В., Гуталь М. Оценка успешности естественного возобновления хвойных пород на вырубках // ИзВУЗ Лесной журнал, 2013. № 6. С. 7–11.
- [20] Башегуров К.Н., Залесов С.В., Морозов А.Е., Попов А.С. Накопление подроста сосны обыкновенной на вырубках в подзоне северной тайги // Международный научно-исследовательский журнал, 2022. № 2 (116). С. 123–127.
- [21] Придача В.Б., Пеккоев А.Н., Неронова Я.А. Особенности роста и структуры древесины сосны на вырубке и под пологом древостоя в условиях Республики Карелии // ИзВУЗ Лесной журнал, 2024. № 4. С. 92–105.
- [22] Sklodowski J. Two directions of regeneration of post-windthrow pine stands depend of composition of the undergrowth and the soil environment // Forest ecology and management, 2020, p. 461. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.117950
- [23] Нгуен Ван Зинь, Грязькин А.В., Беляева Н.В., Фан Т.Л., Шахов А.Г. Самовозобновление хвойных на площадях лесных культур // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2018. № 223. С. 12–19.
- [24] Грязькин А.В., Беляева Н.В., Шахов А.Г., Нгуен Ван Зинь. Естественная смена ели сосной на участках лесных культур // Лесотехнический журнал, 2019. № 1. С. 54–61.
- [25] Рысин Л.П. Лесная растительность бассейна реки Кижинги (Бурятская АССР) // Труды Института леса и древесины АН СССР, 1962. Т. 54. С. 119–157.

- [26] Побединский А.В. Сосновые леса Средней Сибири и Забайкалья. М.: Наука, 1965. 268 с.
- [27] Бузыкин А.И. Леса Бурятской АССР // Леса СССР. В 5 т. М.: Наука, 1969. Т. 4. С. 388–437.
- [28] Frelich L.E. Boreal and Taiga Biome // Encyclopedia of the World's Biomes, 2020, pp. 103–115. DOI: 10.1016/b978-0-12-409548-9.11926-8
- [29] Gauthier S. Bernier P., Kuuluvainen T. Boreal forest health and global change // Science, 2015, v. 349, no. 6250, pp. 819–822. DOI: 10.1126/science.aaa9092
- [30] Fang Kai, Song Nai-ping, An Hui, Wei Le. Quantitative classification and ordination of plant communities in a desert steppe in Yanchi County of Ningxia, Northwest China // Chinese J. of Ecology, 2011, v. 30, iss. 12, pp. 719–2725.
- [31] Franklin J.A., Zipper C.E., Burger J.A. Influence of herbaceous ground cover on forest establishment and growth on eastern US coal surface mines // New Forests, 2012, v. 43, pp. 905–924. DOI: 10.1007/s11056-012-9342-5
- [32] Yang C., Shi L., Li H. The status quo and countermeasures for the protection and utilization of wild vegetable resources and plants in the forest mountains of Fuding Mountain Protected Area // J. of Guizhou Normal University (Natural Science Edition), 2019, v. 2, pp. 26–33.
- [33] Софронов М.А., Волокитина А.В., Мартынов А.Н. Оценка успешности лесовозобновления с учетом разновозрастности подроста и неравномерности его размещения по площади // Лесное хозяйство, 2003. № 5. С. 16–17.
- [34] Парамонов Е.Г., Шульц А.Н. Интенсивность роста подроста сосны в пригородных лесах // Вестник Алтайского государственного аграрного университета, 2012. № 9 (95). С.43–48.
- [35] Собачкин Д.С., Собачкин Р.С., Петренко А.Е. Особенности роста и продуктивности сосновых молодняков, сформированных из деревьев различного ценопотического статуса // Сибирский лесной журнал, 2022. № 3. С. 34–39.
- [36] Демаков Ю.П., Нуреева Т.В. Закономерности изменения рангового положения деревьев по их размерам в ценопопуляциях сосны обыкновенной // Лесоведение, 2019. № 4. С. 274–285.
- [37] Климов Б.Б., Грязькин А.В., Гаврилова О.И. Особенности естественного возобновления сосны под пологом сосняков Бурятии // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2024. Вып. 248. С. 123–137. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.248.123-137
- [38] Новикова Т.Н., Милютин Л.И., Назимов Д.И. Климатипы сосны обыкновенной в лесосеменных объектах и природных популяциях на юге Сибири // Актуальные проблемы лесного комплекса, 2010. № 25. С. 39–43.
- [39] Гаврилова О.И., Феклистов П.А., Грязькин А.В. Биометрические характеристики ассимиляционного аппарата самосева сосны на гари // Аграрный научный журнал, 2022. № 10. С. 30–33.
- [40] Грязькин А.В., Гаврилова О.И. Биометрические характеристики хвои подроста сосны, произрастающего на гари // Лесотехнический журнал, 2022. Т. 12. Вып. 45. № 1. С. 21–31.
- [41] Динамическое моделирование в лесном хозяйстве: монография / О.Г. Чертов, А.В. Грязькин, А.С. Комаров, А.П. Смирнов, Н.В. Беляева, С.В. Вавилов, С.Г. Парамонов, А.А. Смирнов, В.А. Соколова, Н.В. Ковалев, Ю.В. Павлов, А.Д. Манушина, А.А. Фетисова. СПб: Изд-во СПбГЛТА, 2011. 66 с.
- [42] Гуров С.В., Грязькин А.В., Ковалев Н.В., Фетисова А.А. Алгоритм и программа процесса лесовозобновления // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2011. Вып. 197. С. 256–263.
- [43] Грязькин А.В., Комаров А.С., Чертов О.Г., Ковалев Н.В. Эмпирическая модель естественного лесовозобновления // Новости МЦЛХП, 2010. Т. 1. № 11. С. 22–26.
- [44] Shang Ch., Coops N.C., Wulder M.A. Update and spatial extension of strategic forest inventories using time series remote sensing and modeling // International J. of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2020, v. 84, pp. 1229–1241.
- [45] Грязькин А.В. Влияние метода на точность и достоверность результатов исследования // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 1999. Вып. 212. С. 12–18.

Сведения об авторах

Грязькин Анатолий Васильевич  — д-р биол. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова» (СПБЛТУ им. С.М. Кирова), lesovod@bk.ru

Гаврилова Ольга Ивановна — д-р с.-х. наук, профессор кафедры технологии и организации лесного комплекса, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет» (ПетрГУ), ogavril@mail.ru

Климов Борис Борисович — аспирант, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова» (СПБЛТУ им. С.М. Кирова), Klimov85@mail.ru

Поступила в редакцию 18.06.2025.

Одобрено после рецензирования 09.09.2025.

Принята к публикации 21.01.2026.

STATE INDICATION OF PINE UNDERGROWTH BY GAIN FIGURE AND NUMBER OF BRANCHES IN WHORL

A.V. Gryaz'kin^{1✉}, O.I. Gavrilo², B.B. Klimov¹

¹Saint-Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov, 5, letter U, Institutsky lane, 194021, St. Petersburg, Russia

²Petrozavodsk State University, 33, Lenin av., 185960, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia

lesovod@bk.ru

Original data reflecting the dependence of pine undergrowth condition on the number of branches in the whorl and the gain figures are presented. The pine forests of lingonberry forest type in the forest fund of the Republic of Buryatia were studied. The pine forests at the trial plots are pure stands of 4–5 classes of bonitet. The average age of pine forests is 70–80 years. The pine forests were formed at burned areas over the last few years. The total amount of pine undergrowth does not exceed 1000 pine trees/ha under the canopy of pine forests. Undergrowth is represented by single tree species of *Sorbus aucuparia subsp. Sibirica* (Hedl.) Krylov, *Juniperus sibirica* Burgsd., *Lonicera maximowiczii* Maxim. The forest live cover consists of 12 species of vascular plants and several species of mosses and lichens. Undergrowth and forest live cover were counted using a free route on circular survey plots with a radius of 178,5 cm. In the course of field studies, the height, age, number of branches in the whorl, undergrowth viability, growth size and age of needles were determined in pine undergrowth. Species composition, occurrence and projective cover by species were determined for the forest live cover. Illumination and temperature were measured simultaneously at 12–13 hours in cloudy weather. It was shown that the maximum number of branches in a whorl in viable undergrowth reaches 6. The whorl of non-viable undergrowth contains 1–2 branches. In some cases, no lateral branches are formed in the whorl of non-viable undergrowth. The same is most often characteristic of dry undergrowth. Absolute values of the average total growth of pine undergrowth reach up to 36 cm/year in large undergrowth. In non-viable undergrowth this value varies from 1 to 4 cm/year. The results obtained can be used to compare the main characteristics of pine undergrowth growing in other forest conditions.

Keywords: Republic of Buryatia, pine forests, the area after the forest fire, number and condition of undergrowth, average total growth rate, whorls

Suggested citation: Gryaz'kin A.V., Gavrilo², Klimov B.B. *Indikatsiya sostoyaniya podrosta sosny po velichine prirosta i kolichestvu vetvey v mutovke* [State indication of pine undergrowth by gain figure and number of branches in whorl]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2026, vol. 30, no. 2, pp. 5–17. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-2-5-17

References

- [1] Tikhomirova A.A., Gryaz'kin A.V., Gavrilo². *Vozobnovitel'nyy potentsial sosny* [Renewable potential of pine]. St. Petersburg: Lan', 2025, 112 p.
- [2] Klimov B.B., Gryaz'kin A.V., Gavrilo². *Osobennosti estestvennogo vozobnovleniya sosny pod pologom sukhikh sosnyakov Buryatii* [Bulletin of the St. Petersburg Forest Engineering Academy], 2024, v. 248, pp. 123–137.
- [3] Gryaz'kin A.V., Belyaeva N.V., Kazi I.A. *Osobennosti rosta podrosta sosny pod pologom drevostoev na sukhikh bednykh pochvakh* [Peculiarities of pine undergrowth growth under the canopy of stands on dry, poor soils]. *Research Science (BanskáBystrica, Slovakia)*, 2019, no. 8, pp. 3–6.
- [4] Marqués L., Camarero J.J., Zavala M.A. Evaluating tree-to-tree competition during stand development in a relict Scots pine forest: How much does climate matter? *Trees*, 2021, no. 35, pp. 1207–1219. DOI: 10.1007/s00468-021-02109-8
- [5] Mostarin A., Barbeito I., Christer R., Nilsson U. Regeneration failure of Scots pine changes the species composition of young forests. *Scandinavian J. of forest research*, 2021, v. 37, no. 1, pp. 14–22. DOI: 10.1080/02827581.2021.2005133
- [6] Lebedev A.V. *Dinamicheskaya model' rosta sosnovykh drevostoev evropeyskoy chasti Rossii po dannym povtornykh nablyudeniy* [Dynamic growth model of pine stands in the European part of Russia based on repeated observations]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal [Siberian Forest J.]*, 2024, no. 4, pp. 72–83.
- [7] Belyaeva N.V., Sergeeva A.S., Kazi I.A. *Formirovaniye podrosta khvoynnykh porod na garyakh v zavisimosti ot partsellyarnoy struktury fitotsenoza* [Formation of coniferous undergrowth on burnt-out areas depending on the parcel structure of the phytocenosis]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa [Actual problems of the forest complex]*, 2020, no. 58, pp. 6–11.
- [8] Gavrilo², Gryaz'kin A.V. *Osobennosti vosstanovleniya lesnogo fitotsenoza posle sgorevshogo sosnyaka na skal'nikakh* [Features of forest phytocenosis restoration after a burnt pine forest on rocky outcrops]. *Izvestiya SPbLTA*, 2022, iss. 241, pp. 21–29.
- [9] Dancheva A.V., Zalesov S.V. *Osobennosti lesovozobnovleniya garey v usloviyakh sukhikh sosnyakov Kazakhskogo melkosopchnika (na primere Bayanaul'skogo GNPP)* [Features of reforestation of burnt-out areas in dry pine forests]

- of the Kazakh Uplands (using the Bayanul State National Park as an example)]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Izvestiya of the St. Petersburg Forest Engineering Academy], 2018, iss. 224, pp. 150–160.
- [10] Il'ichev Yu.N., Bushkov N.T., Tarakanov V.V. *Estestvennoe lesovosstanovlenie na garyakh sredneobskikh borov* [Natural reforestation of burnt-out areas of the Middle Ob pine forests]. Novosibirsk: Nauka. Siberian Branch, 2003, 195 p.
- [11] Kryazhevskikh N.A., Sorokin I.V. *Sostoyanie lesovosstanovleniya posle pozharov i sploshnykh rubok v usloviyakh sosnyakov i bereznyakov raznotravnoogo tipa lesa* [The state of forest restoration after fires and clearcuts in pine and birch forests of mixed-grass forest type]. *Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh* [Forests of Russia and their management], 2020, no. 2 (73), pp. 72–78.
- [12] Sannikova N.S., Sannikov S.N., Gritsenyuk A.P., Egorov E.V., Petrova I.V. *Ekogeograficheskie osobennosti semenosheniya i estestvennogo vozobnovleniya sosny na garyakh v sosnyakh lesakh Zabaykal'ya* [Ecogeographic features of seed production and natural regeneration of pine on burnt-out areas in pine forests of Transbaikalia]. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal* [Siberian Ecological J.], 2010, no. 2, pp. 231–237.
- [13] Usenya V.V., Gordey N.V., Teglenkov E.A. *Otsenka postpirogenogo formirovaniya estestvennykh nasazhdeniy v sosnyakh fitotsenozakh* [Assessment of post-pyrogenic formation of natural stands in pine phytocenoses]. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 1, pp. 79–83.
- [14] Gavrilova O.I., Gryazkin A.V. *Osobennosti samovozobnovleniya sosny na gari* [Pine self-regeneration in burnt forest area]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 3, pp. 69–74. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-69-74
- [15] Sannikova N.S., Sannikov S.N., Kochubey A.A., Petrova I.V. *Estestvennoe vozobnovlenie sosny na garyakh v lesostepi Zapadnoy Sibiri* [Natural regeneration of pine trees on burnt-out areas in the forest-steppe of Western Siberia]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian Forestry J.], 2019, no. 5, pp. 22–29.
- [16] Gryaz'kin A.V., Gurov S.V., Beliaeva N.V., Kovalev N.V., Sokolova V.A. A model of natural renewal of pine trees in the taiga zone. *Agriculture and Forestry*, 2016, v. 62 (1), pp. 249–258. DOI: 10.17707/AgricultForest.62.1.28
- [17] Gerelbaatar S., Baatarbileg N., Battulga P., Batsaikhan G., Khishigjargal M., Batchuluun T., Alexander G. Which selective logging intensity is most suitable for the maintenance of soil properties and the promotion of natural regeneration in highly continental Scots pine forests — results 19 years after harvest operations in Mongolia // *J. For.*, 2019, v. 10 (141), pp. 21–22. DOI: 10.3390/f10020141
- [18] Fetisova A.A., Kovalev N.V., Gural', M., Gryaz'kin A.V. *Modelirovanie razvitiya podrosta v Roshchinskom lesnichestve Leningradskoy oblasti* [Modeling of undergrowth development in the Roshchinsky forestry of the Leningrad region]. *Lesa Rossii v XXI veke: materialy sed'moy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy internet-konferentsii* [Forests of Russia in the 21st century: Proceedings of the Seventh International Scientific and Technical Internet Conference], St. Petersburg, June 1–30, 2011. St. Petersburg: SPbGLTA, 2011, pp. 108–112.
- [19] Fetisova, A.A., Gryaz'kin A.V., Kovalev N.V., Gural' M. *Otsenka uspekhov estestvennogo vozobnovleniya khvoynnykh porod na vyrubkakh* [Evaluation of the success of natural regeneration of coniferous species in clear-cut areas]. *Russian Forestry J.*, 2013, no. 6, pp. 7–11.
- [20] Bashegurov K.N., Zalesov S.V., Morozov A.E., Popov A.S. *Nakoplenie podrosta sosny obyknovnoy na vyrubkakh v podzone severnoy taygi* [Accumulation of Scots pine undergrowth in clearings in the northern taiga subzone]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research J.], 2022, no. 2 (116), pp. 123–127.
- [21] Pridacha V.B., Pekkoev A.N., Neronova Ya.A. *Osobennosti rosta i struktury drevesiny sosny na vyrubke i pod pologom drevostoya v usloviyakh Respubliki Karelii* [Features of the growth and structure of pine wood in clearings and under the canopy of a tree stand in the Republic of Karelia]. *Russian Forestry J.*, 2024, no. 4, pp. 92–105.
- [22] Sklodowski J. Two directions of regeneration of post-windthrow pine stands depend on the composition of the undergrowth and the soil environment. *Forest ecology and management*, 2020, p. 461. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.117950
- [23] Nguen V.Z., Gryaz'kin A.V., Belyaeva N.V., Fan T.L., Shakhov A.G. *Samovozobnovlenie khvoynnykh na ploschadyakh lesnykh kul'tur* [Self-regeneration of conifers in areas of forest cultures]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Bulletin of the St. Petersburg Forest Engineering Academy]. St. Petersburg: SPbGLTU, 2018, no. 223, pp. 12–19.
- [24] Gryaz'kin A.V., Belyaeva N.V., Shakhov A.G., Nguen Van Zin'. *Estestvennaya smena eli sosny na uchastkakh lesnykh kul'tur* [Natural succession of spruce to pine in forest crop areas]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering J.], 2019, no. 1, pp. 54–61.
- [25] Rysin L.P. *Lesnaya rastitel'nost' basseyna reki Kizhingi (Buryatskaya ASSR)* [Forest vegetation of the Kizhinga River basin (Buryat ASSR)]. *Trudy Instituta lesa i drevesiny AN SSSR* [Transactions of the Institute of Forest and Wood of the USSR Academy of Sciences], 1962, v. 54, pp. 119–157.
- [26] Pobedinskiy A.V. *Sosnyye lesa Sredney Sibiri i Zabaykal'ya* [Pine forests of Central Siberia and Transbaikalia]. Moscow: Nauka, 1965, 268 p.
- [27] Buzykin A.I. *Lesa Buryatskoy ASSR* [Forests of the Buryat ASSR]. *Lesa SSSR* [Forests of the USSR]. In 5 vol. Moscow: Nauka, 1969, t. 4, pp. 388–437.
- [28] Frelich L.E. Boreal and Taiga Biome. *Encyclopedia of the World's Biomes*, 2020, pp. 103–115. DOI: 10.1016/b978-0-12-409548-9.11926-8
- [29] Gauthier S. Bernier P., Kuuluvainen T. Boreal forest health and global change. *Science*, 2015, v. 349, no. 6250, pp. 819–822. DOI: 10.1126/science.aaa9092
- [30] Fang Kai, Song Nai-ping, An Hui, Wei Le. Quantitative classification and ordination of plant communities in a desert steppe in Yanchi County of Ningxia, Northwest China. *Chinese J. of Ecology*, 2011, v. 30, iss. 12, pp. 719–725.
- [31] Franklin J.A., Zipper C.E., Burger J.A. Influence of herbaceous ground cover on forest establishment and growth on eastern US coal surface mines. *New Forests*, 2012, v. 43, pp. 905–924. DOI: 10.1007 / s11056-012-9342-5

- [32] Yang C., Shi L., Li H. The status quo and countermeasures for the protection and utilization of wild vegetable resources and plants in the forest mountains of Fuding Mountain Protected Area. *J. of Guizhou Normal University (Natural Science Edition)*, 2019, v. 2, pp. 26–33.
- [33] Sofronov M.A., Volokitina A.V., Martynov A.N. *Otsenka uspekhov lesovozobnovleniya s uchetom raznovozrastnosti podrosta i neravnovernosti ego razmeshcheniya po ploshchadi* [Assessing the success of reforestation taking into account the different ages of undergrowth and the unevenness of its distribution over the area]. *Lesnoe khozyaystvo [Forestry]*, 2003, no. 5, pp. 16–17.
- [34] Paramonov E.G., Shul'ts A.N. *Intensivnost' rosta podrosta sosny v prigorodnykh lesakh* [Intensity of pine undergrowth growth in suburban forests]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of the Altai State Agrarian University]*, 2012, no. 9 (95), pp. 43–48.
- [35] Sobachkin D.S., Sobachkin R.S., Petrenko A.E. *Osobennosti rosta i produktivnosti sosnykh molodnyakov, sformirovannykh iz derev'ev razlichnogo tsenoticheskogo statusa* [Features of growth and productivity of pine young stands formed from trees of different cenotic status]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal [Siberian Forestry J.]*, 2022, no. 3, pp. 34–39.
- [36] Demakov Yu.P., Nureeva T.V. *Zakonomernosti izmeneniya rangovogo polozheniya derev'ev po ikh razmeram v tsenopopulyatsiyakh sosny obyknovnoy* [Patterns of changes in the rank position of trees by their size in Scots pine cenopopulations]. *Lesovedenie [Forest Science]*, 2019, no. 4, pp. 274–285.
- [37] Klimov B.B., Gryaz'kin A.V., Gavrilova O.I. *Osobennosti estestvennogo vozobnovleniya sosny pod pologom sosnyakov Buryatii* [Features of natural regeneration of pine under the canopy of pine forests in Buryatia]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii [Bulletin of the St. Petersburg Forest Engineering Academy]*, 2024, iss. 248, pp. 123–137. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.248.123-137
- [38] Novikova T.N., Milyutin L.I., Nazimov D.I. *Klimatipy sosny obyknovnoy v lesosemennykh ob'ektakh i prirodnykh populyatsiyakh na yuge Sibiri* [Climatypes of Scots pine in forest seed sites and natural populations in the south of Siberia]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa [Actual problems of the forest complex]*, 2010, no. 25, pp. 39–43.
- [39] Gavrilova O.I., Feklistov P.A., Gryaz'kin A.V. *Biometricheskie kharakteristiki assilyatsionnogo apparata samoseva sosny na gari* [Biometric characteristics of the assimilation apparatus of self-seeding pine on a burnt-out area]. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal [Agrarian Scientific J.]*, 2022, no. 10, pp. 30–33.
- [40] Gryaz'kin A.V., Gavrilova O.I. *Biometricheskie kharakteristiki khvoi podrosta sosny, proizrastayushchego na gari* [Biometric characteristics of the needles of pine undergrowth growing on a burnt-out area]. *Lesotekhnicheskyy zhurnal [Forestry Engineering J.]*, 2022, v. 12, iss. 45, no. 1, pp. 21–31.
- [41] Chertov O.G., Gryaz'kin A.V., Komarov A.S., Smirnov A.P., Belyaeva N.V., Vavilov S.V., Paramonov S.G., Smirnov A.A., Sokolova V.A., Kovalev N.V., Pavlov Yu.V., Manushina A.D., Fetisova A.A. *Dinamicheskoe modelirovanie v lesnom khozyaystve* [Dynamic modeling in forestry]. St. Petersburg: SPbGLTA, 2011, 66 p.
- [42] Gurov S.V., Gryaz'kin A.V., Kovalev N.V., Fetisova A.A. *Algoritm i programma protsessa lesovozobnovleniya* [Algorithm and program of the reforestation process]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii [Bulletin of the St. Petersburg Forest Engineering Academy]*, 2011, iss. 197, pp. 256–263.
- [43] Gryaz'kin A.V., Komarov A.S., Chertov O.G., Kovalev N.V. *Empiricheskaya model' estestvennogo lesovozobnovleniya* [Empirical model of natural reforestation]. *Novosti MTsLKhP [News of the Moscow Center for Forestry and Agricultural Production]*, 2010, v. 1, no. 11, pp. 22–26.
- [44] Shang Ch., Coops N.C., Wulder M.A. Update and spatial extension of strategic forest inventories using time series remote sensing and modeling. *International J. of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, v. 84, pp. 1229–1241.
- [45] Gryaz'kin A.V. *Vliyaniye metoda na tochnost' i dostovernost' rezul'tatov issledovaniya* [Influence of the method on the accuracy and reliability of research results]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii [Bulletin of the St. Petersburg Forest Engineering Academy]*. SPb.: LTA, 1999, pp. 12–18.

Authors' information

Gryaz'kin Anatoliy Vasil'evich✉ — Dr. Sci. (Biology), Professor, Saint-Petersburg State Forest Technical University, lesovod@bk.ru

Gavrilova Olga Ivanovna — Dr. Sci. (Agriculture), Professor of the Department of Technology and Organization of the Forestry Complex of PetSU, ogavril@mail.ru.

Klimov Boris Borisovich — pg. of the Saint-Petersburg State Forest Technical University, Klimov85@mail.ru

Received 18.06.2025.

Approved after review 09.09.2025.

Accepted for publication 21.01.2026.

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

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОБИЛЬНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ ARBOREAL FOREST ДЛЯ ТАКСАЦИИ ЕЛОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ

Н.Н. Дубенок, А.В. Лебедев, В.В. Гостев[✉]

ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева» (РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева), Россия, 127550, Москва, Тимирязевская ул., д. 49

v.gostev@rgau-msha.ru

Приведены результаты оценки качества определения таксационных показателей чистых еловых древостоев Костромской области с использованием мобильного приложения Arboreal Forest на базе смартфона Apple iPhone 14 Pro, оснащенного LiDAR-датчиком. Исследования выполнены на четырех временных пробных площадях. Установлено, что значения диаметров и сумм площадей поперечных сечений стволов, полученные при помощи мобильного приложения и мерной вилки, имеют высокую степень соответствия. С применением теста Колмогорова — Смирнова ($p = 0,05$) подтверждено отсутствие статистически достоверных различий между рядами распределения деревьев по ступеням толщины. Определено, что отклонение среднего диаметра, рассчитанного по данным приложения Arboreal Forest, от измеренного мерной вилкой не превышает $\pm 3,2$ %, а отклонение сумм площадей сечений и запасов $\pm 6,4$ %. Показано, что полученная точность соответствует требованиям, предъявляемым к глазомерно-измерительному способу таксации. Рекомендовано продолжить исследования, направленные на разработку отечественных приложений и способов таксации с применением мобильных устройств.

Ключевые слова: смартфон, iPhone LiDAR, Arboreal Forest, таксационные показатели, еловые древостои, Костромская область

Ссылка для цитирования: Дубенок Н.Н., Лебедев А.В., Гостев В.В. Использование мобильного приложения Arboreal Forest для таксации еловых древостоев // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2026. Т. 30. № 2. С. 18–30. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-2-18-30

Научные достижения последних десятилетий открывают большие возможности для внедрения новых и эффективных технологий в области лесотаксационных измерений. В настоящее время активно развиваются способы таксации с применением лазерного сканирования [1, 2]. В лесохозяйственных исследованиях наиболее часто используются данные, полученные с применением LiDAR (Light Detection and Ranging) — оптического сенсора, испускающего поток лазерных лучей. В результате лазерной съемки формируется облако точек, по которому возможно определение количественных характеристик объектов [3, 4].

В работах [5–7] отмечается, что оценки таксационных показателей древостоев с высокой точностью можно получить с помощью систем наземного лазерного сканирования, определяющего такие показатели, как высота и диаметр ствола деревьев [8–10]. Путем использования объединенных данных наземного и воздушного лазерного сканирования можно повысить точность определения диаметра деревьев по

сравнению с наземной инструментальной таксацией [11].

Встроенными датчиками LiDAR оборудованы современные мобильные устройства (смартфоны и планшеты), что позволяет через приложения проводить лесотаксационные измерения отдельно растущих деревьев и древостоев в целом [12]. К основным преимуществам мобильных устройств, оснащенных датчиком LiDAR, относят небольшую массу, компактные размеры, понятный интерфейс, быстрый обмен данными, снижение временных и трудовых затрат на проведение работ, быстрое получение изображений и данных о пространственном расположении объектов [13, 14]. Среди многообразия мобильных приложений, позволяющих фиксировать дендрометрические показатели, можно выделить Arboreal Forest, Forest Scanner, iForester и др.

Применение смартфонов с установленными приложениями для таксации лесов способствует повышению эффективности работ и сокращению затрат на их проведение благодаря относительно небольшой стоимости мобильного устройства, заменяющего некоторые специализированные инструменты без потерь точности

Т а б л и ц а 1

Характеристика древостоев (состав 10Е) на временных пробных площадях
Forest stands characteristics (composition 10E) on temporary trial plots

Номер пробной площади	Площадь, га	Средняя высота дерева, м	Средний диаметр ствола, см	Число деревьев на 1 га, шт.	Сумма площадей сечений на 1 га, м ²	Запас на 1 га, м ³
1	0,7076	25,	36,5	163	17,0	178,4
2	0,3122	26,0	32,3	461	37,8	412,8
3	0,2265	24,0	29,7	474	32,6	328,9
4	0,1847	25,0	32,7	606	50,3	528,4

данных [15, 16]. Оценка качества определения таксационных показателей древостоев сосны и эвкалипта в пределах северной части Португалии с помощью устройств на базе операционных систем Android и iOS по сравнению с инструментальной таксацией показала, что наиболее точные результаты получены благодаря шведскому приложению Arboreal Forest [15].

Если сопоставить результаты измерений диаметра стволов, полученные через приложение Arboreal Forest и с помощью мерной ленты, то можно отметить их хорошую согласованность, несмотря на тенденцию незначительной недооценки результатов измерений мобильным приложением [17].

Опыт использования мобильных приложений для таксации лесов в России весьма ограничен. Приложения для смартфонов выступают эффективной альтернативой стандартным (инструментальным) методам проведения таксации и инвентаризации лесов, однако в рамках достижения технологического суверенитета и импортозамещения имеется потребность в разработке отечественных устройств и программного обеспечения к ним [12].

Цель работы

Цель работы — оценка качества определения таксационных показателей еловых древостоев с помощью смартфона, оснащенного датчиком LiDAR, через приложение Arboreal Forest.

Материалы и методы

Исследование выполнено на территории Кологривского лесничества Костромской области (58°8107'N, 44°3423'E, WGS 84). Сбор данных проводился в еловых древостоях, сформированных на территории региона преимущественно елью финской (*Picea × fennica* (Regel) Kom.), у которой с различной степенью проявляются



Рис. 1. Интерфейс приложения Arboreal Forest при измерении диаметра ствола (скриншот сделан во время работы)

Fig. 1. The Arboreal Forest app interface for measuring trunk diameter (screenshot taken during operation)

морфологические признаки ели обыкновенной (*P. abies* (L.) H. Karst.) и ели сибирской (*P. obovata* Ledeb.) [18, 19]. Полевые работы проведены на четырех временных пробных площадях, заложенных в наиболее типичных и высокопродуктивных типах леса — ельниках кисличных и ельниках черничных [20] (табл. 1).

Определение таксационного диаметра стволов выполнено одновременно с измерениями

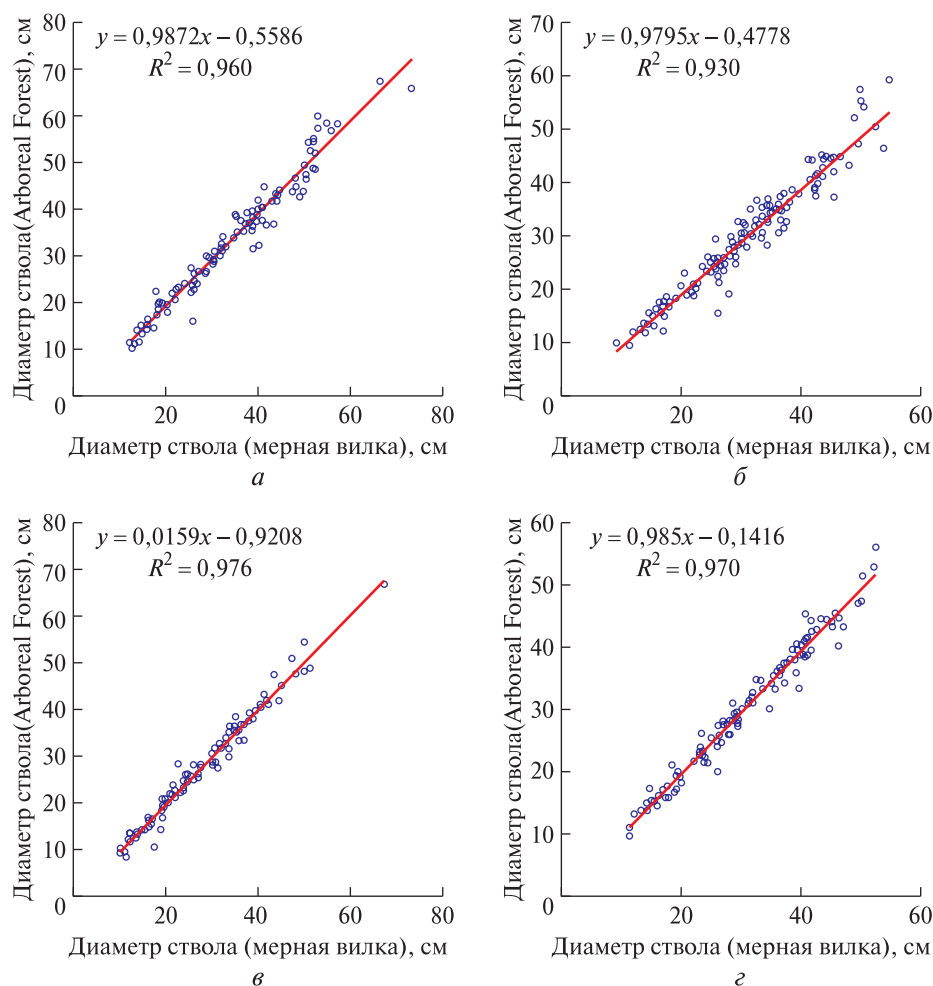


Рис. 2. Соотношение значений диаметра ствола на высоте 1,3 м от поверхности земли, полученными мерной вилкой и приложением Arboreal Forest: *пробные площади:* а — 1; б — 2; в — 3; г — 4

Fig. 2. Correlation of trunk diameter values at a height of 1,3 m above the ground, obtained with a tree caliper and the Arboreal Forest app: *sample plots:* а — 1; б — 2; в — 3; г — 4

диаметра стволов мерной вилкой (Haglof Mantax Blue) в двух взаимно перпендикулярных направлениях с точностью до 0,1 см и на базе приложения Arboreal Forest (версия 3.50) на платформе смартфона Apple iPhone Pro 14. Мобильное приложение использовано по инструкции разработчика. Для определения расстояния до деревьев перед началом работ устройством фиксировалась точка отсчета на местности. На пробной площади произвольной конфигурации был проведен сплошной перебор деревьев для измерения диаметра стволов. С расстояния от измеряемого объекта от 0,3 до 1,0 м (в зависимости от толщины ствола дерева) на высоту 1,3 м от поверхности земли наводилась камера смартфона. После автоматизированного распознавания контуров ствола фиксировалось значение таксационного диаметра

(с точностью до 0,1 см) (рис. 1) [15, 21], а исполнителем из выпадающего списка выбиралась соответствующая древесная порода. Географические координаты стволов обмеренных деревьев определялись в автоматическом режиме. По окончании перебора данные о номере дерева, диаметре его ствола, дате проведения измерений, GPS-координатах расположения ствола, точности сигнала GPS, древесной породе, а также комментарии сохранялись в виде файла формата JSON. Для определения высоты деревьев на каждой пробной площади высотомером Nikon Forestry Pro II осуществлялось измерение высот 20...25 деревьев в диапазоне всех представленных ступеней толщины стволов.

Материалы полевых исследований из отчетов приложения Arboreal Forest импортиро-

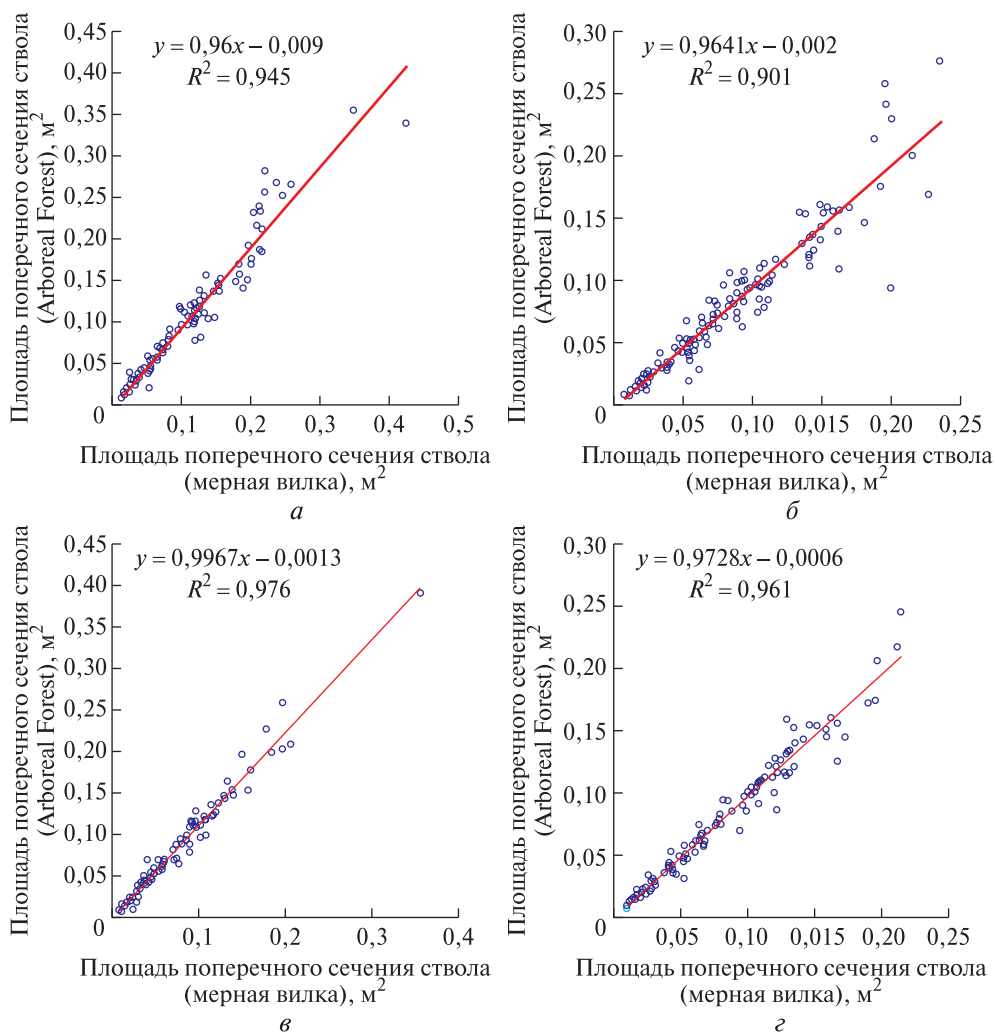


Рис. 3. Соотношение значений площади поперечного сечения стволов на высоте 1,3 м от поверхности земли, полученными мерной вилкой и приложением Arboreal Forest: *пробные площади*: а — 1; б — 2; в — 3; г — 4

Fig. 3. Correlation of trunk cross-sectional area values at a height of 1.3 m above the ground, obtained with a tree caliper and the Arboreal Forest app: *sample plots*: а — 1; б — 2; в — 3; г — 4

вались в таблицы Microsoft Office Excel для проведения подготовки к статистической обработке. По полученным значениям диаметра стволов проводился расчет среднего значения диаметра ствола для каждой пробной площади, определялись суммы площадей поперечных сечений. Анализ данных был направлен на выявление соответствий и степени различий между значениями диаметра стволов и площадей поперечных сечений на высоте 1,3 м от поверхности земли, установленных с применением приложения Arboreal Forest и инструментальным методом (стандартная методика).

Оценка соответствия значений диаметра стволов на высоте 1,3 м от поверхности земли, полученных по стандартной методике и с использованием приложения Arboreal Forest, проводилась с применением графического анализа

и расчета общепринятых метрик: линейного отклонения, квадратного корня из среднеквадратической ошибки ($RMSE$), средней абсолютной ошибки (MAE), ошибки среднего смещения (MBE), среднего процента абсолютной ошибки ($MAPE$), коэффициента детерминации (R^2) [22, 23].

Выявление различий между рядами распределения количества деревьев по четырехсантиметровым ступеням толщины, полученных двумя методами, проводилось с применением критерия согласия Колмогорова — Смирнова (KS), расчет которого выполнялся в среде вычислений R (версия 4.4.2.) при $p = 0,05$ [24, 25].

Результаты и обсуждение

Графическая визуализация соотношений между значениями диаметра стволов на высоте

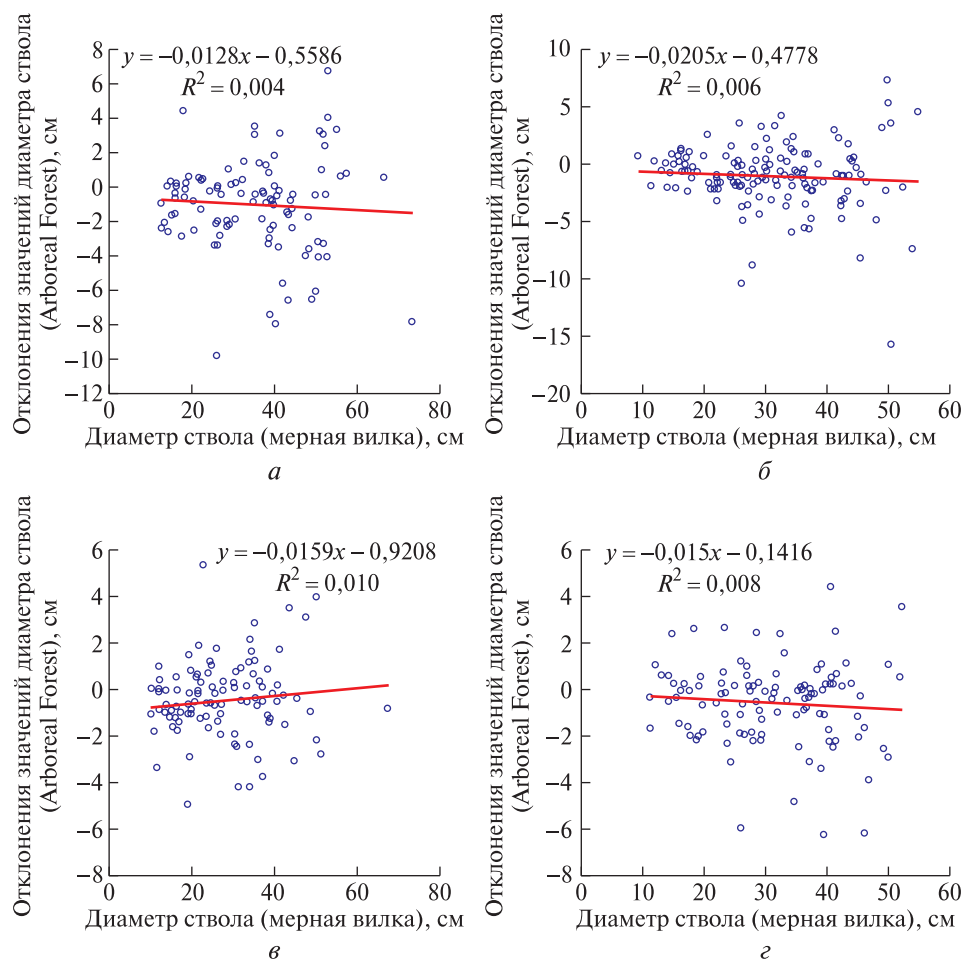


Рис. 4. Отклонения значений диаметра ствола на высоте 1,3 м от поверхности земли, определенных по данным приложения Arboreal Forest, от измеренных мерной вилкой: пробные площади: а — 1; б — 2; в — 3; г — 4

Fig. 4. Deviations of trunk diameter values at a height of 1.3 m above the ground, determined using Arboreal Forest app data, from those measured with a tree caliper: *sample plots*: а — 1; б — 2; в — 3; г — 4

1,3 м от поверхности земли (рис. 2) и площадями поперечного сечения стволов (рис. 3), измеренными мерной вилкой и с помощью приложения Arboreal Forest, демонстрируют высокую степень соответствия. Большая часть точек данных расположена вдоль линий тренда, а значения коэффициентов детерминации (для диаметра стволов от 0,930 до 0,976; для площадей поперечного сечения стволов от 0,901 до 0,976) указывают на высокую согласованность значений двух рассматриваемых выборок.

Анализ отклонения значений диаметра ствола (рис. 4) и площади поперечного сечения на высоте 1,3 м от поверхности земли (рис. 5), определенных приложением Arboreal Forest от значений, измеренных мерной вилкой, позволяет сделать вывод об их независимости и близком расположении к нулю. При определении диаметра приложением Arboreal Forest на пробных площадях

1, 2 и 4 (рис. 4, а, б, г) зафиксировано незначительное занижение значений по сравнению со значениями, полученными с использованием мерной вилки, на что указывают отрицательные угловые коэффициенты линий тренда. Значения коэффициентов детерминации ($R^2 < 0,1$) позволяют считать эту зависимость слабовыраженной. Для площадей поперечного сечения отмечается сходный тренд (см. рис. 5) при $R^2 < 0,05$.

Для диаметра ствола величина $RMSE$ располагается в пределах от 1,289 до 2,146 см; для площади сечения — от 0,009 до 0,018 м² (табл. 2). Метрика MBE указывает на незначительное занижение значений диаметра и площади сечения приложением Arboreal Forest. Средняя доля абсолютной ошибки при определении диаметра приложением Arboreal Forest не превышает 10,044 %; площади поперечного сечения стволов — 13,186 %. На хорошую согласованность

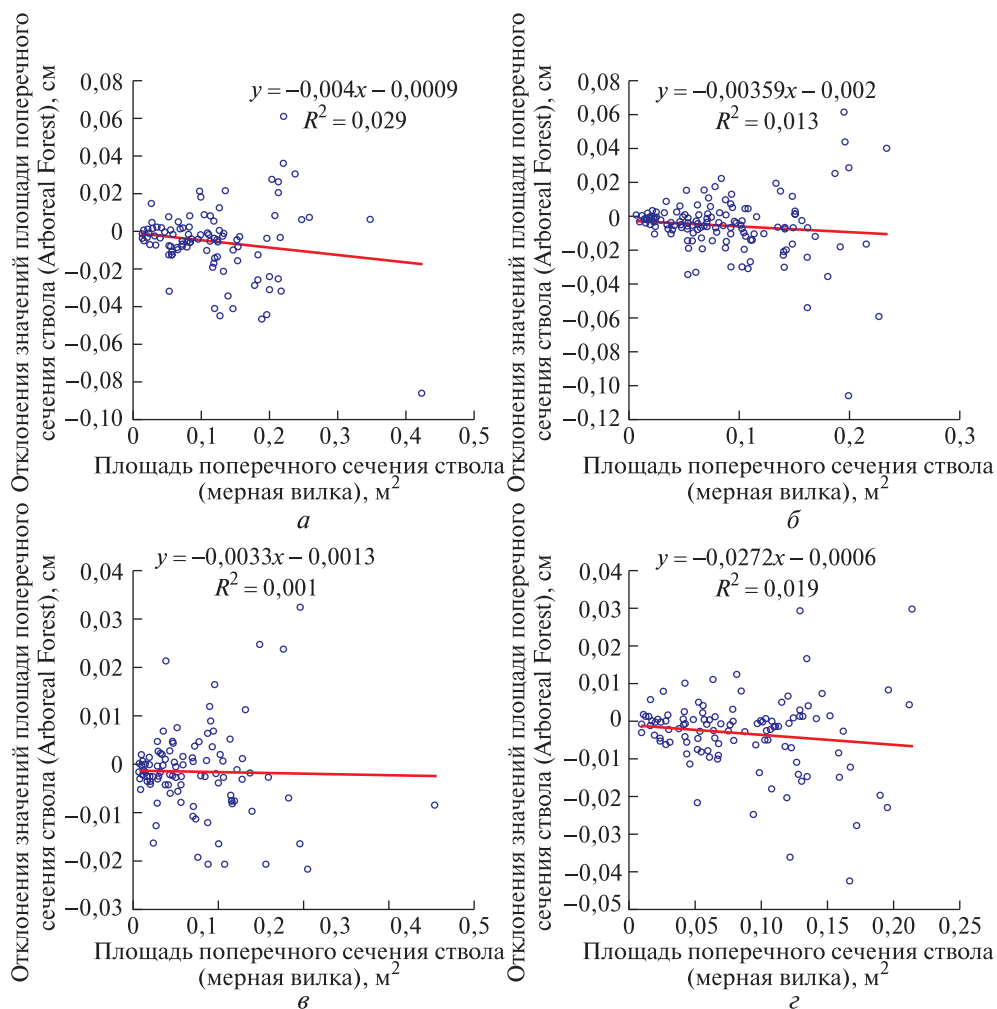


Рис. 5. Отклонения значений площади поперечного сечения стволов на высоте 1,3 м от поверхности земли, определенных по данным приложения Arboreal Forest, от полученных данных при помощи мерной вилки: *пробные площади*: а — 1; б — 2; в — 3; г — 4

Fig. 5. Deviations of trunk cross-sectional area values at a height of 1.3 m above the ground, determined using the Arboreal Forest app, from those obtained using the tree caliper: *sample plots*: а — 1; б — 2; в — 3; г — 4

измеренных мерной вилкой и полученных по данным приложения Arboreal Forest значений таксационных показателей указывает доля объясненной дисперсии: для диаметра стволов — от 0,930 до 0,976; для площади поперечного сечения стволов — от 0,901 до 0,976 (см. табл. 2).

Между рядами распределения для рассматриваемых двух методов отсутствуют статистически достоверные различия, о чем свидетельствуют результаты теста Колмогорова — Смирнова при уровне значимости 0,05 (рис. 6).

Таким образом, применение приложения Arboreal Forest позволяет получить сопоставимые с данными мерной вилки значения диаметра стволов и сумм площадей поперечного сечения стволов при проведении сплошного перече́та деревьев.

Отклонение среднего диаметра стволов, рассчитанного с применением приложения Arboreal Forest, от полученного с использованием мерной вилки, составило от $-1,0$ см ($-3,2\%$) до $-0,3$ см ($-1,1\%$), что не превышает значение допустимой случайной ошибки ($\pm 10\%$) при глазомерно-измерительном способе таксации, согласно Приказу Минприроды России от 05.08.2022 № 510 «Об утверждении Лесоустроительной инструкции» (табл. 3).

Значения сумм площадей поперечного сечения на высоте 1,3 м, рассчитанные с помощью приложения Arboreal Forest оказались ниже полученных мерной вилкой на величину от $2,3$ м² ($-6,4\%$) до $0,7$ м² ($-2,3\%$).

Определение запаса древесины M осуществляется по значениям суммы площадей попереч-

Т а б л и ц а 2

**Метрики соответствия значений таксационного диаметра
и сумм площадей сечения на высоте 1,3 м от поверхности земли,
определенных с применением мерной вилки и Arboreal Forest**

Correspondence metrics for the inspected diameter values and the sums of cross-sectional areas
at a height of 1,3 m above the ground, determined using the tree caliper and Arboreal Forest

Номер пробной площади	Квадратный корень из среднеквадратической ошибки <i>RMSE</i>	Ошибка среднего смещения <i>MBE</i>	Средняя абсолютная ошибка <i>MAE</i>	Средний процент абсолютной ошибки <i>MAPE</i>	Коэффициент детерминации R^2
Средний диаметр ствола на высоте 1,3 м					
1	1,953	0,500	1,002	8,871	0,960
2	2,146	0,555	1,061	10,044	0,930
3	1,289	0,243	0,659	7,831	0,976
4	1,327	0,305	0,662	6,723	0,970
Сумма площадей поперечного сечения на высоте 1,3 м					
1	0,018	0,005	0,012	11,684	0,945
2	0,018	0,005	0,011	13,186	0,901
3	0,009	0,002	0,006	10,302	0,976
4	0,010	0,003	0,007	8,895	0,961

Т а б л и ц а 3

**Таксационные показатели еловых древостоев на исследуемых пробных площадях,
рассчитанные по данным измерений приложения Arboreal Forest и мерной вилкой**

Inventory indicators of a spruce stand in the study plots, calculated using
Arboreal Forest app measurements and a tree caliper

Номер пробной площади	Показатель	Приложение Arboreal Forest	Мерная вилка	Абсолютное отклонение	Относительное отклонение, %
1	Средний диаметр стволов, см	35,6	36,5	-0,9	-2,5
	Сумма площадей поперечного сечения стволов, м ² /га	16,2	17,0	-0,8	-5,1
2	Средний диаметр стволов, см	31,3	32,3	-1,0	-3,2
	Сумма площадей поперечного сечения стволов, м ² /га	35,5	37,8	-2,3	-6,4
3	Средний диаметр стволов, см	29,4	29,7	-0,3	-1,1
	Сумма площадей поперечного сечения стволов, м ² /га	31,9	32,6	-0,7	-2,3
4	Средний диаметр, см	32,1	32,7	-0,6	-1,8
	Сумма площадей поперечного сечения стволов, м ² /га	48,6	50,3	-1,8	-3,6

ного сечения стволов деревьев на высоте 1,3 м от поверхности земли G , их средней высоты H и среднего видового числа F по формуле

$$M = GHF.$$

Таким образом, при одинаковых значениях средней высоты и среднего видового числа точ-

ность определения запаса древостоя будет зависеть от значения суммы площадей поперечного сечения стволов. При ее расчете, по данным приложения Arboreal Forest, отклонение запасов по сравнению с данными, полученными мерной вилкой, не превышает 6,4 %. При этом допустимая случайная ошибка определения запаса при

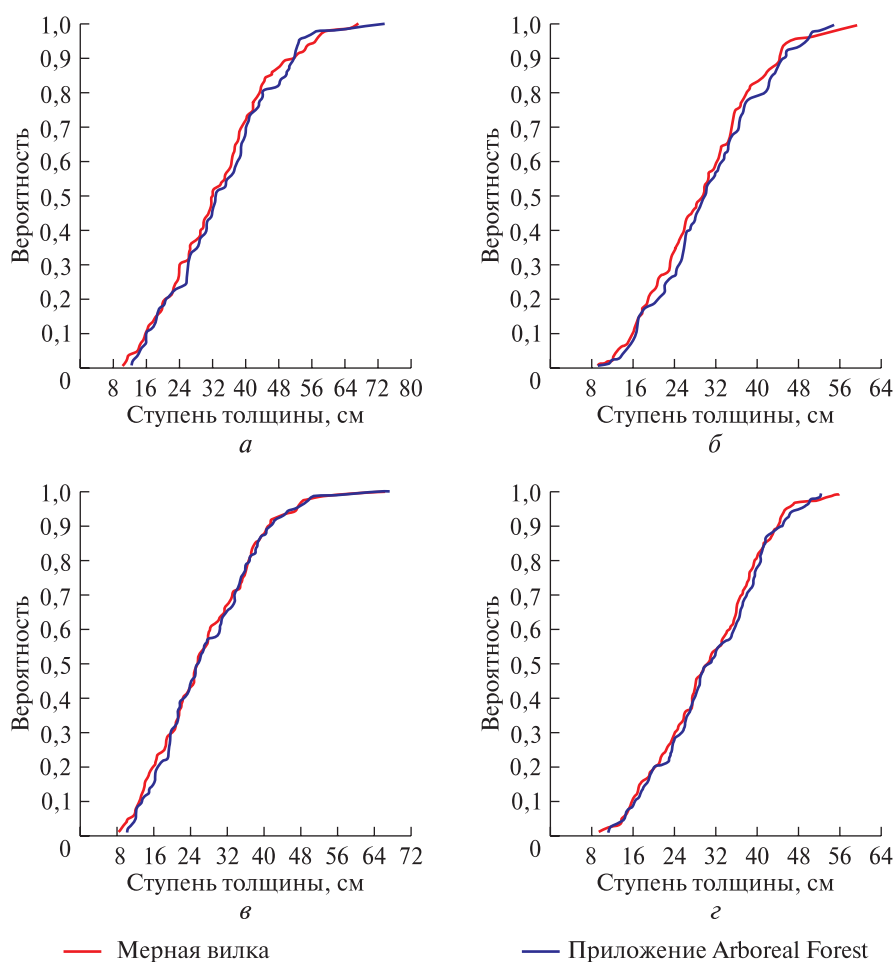


Рис. 6. Соответствие ступеней толщины, установленных при помощи мерной вилки и приложения Arboreal Forest: *пробные площади*: а — 1 ($KS = 0,078$; $p = 0,87$); б — 2 ($KS = 0,090$; $p = 0,60$); в — 3 ($KS = 0,065$; $p = 0,98$); г — 4 ($KS = 0,054$; $p = 1,00$)

Fig. 6. Correlation between the thickness grades established using the caliper and the Arboreal Forest app: *sample plots*: а — 1 ($KS = 0,078$; $p = 0,87$); б — 2 ($KS = 0,090$; $p = 0,60$); в — 3 ($KS = 0,065$; $p = 0,98$); г — 4 ($KS = 0,054$; $p = 1,00$)

глазомерно-измерительном способе таксации не должна выходить за пределы $\pm 15\%$.

Полученные результаты согласуются с данными зарубежных авторов. Применение смартфона с датчиком LiDAR позволяет получать количественные характеристики (таксационный диаметр стволов, сумму площадей поперечного сечения стволов, запас), не уступающие по точности инструментальной таксации [26, 27]. По мобильному приложению собственной разработки авторами работы [28] была получена погрешность определения диаметра стволов, составившая $\pm 3,7$ см. Технические особенности датчика LiDAR называют [21] вероятной причиной возникновения погрешностей при измерении диаметра стволов. Использование приложения Arboreal Forest, по мнению авторов работы [15], позволяет значительно

сократить время, затраченное на проведение таксационных измерений, по сравнению со стандартным методом, а полученные результаты полностью соответствуют требованиям, предъявляемым к точности определения диаметра ствола.

Аналогичную смартфону с датчиком LiDAR точность измерения таксационных показателей в зарубежных и отечественных исследованиях демонстрируют наземные лазерные сканеры.

В работе [29] указано, что с помощью наземного лазера получена погрешность в определении диаметра ствола деревьев сосны, составившая ± 1 см.

В работе [30] для лесообразующих пород северо-западной части провинции Юньнань на юге Китая таксационные диаметры определены наземным лазером с точностью до $\pm 1,28$ см.

С помощью мобильного лазера получена трехмерная сцена пробной площади и достигнута точность определения диаметра ствола сосны, равная ступени толщины [31]. Однако ввиду высокой стоимости и небольшой производительности широкое применение наземных лазерных сканеров в лесохозяйственных исследованиях затруднительно.

Слабо освещен в мировой литературе вопрос влияния условий местопроизрастания на точность таксации с помощью смартфона [27, 32]. Значительные трудности вызывает использование мобильных устройств для определения высоты деревьев, по причине наличия густого подлеска и подроста, сомкнутости полога, недостаточной освещенности и технических особенностей [33, 34].

Необходимы дальнейшие исследования, направленные на изучение эффективности применения мобильных устройств для инвентаризации лесных массивов. Актуальным является вопрос внедрения алгоритмов инвентаризации лесных массивов с помощью мобильных устройств на базе региональных сортиментных таблиц, моделей образующей стволов, уравнений зависимости высоты от диаметра. Возможна разработка отечественного приложения для таксации, аналогичного рассмотренному.

Выводы

Вследствие анализа точности определения таксационных показателей диаметра и площади поперечного сечения стволов ели с помощью мобильного приложения Arboreal Forest на базе смартфона Apple iPhone Pro 14 при проведении сплошного перечета на пробных площадях получены результаты, указывающие на их хорошее соответствие. Соответствие ступеней толщины, установленных с помощью мерной вилки и приложения Arboreal Forest, подтверждено тестом Колмогорова — Смирнова на уровне значимости 5 %. Для еловых древостоев Костромской области установлено отклонение среднего диаметра ствола, рассчитанного с помощью приложения Arboreal Forest от полученного с помощью мерной вилки, которое не превышает $\pm 3,2$ %, и отклонение сумм площадей поперечного сечения стволов и запасов древесины, которое не превышает $\pm 6,4$ %, что свидетельствует о необходимой точности, предъявляемой к глазомерно-измерительному способу таксации. Рекомендуется проведение дальнейших исследований, направленных на разработку способов таксации с применением смартфонов, оборудованных датчиком LiDAR, что повысит эффективность инвентаризации лесных массивов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-01016, <https://rscf.ru/project/23-76-01016/>

Список литературы

- [1] Петровская А.А., Мохов С.П. Определение размерно-качественных показателей древостоя с применением дронов и методов наземного лазерного сканирования // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов, 2024. № 1 (276). С. 120–124. DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-16.
- [2] Крутов Т.Ю., Терехов В.И., Якубов А.Р. Подходы к разработке метода автоматизированной подеревной цифровой таксации локального участка леса с применением воздушных и наземных лидаров // Искусственный интеллект в автоматизированных системах управления и обработки данных: сб. статей Всерос. науч. конф., в 2 т., Москва, 27–28 апреля 2022 года. Т. 1. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022. С. 68–72.
- [3] Кедров А.В., Малтамо М. Лесоустройство с использованием технологий LiDAR // Геоинформационное обеспечение пространственного развития Пермского края: Сборник научных трудов / Пермский государственный национальный исследовательский университет, ГИС-центр ПГНИУ. Вып. 8. Пермь: Изд-во ПГНИУ, 2015. С. 34–40.
- [4] Ковязин В.Ф., Пасько О.А., Лепихина О.Ю., Трушников В.Е. Оценка точности инвентаризации лесных земель с применением воздушного лазерного сканирования // Геодезия и картография, 2022. Т. 83. № 6. С. 54–63. DOI: 10.22389/0016-7126-2022-984-6-54-63.
- [5] Говядин И.К., Чубинский А.Н., Алексеев А.С. Метод измерения диаметров деревьев на основе технологий искусственного интеллекта // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2024. № 249. С. 177–194. DOI 10.21266/2079-4304.2024.249.177-194
- [6] Устинов С.М., Митрофанов Е.М., Устинов М.В. Исследование возможности использования наземного мобильного лазерного сканера для определения высот и диаметров деревьев в сосновых насаждениях // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии имени В.Р. Филиппова, 2023. № 1(70). С. 134–140. DOI: 10.34655/bgsha.2023.70.1.016.
- [7] Bazezew M.N., Hussin Y.A., Kloosterman E.H. Integrating airborne LiDAR and terrestrial laser scanner forest parameters for accurate above-ground biomass/carbon estimation in Ayer Hitam tropical forest, Malaysia // International J. of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, no.73(5), pp. 638–652. DOI: 73. 638-652. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.07.026>
- [8] Newnham G.J., Armston J.D., Calders K., Disney M.I., Lovell J.L., Schaaf C.B., Strahler A.H. Terrestrial Laser Scanning for Plot-Scale Forest Measurement // Current Forestry Reports, 2015, no. 1 (4), pp. 239–251. <https://doi.org/10.1007/s40725-015-0025-5>
- [9] Liang X., Kankare V., Hyypä J., Wang Y., Kukko A., Haggrén H., Yu X., Kaartinen H., Jaakkola A., Guan F.,

- Holopainen M. Vastaranta Terrestrial laser scanning in forest inventories // ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, no. 115, pp. 63–77.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.006>
- [10] Pace R., Masini E., Giuliani D., Biagiola L., Tomao A., Guidolotti G., Agrimi M., Portoghesi L., Angelis P. D., Calfapietra C. Tree measurements in the urban environment: insights from traditional and digital field instruments to smartphone applications // *Arboric. Urban For.*, 2022, no. 48, pp. 113–123.
DOI: <https://doi.org/10.48044/jauf.2022.009>
- [11] Panagiotidis D., Abdollahnejad A., Slavik M. 3D point cloud fusion from UAV and TLS to assess temperate managed forest structures // *International J. of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, no. 112 (7), article 102917.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102917>
- [12] Лебедев А.В. Инвентаризация древесных насаждений урбанизированных территорий с использованием смартфона // *Лесотехнический журнал*, 2023. Т. 13. № 3(51). С. 56–70.
DOI 10.34220/issn.2222-7962/2023.3/5
- [13] Costantino D., Voza G., Pepe M., Alfio V.S. Smartphone LiDAR Technologies for Surveying and Reality Modelling in Urban Scenarios: Evaluation Methods, Performance and Challenges // *Applied System Innovation*, 2022, no. 5, p. 63.
DOI: <https://doi.org/10.3390/asi5040063>
- [14] Tatsumi S., Yamaguchi K., Furuya N. ForestScanner: A mobile application for measuring and mapping trees with LiDAR-equipped iPhone and iPad // *Methods Ecol. Evol.*, 2022, no. 14, pp. 1603–1609.
<https://doi.org/10.1111/2041-210X.13900>
- [15] Sandim A. New Technologies for Expedited Forest Inventory Using Smartphone Applications // *Forests*, 2023, no. 14(8), p. 1553.
<https://doi.org/10.3390/f14081553>
- [16] Ucar Z., Eker R., Bilici E., Akay A. Evaluating the Use of Smartphone Applications for Log Stacks Volume Measurement in Turkish Forestry Practices // *Croatian J. of Forest Engineering*, 2024, no. 45 (2), pp. 263–276.
<https://doi.org/10.5552/crojfe.2024.2398>
- [17] Noah A Howie A., De Stefano A. Measuring Tree Diameter Using LiDAR Equipped iPad: An Evaluation of Forest Scanner and Arboreal Forest Applications // *Forest Science*, 2024, v. 70, iss. 4, pp. 304–310.
<https://doi.org/10.1093/forsci/fxae017>
- [18] Рыжова Н.В., Шутов В.В., Коренев И.А., Малышев В.А., Лебедев О.Ю. Морфология шишек и продуктивность ели в Костромской области // *Лесоведение*, 2003. № 5. С. 61–64.
- [19] Лебедев А.В., Гемонов А.В., Селиверстов А.М. Фенотипическая структура и разнообразие популяций ели заповедника «Кологривский лес» // *Природообустройство*, 2022. № 1. С. 109–116.
DOI: 10.26897/1997-6011-2022-1-109-116
- [20] Дубенок Н.Н., Лебедев А.В., Чистяков С.А. Ход роста древостоев в еловых типах леса заповедника «Кологривский лес» // *Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии имени В.П. Филиппова*, 2023. № 1(70). С. 81–90.
DOI: 10.34655/bgsha.2023.70.1.011
- [21] Borz S. A., Toaza J.M., Proto A.R. Accuracy of two LiDAR-based augmented reality apps in breast height diameter measurement // *Ecological Informatics*, 2024, v. 81, p. 102550.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102550>
- [22] Дубенок Н.Н., Лебедев А.В., Гостев В.В. Модель образующей древесного ствола сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающей в Костромской области // *Лесотехнический журнал*, 2023. Т. 13. № 4.1(52). С. 5–22.
DOI 10.34220/issn.2222-7962/2023.4/3.
- [23] Дубенок Н.Н., Лебедев А.В., Гостев В.В. Образующая, форма и объем стволов деревьев ели Костромской области // *Хвойные бореальной зоны*, 2024. Т. 42. № 4. С. 23–32.
DOI 10.53374/1993-0135-2024-4-23-32
- [24] Ogana F.N., Itam E.S., Osho J.S.A. Modeling diameter distributions of *Gmelina arborea* plantation in Omo Forest Reserve, Nigeria with Johnson's SB // *J. of Sustainable Forestry*, 2017, no. 2 (36), pp. 121–133.
<https://doi.org/10.1080/10549811.2016.1263575>
- [25] Pogoda P. Ochał W., Orzeł S. Modeling Diameter Distribution of Black Alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) Stands in Poland // *Forests*, 2019, no. 10, id 412.
<https://doi.org/10.3390/f10050412>
- [26] Ahamed A., Foye J., Poudel S., Trieschman E.J. Fike Measuring Tree Diameter with Photogrammetry Using Mobile Phone Cameras // *Forests*, 2023, no. 14, p. 2027. <https://doi.org/10.3390/f14102027>
- [27] Figorilli S., Tocci F., Vasta S., Sperandio G., Violino S., Gallo P., Ripa C., Costa C., Colle G., Saba E. P., Ortenzi L. Precision forestry: an open-source IoT digital caliper and app to simplify tree diameter measurements // *J. of Forestry Research*, 2024, no. 35, pp. 1–12.
<https://doi.org/10.1007/s11676-024-01784-w>
- [28] Holcomb A., Tong L., Keshav S. Robust Single-Image Tree Diameter Estimation with Mobile Phones // *Remote Sens*, 2023, no. 15, p. 772.
<https://doi.org/10.3390/rs15030772>
- [29] Henning J.G., Radtke P.J. Detailed stem measurements of standing trees from ground-based scanning lidar // *Forest Science*, 2006, no. 52 (1), pp. 67–80.
- [30] Liu G., Wang J., Dong P., Chen Y., Liu Z. Estimating individual tree height and diameter at breast height (DBH) from terrestrial laser scanning (TLS) data at plot level // *Forests*, 2018, no. 9 (7), article 398.
<https://doi.org/10.3390/f907039>
- [31] Шайтура С.В., Шайтура Н.С., Митрофанов Е.М., Мухин А.С., Устинов С.М. Применение наземных лазерных сканеров для мониторинга леса // *Природообустройство*, 2024. № 3. С. 124–132.
DOI: <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-124-132>
- [32] Liu C., Xing Y., Duanmu J., Tian X. Evaluating Different Methods for Estimating Diameter at Breast Height from Terrestrial Laser Scanning // *Remote Sens.*, 2018, no. 10, p. 513. <https://doi.org/10.3390/rs10040513>
- [33] Srinivasan S., Popescu S.C., Eriksson M., Sheridan R.D., Ku N.W. Terrestrial Laser Scanning as an Effective Tool to Retrieve Tree Level Height, Crown Width, and Stem Diameter // *Remote Sens*, 2015, no. 7, pp. 1877–1896. <https://doi.org/10.3390/rs70201877>
- [34] Tarsha Kurdi F., Gharineiat Z., Lewandowicz E., Shan J. Modeling the Geometry of Tree Trunks Using LiDAR Data // *Forests*, 2024, no. 15, p. 368.
<https://doi.org/10.3390/f15020368>

Сведения об авторах

Дубенок Николай Николаевич — д-р с.-х. наук, профессор, академик РАН, зав. кафедрой сельскохозяйственных мелиораций, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева» (РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева), ndubenok@mail.ru

Лебедев Александр Вячеславович — д-р с.-х. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева» (РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева), alebedev@rgau-msha.ru

Гостев Владимир Викторович — ассистент кафедры землеустройства и лесоводства, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева» (РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева), v gostev@rgau-msha.ru

Поступила в редакцию 06.05.2025.

Одобрено после рецензирования 28.11.2025.

Принята к публикации 18.02.2026.

ARBOREAL FOREST MOBILE APPLICATION FOR SPRUCE STANDS INVENTORY

N.N. Dubenok, A.V. Lebedev, V.V. Gostev

Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 49, Timiryazevskaya st., 127550, Moscow, Russia

v.gostev@rgau-msha.ru

In recent years, international forestry practices have seen widespread adoption of smartphone applications and modern sensor-based methods for forest stand inventory. The aim of this study is to evaluate the accuracy of inventory indicators for spruce stands obtained using a smartphone equipped with a LiDAR sensor, demonstrated through the Arboreal Forest application. The research focuses on pure spruce stands in Kostroma Region, analyzed across four temporary sample plots. Tree measurements were conducted using traditional methods (calipers) and the Arboreal Forest app. Data analysis employed graphical methods and quality metric calculations. The results indicate strong agreement between diameter and basal area values obtained via Arboreal Forest and caliper measurements. Consistency in diameter class distributions, determined using calipers and the Arboreal Forest app, was confirmed by the Kolmogorov-Smirnov test ($p = 0,05$) across all sample plots. The deviation of the mean diameter calculated using Arboreal Forest from caliper-based measurements did not exceed $\pm 3,1$ %, while deviations for basal area and stand volume remained within ± 6 %. These margins align with the accuracy requirements of visual-measurement inventory methods.

Keywords: smartphone, iPhone LiDAR, Arboreal Forest, inventory indicators, spruce stands, Kostroma Region

Suggested citation: Dubenok N.N., Lebedev A.V., Gostev V.V. *Ispol'zovanie mobil'nogo prilozheniya Arboreal Forest dlya taksatsii elovykh drevostoev* [Arboreal Forest mobile application for spruce stands inventory]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2026, vol. 30, no. 2, pp. 18–30. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-2-18-30

References

- [1] Petrovskaya A.A., Mokhov S.P. *Opreделение razmerno-kachestvennykh pokazateley drevesostoya s primeneniem dronov i metodov nazemnogo lazernogo skanirvaniya* [Determination of dimensional and qualitative indicators of forest stand using drones and terrestrial laser scanning methods]. *Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe khozyaystvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyаемыkh resursov* [Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, Environmental Management and Processing of Renewable Resources], 2024, no. 1 (276), pp. 120–124. DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-16
- [2] Krutov T.Yu., Terekhov V.I., Yakubov A.R. *Podkhody k razrabotke metoda avtomatizirovannoy poderevnoy tsifrovoy taksatsii lokal'nogo uchastka lesa s primeneniem vozdushnykh i nazemnykh lidarov* [Approaches to development of the method of automated digital valuation of the forest local area single trees with air-based and land-based LiDARs application]. *Iskusstvennyy intellekt v avtomatizirovannykh sistemakh upravleniya i obrabotki dannykh: sb. statey*

- Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii [Artificial Intelligence in Automated Control Systems and Data Processing: Proceedings of the All-Russian Scientific Conference], in 2 vol., Moscow, April 27–28, 2022, vol. 1. Moscow: Bauman Moscow State Technical University (National Research University), 2022, pp. 68–72.
- [3] Kedrov A.V., Malta M. *Lesoustroystvo s ispol'zovaniem tekhnologiy LiDAR* [Forest inventory with using technology LiDAR]. Geoinformatsionnoe obespechenie prostranstvennogo razvitiya Permskogo kraia: Sbornik nauchnykh trudov. Vypusk 8 [Geoinformation Support for Spatial Development of Perm Krai: Collection of Scientific Papers. Volume Issue 8]. Perm: Perm State National Research University, 2015, pp. 34–40.
- [4] Kovyazin V.F., Pas'ko O.A., Lepikhina O.Yu., Trushnikov V.E. *Otsenka tochnosti inventarizatsii lesnykh zemel' s primeneniem vozdushnogo lazernogo skanirovaniya* [Accuracy assessment of forest land inventory using airborne laser scanning]. Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography], 2022, v. 83, no. 6, pp. 54–63. DOI: 10.22389/0016-7126-2022-984-6-54-63
- [5] Govyadin I.K., Chubinskiy A.N., Alekseev A.S. *Metod izmereniya diametrov derev'ev na osnove tekhnologiy iskusstvennogo intellekta* [Method for measuring tree diameters based on artificial intelligence technologies]. Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii [Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Academy], 2024, no. 249, pp. 177–194. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.177-194
- [6] Ustinov S.M., Mitrofanov E.M., Ustinov M.V. *Issledovanie vozmozhnosti ispol'zovaniya nazemnogo mobil'nogo lazernogo skanera dlya opredeleniya vysot i diametrov derev'ev v sosnovykh nasazhdeniyakh* [Study on the possibility of using a terrestrial mobile laser scanner for determining tree heights and diameters in pine stands]. Vestnik Buryatskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii im. V.R. Filippova [Bulletin of the Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov], 2023, no. 1(70), pp. 134–140. DOI: 10.34655/bgsha.2023.70.1.016
- [7] Bazezew M.N., Hussin Y.A., Kloosterman E.H. Integrating airborne LiDAR and terrestrial laser scanner forest parameters for accurate above-ground biomass/carbon estimation in Ayer Hitam tropical forest, Malaysia. *International J. of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, no. 73(5), pp. 638–652. DOI: 73. 638-652. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.07.026>
- [8] Newnham G.J., Armston J.D., Calders K., Disney M.I., Lovell J.L., Schaaf C.B., Strahler A.H. Terrestrial Laser Scanning for Plot-Scale Forest Measurement. *Current Forestry Reports*, 2015, no. 1 (4), pp. 239–251. <https://doi.org/10.1007/s40725-015-0025-5>
- [9] Liang X., Kankare V., Hyypä J., Wang Y., Kukko A., Haggrèn H., Yu X., Kaartinen H., Jaakkola A., Guan F., Holopainen M., 2016. Vastaranta Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, no. 115, pp. 63–77. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.006>
- [10] Pace R., Masini E., Giulirelli D., Biagiola L., Tomao A., Guidolotti G., Agrimi M., Portoghesi L., Angelis P. D., Calfapietra C. Tree measurements in the urban environment: insights from traditional and digital field instruments to smartphone applications. *Arboric. Urban For.*, 2022, no. 48, pp. 113–123. DOI: <https://doi.org/10.48044/jauf.2022.009>
- [11] Panagiotidis D., Abdollahnejad A., Slavik M. 3D point cloud fusion from UAV and TLS to assess temperate managed forest structures. *International J. of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, no. 112 (7), article 102917. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102917>
- [12] Lebedev A.V. *Inventarizatsiya drevesnykh nasazhdeniy urbanizirovannykh territoriy s ispol'zovaniem smartfona* [Inventory of tree plantings in urbanized areas using a smartphone]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Journal], 2023, v. 13, no. 3(51), pp. 56–70. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.3/5
- [13] Costantino D., Voza G., Pepe M., Alfio V.S. Smartphone LiDAR Technologies for Surveying and Reality Modelling in Urban Scenarios: Evaluation Methods, Performance and Challenges. *Applied System Innovation*, 2022, no. 5, p. 63. DOI: <https://doi.org/10.3390/asi5040063>
- [14] Tatsumi S., Yamaguchi K., Furuya N. ForestScanner: A mobile application for measuring and mapping trees with LiDAR equipped iPhone and iPad. *Methods Ecol. Evol.*, 2022, no. 14, pp. 1603–1609. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13900>
- [15] Sandim A. New Technologies for Expedited Forest Inventory Using Smartphone Applications. *Forests*, 2023, no. 14(8), p. 1553. <https://doi.org/10.3390/f14081553>
- [16] Ucar Z., Eker R., Bilici E., Akay A. Evaluating the Use of Smartphone Applications for Log Stacks Volume Measurement in Turkish Forestry Practices. *Croatian J. of Forest Engineering*, 2024, no. 45 (2). pp. 263–276. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2024.2398>
- [17] Noah A Howie A., De Stefano A. Measuring Tree Diameter Using LiDAR Equipped iPad: An Evaluation of Forest Scanner and Arboreal Forest Applications. *Forest Science*, 2024, v. 70, iss. 4, pp. 304–310. <https://doi.org/10.1093/forsci/fxae017>
- [18] Ryzhova N.V., Shutov V.V., Korenev I.A., Malyshev V.A., Lebedev O.Yu. *Morfologiya shishek i produktivnost' eli v Kostromskoy oblasti* [Cone morphology and productivity of spruce in the Kostroma region]. *Lesovedenie* [Forest Science], 2003, no. 5, pp. 61–64.
- [19] Lebedev A.V., Gemonov A.V., Seliverstov A.M. *Fenotipicheskaya struktura i raznoobrazie populyatsiy eli zapovednika «Kologrivskiy les»* [Phenotypic structure and diversity of spruce populations in the «Kologrivsky Les» Nature Reserve]. *Prirodoustroystvo* [Environmental Engineering], 2022, no. 1, pp. 109–116. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-1-109-116
- [20] Dubenok N.N., Lebedev A.V., Chistyakov S.A. *Khod rosta drevostoyev v yelovykh tipakh lesa zapovednika «Kologrivskiy les»* [Growth Dynamics of Forest Stands in Spruce Forest Types of the «Kologrivsky Forest» Nature Reserve]. *Vestnik Buryatskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii im. V.R. Filippova* [Bulletin of the Buryat State Agricultural Academy Named After V.R. Filippov], 2023, no. 1(70), pp. 81–90. <https://doi.org/10.34655/bgsha.2023.70.1.011>

- [21] Borz S. A., Toaza J.M., Proto A.R. Accuracy of two LiDAR-based augmented reality apps in breast height diameter measurement. *Ecological Informatics*, 2024, v. 81, p. 102550. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102550>
- [22] Dubenok N.N., Lebedev A.V., Gostev V.V. *Model' obrazuyushchey drevesnogo stvola sosny obyknovennoy (Pinus sylvestris L.), proizrastayushchey v Kostromskoy oblasti* [Generatrix model of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) tree trunk growing in the Kostroma region]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Journal], 2023, v. 13, no. 4.1(52), pp. 5–22. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.4/3
- [23] Dubenok N.N., Lebedev A.V., Gostev V.V. *Obrazuyushchaya, forma i ob'em stvolov derev'ev eli Kostromskoy oblasti* [Generatrix, shape and volume of tree trunks of spruce in the Kostroma region]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the Boreal Zone], 2024, v. 42, no. 4, pp. 23–32. DOI: 10.53374/1993-0135-2024-4-23-32
- [24] Ogana F.N., Itam E.S., Osho J.S.A. Modeling diameter distributions of Gmelina arborea plantation in Omo Forest Reserve, Nigeria with Johnson's SB. *J. of Sustainable Forestry*, 2017, no. 2 (36), pp. 121–133. <https://doi.org/10.1080/10549811.2016.1263575>
- [25] Pogoda P. Ochał W., Orzeł S. Modeling Diameter Distribution of Black Alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) Stands in Poland. *Forests*, 2019, no. 10, id 412. <https://doi.org/10.3390/f10050412>
- [26] Ahamed A., Foye J., Poudel S., Trieschman E.J. Fike Measuring Tree Diameter with Photogrammetry Using Mobile Phone Cameras. *Forests*, 2023, no. 14, p. 2027. <https://doi.org/10.3390/f14102027>
- [27] Figorilli S., Tocci F., Vasta S., Sperandio G., Violino S., Gallo P., Ripa C., Costa C., Colle G., Saba E. P., Ortenzi L. Precision forestry: an open-source IoT digital caliper and app to simplify tree diameter measurements. *J. of Forestry Research*, 2024, no. 35, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1007/s11676-024-01784-w>
- [28] Holcomb A., Tong L., Keshav S. Robust Single-Image Tree Diameter Estimation with Mobile Phones. *Remote Sens*, 2023, no. 15, p. 772. <https://doi.org/10.3390/rs15030772>
- [29] Henning J.G., Radtke P.J. Detailed stem measurements of standing trees from ground-based scanning lidar. *Forest Science*, 2006, no. 52 (1), pp. 67–80.
- [30] Liu G., Wang J., Dong P., Chen Y., Liu Z. Estimating individual tree height and diameter at breast height (DBH) from terrestrial laser scanning (TLS) data at plot level. *Forests*, 2018, no. 9 (7), article 398. <https://doi.org/10.3390/f907039>
- [31] Shaytura S.V., Shaytura N.S., Mitrofanov E.M., Mukhin A.S., Ustinov S.M. *Primenenie nazemnykh lazernykh skanerov dlya monitoringa lesa* [Application of terrestrial laser scanners for forest monitoring]. *Prirodoustroystvo* [Prirodoustroystvo], 2024, no. 3, pp. 124–132. DOI: 10.26897/1997-6011-2024-4-124-132
- [32] Liu C., Xing Y., Duanmu J., Tian X. Evaluating Different Methods for Estimating Diameter at Breast Height from Terrestrial Laser Scanning. *Remote Sens.*, 2018, no. 10, p. 513. <https://doi.org/10.3390/rs10040513>
- [33] Srinivasan S., Popescu S.C., Eriksson M., Sheridan R.D., Ku N.W. Terrestrial Laser Scanning as an Effective Tool to Retrieve Tree Level Height, Crown Width, and Stem Diameter. *Remote Sens*, 2015, no. 7, pp. 1877–1896. <https://doi.org/10.3390/rs70201877>
- [34] Tarsha Kurdi F., Gharineiat Z., Lewandowicz E., Shan J. Modeling the Geometry of Tree Trunks Using LiDAR Data. *Forests*, 2024, no. 15, p. 368. <https://doi.org/10.3390/f15020368>

This research was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project no. 23-76-01016), <https://rscf.ru/project/23-76-01016/>

Authors' information

Dubenok Nikolay Nikolaevich — Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Academician of RAS, Head of the Department of Agricultural Reclamation of the Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy, ndubenok@mail.ru

Lebedev Aleksandr Viacheslavovich — Dr. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy, alebedev@rgau-msha.ru

Gostev Vladimir Viktorovich — Assistant of the Department of Land Organization and Forestry of the Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy, vgostev@rgau-msha.ru

Received 06.05.2025.

Approved after review 28.11.2025.

Accepted for publication 18.02.2026.

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

ОБНАРУЖЕНИЕ ОЧАГОВ УССУРИЙСКОГО ПОЛИГРАФА С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОСЕТЕВОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЕРЕВЬЕВ ПИХТЫ

Н.Г. Марков, К.Р. Мачука✉

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ), Россия, 634050, г. Томск, пр-кт Ленина, д. 30

kristianrodrigo1@tpu.ru

Рассмотрены основные задачи дистанционного лесопатологического мониторинга пораженных насекомыми-вредителями хвойных лесов. Показана важность для их оперативного решения использования результатов мультиклассификации хвойных деревьев на изображениях высокого разрешения, получаемых при мониторинге путем аэрофотосъемки лесов космическими или беспилотными летательными аппаратами. Предложена методика оперативного выявления очагов размножения уссурийского полиграфа, которая предусматривает мультиклассификацию с помощью модели нейронной сети Res-Мо-U-Net пораженных деревьев на изображениях, выявление возраста деревьев по результатам оценки площади их крон на полученных при мультиклассификации масках сегментации и принятие решения о наличии очага размножения уссурийского полиграфа на исследуемом участке пихтового леса по результатам расчетов фактического отпада деревьев. Выполнен нейросетевой анализ изображения пораженного уссурийским полиграфом участка пихтового леса в Томской области в целях апробации предложенной методики. Результаты апробации указывают на перспективность методики для практического применения.

Ключевые слова: лесопатологический мониторинг хвойных лесов, дистанционное зондирование Земли, очаг размножения уссурийского полиграфа, сверточная нейронная сеть

Ссылка для цитирования: Марков Н.Г., Мачука К.Р. Обнаружение очагов уссурийского полиграфа с помощью нейросетевого анализа изображений деревьев пихты // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2026. Т. 30. № 2. С. 31–42. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-2-31-42

Распространение уссурийского полиграфа *Polygraphus proximus* в пихтовых лесах России приобрело характер экологической катастрофы [1, 2]. Действительно, многочисленные очаги его массового размножения различной интенсивности обнаружены начиная с 2007 г. во многих регионах России [3–5]. Другим примером агрессии лесного вредителя стал обнаруженный в 2019 г. в кедровниках нескольких регионов Сибири союзный короед *Ips amitinus* [6–8]. В связи с этим, ученые и специалисты считают, что в первую очередь необходимо организовать оперативный лесопатологический мониторинг хвойных лесов [5, 7, 9, 10]. Исходя из высокой динамичности популяций стволовых вредителей назрела необходимость решения таких основных задач лесопатологического мониторинга, как оперативное выявление очагов размножения вредителей в хвойных лесах на ранних стадиях и отслеживание степени поражения вредителем деревьев в таких очагах [11–13].

Еще одной важной практической задачей мониторинга хвойных лесов считают выявление среди них сухостойных деревьев [14].

Существующие методы мониторинга хвойных лесов, основанные преимущественно на наземных обследованиях, имеют серьезные ограничения. Прежде всего это значительные временные и трудовые затраты, обуславливающие выявление очагов размножения вредителей только на поздних стадиях поражения деревьев, когда значительная часть древостоя уже не подлежит восстановлению [15, 16]. Некоторые исследователи показали, что решать проблему оперативного мониторинга лесов можно с помощью высокоточной аэрофотосъемки деревьев космическими аппаратами или беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) и оперативного проведения дешифрирования полученных изображений [7, 10, 15, 17–22].

Анализ (интерпретация) полученных при лесопатологическом мониторинге изображений проводится в целях решения каждой из перечисленных выше задач полуручным способом или автоматически с помощью специальных

методов и алгоритмов. При более перспективной автоматической классификации изображений решается задача мультиклассификации, когда по ряду признаков на изображении крон деревьев каждое дерево относят к одному из нескольких классов. Например, в случае поражения деревьев пихты уссурийским полиграфом следует распознать пять классов: четыре класса состояния здоровья деревьев (разной степени поражения вредителем) и фон (деревья других пород и иные объекты земной поверхности). Можно видеть, что при решении поставленных выше задач, используются результаты мультиклассификации изображений деревьев.

В сложившейся ситуации актуальность приобрели разработка и внедрение современных автоматизированных систем раннего обнаружения очагов вредителей, основанных на передовых методах и технологиях дистанционного зондирования Земли и на современных нейросетевых методах анализа результатов такого зондирования [23–25]. Эти методы, системы и технологии позволяют оперативно выявлять очаги размножения вредителей в хвойных лесах, что существенно повышает эффективность комплекса лесозащитных мероприятий.

Цель работы

Цель работы — представление методики оперативного выявления очагов размножения уссурийского полиграфа в пихтовых лесах на основе нейросетевого анализа изображений высокого разрешения, полученных при лесопатологическом мониторинге хвойных лесов дистанционными методами.

Объект и методы исследования

Объектом изучения послужил процесс оперативного обнаружения очагов размножения уссурийского полиграфа в пихтовых лесах по данным дистанционного лесопатологического мониторинга. Известно, что главная задача оперативного лесопатологического мониторинга лесов заключается в обнаружении очага насекомых-вредителей в начальной фазе его развития [26, 27]. Это позволит провести соответствующие санитарно-оздоровительные мероприятия с минимальными потерями деревьев.

Рассмотрим основные подходы, применяемые в настоящее время. Сегодня принятие решения специалистами лесного хозяйства о наличии очага стволовых вредителей в хвойных лесах основывается на результатах наземного мониторинга древостоя и осуществляется в соответствии с интерпретацией этих результа-

тов по известным отраслевым правилам, изложенным в методических рекомендациях [28]. Согласно этим правилам, действующим очагом стволовых вредителей считается участок хвойного леса площадью 10 000 м² (1 га), в котором количество заселенных (первый вариант) или свежеотработанных (второй вариант) вредителями хвойных деревьев (суммарный отпад деревьев в каждом из этих вариантов) превышает норму естественного отпада, причем эти деревья относятся к основному положу древостоя (I–III классов Крафта). Правила учитывают деление хвойных деревьев по возрасту на три категории: молодые деревья (первая категория), средневозрастные деревья (вторая категория) и приспевающие, спелые и перестойные деревья (третья категория). В соответствии с этими правилами участок леса в возрасте молодняка относится к очагу, если в нем заселено вредителем не менее 5...7 % всех деревьев породы на 1 га, в средневозрастных участках — не менее 3...5 % деревьев, участок леса третьей категории относится к очагу, если заселено не менее 2...3 % всех деревьев породы данного возраста.

Иными словами, для каждого возраста деревьев есть свой порог отпада, превышение которого позволяет принять решение о наличии очага размножения стволового вредителя, поэтому правил для принятия решения три. Первое из них гласит, что в случае молодых деревьев принимается решение о наличии очага, если число пораженных деревьев, отнесенное к общему числу деревьев молодого возраста этой породы, превышает порог отпада 5 % (взяли для определенности меньшее значение из интервала 5...7 %). Аналогичное правило принятия решения формулируется для средневозрастных деревьев (вторая категория по возрасту), для которых очаг имеет место, если превышен порог отпада 3 % (взяли для определенности меньшее значение из интервала 3...5 %). Наконец, правило принятия решения для деревьев третьей категории возраста следующее: очаг существует, если превышен порог отпада 2 % (взяли для определенности меньшее значение из интервала 2...3 %). Отметим, эти правила действуют как в случае заселенных, так и свежеотработанных вредителями хвойных деревьев. Это означает, что при мониторинге участка площадью 1 га можно по первому правилу выявлять заселенные вредителем хвойные деревья, рассчитывать фактический процент отпада их для каждой категории по возрасту и, сравнивая его с порогом для соответствующей возрастной категории, принимать решение о наличии очага либо эти процедуры можно выполнять по второму пра-

вилу, когда при мониторинге участка выявляются свежеработанные вредителями хвойные деревья.

При проведении оперативного мониторинга поврежденных уссурийским полиграфом деревьев пихты в Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (ИМКЭС СО РАН) разработана оценочная шкала их жизненного состояния (степени поражения вредителем) [4]. На основе этой шкалы при интерпретации изображений пораженных деревьев пихты выделяются четыре класса состояния здоровья (степени поражения вредителем) этих деревьев: «Здоровое», «Отмирающее», «Свежий сухостой» и «Старый сухостой». Пятый класс на изображениях — фон.

Учитывая это и опираясь на изложенные выше правила, нами разработана методика оперативного выявления очагов уссурийского полиграфа в пихтовых лесах путем нейросетевого анализа изображений пораженных им деревьев пихты. Она отличается от известных методик и алгоритмов обнаружения таких очагов отсутствием необходимости наземного мониторинга состояния здоровья деревьев пихты. Все процессы в рамках этой методики реализуются в три последовательно выполняемых ключевых этапа.

Первый из них — этап мультиклассификации пораженных полиграфом деревьев пихты на изображении высокого разрешения участка пихтового леса площадью 10 000 м² (1 га). Этап должен выполняться автоматически с помощью наиболее эффективной по точности классификации модели сверточной нейронной сети (СНС) [29]. Для оценки эффективности (качества) используемой для мультиклассификации модели СНС, иными словами, для оценки точности классификации деревьев на изображениях с помощью таких моделей, используется метрика Intersection over Union (*IoU*). Метрика *IoU_c* для каждого класса *c* деревьев может быть вычислена по формуле [30, 31]

$$IoU_c = \frac{TP_c}{TP_c + FP_c + FN_c}, \quad (1)$$

где TP_c , FP_c и FN_c — количество, соответственно, истинно-положительных, ложно-положительных и ложно-отрицательных решений для деревьев класса *c*.

Наряду с формулой (1) для вычисления метрики mean Intersection over Union (*mIoU*) применяется также формула

$$mIoU = \frac{1}{C} \sum_{c=1}^C IoU_c. \quad (2)$$

Эта метрика рассчитывается как среднее значение метрики *IoU_c* по всем *C*-классам.

Значения метрик *IoU_c* и *mIoU*, превышающие 0,5, соответствуют высокой точности классификации деревьев на изображениях и указывают на то, что модели СНС, обеспечивающие такую точность классификации, можно применять в лесной отрасли.

В работе [32] показано, что перспективными среди моделей СНС для попиксельной классификации деревьев на изображениях являются модели полносверточных нейронных сетей. Исследованиями, изложенными в работе [33], выявлено, что в отличие от классической модели полносверточной сети U-Net [34] для всех классов состояния пораженных хвойных деревьев пихты сибирской и сосны сибирской кедровой предложенные полносверточные модели Mo-U-Net и Res-Mo-U-Net показывают точность классификации по метрикам *IoU_c* и *mIoU* выше порогового значения 0,5. Гибридная модель Res-Mo-U-Net основана на модели Mo-U-Net, однако имеет некоторые изменения архитектуры, в том числе вместо части сверточных слоев в энкодер и декодер включены остаточные блоки [35]. Это повысило, как показали исследования [32, 33], точность классификации пораженных хвойных деревьев с помощью модели Res-Mo-U-Net, поэтому ее можно рекомендовать к применению на этапе мультиклассификации в предлагаемой методике.

На втором этапе сначала происходит вычисление по полученной при мультиклассификации изображения маске сегментации площади кроны каждого дерева пихты. Для точного расчета площади кроны при частичном перекрытии крон недостающая часть контура кроны перекрытого дерева пихты достраивается с помощью сплайн-интерполяции. Затем выполняется отнесение каждого дерева в зависимости от площади его кроны к одной из трех возрастных категорий: молодые деревья, средневозрастные и приспевающие/спелые/перестойные деревья. Для учета категории их возраста используются предварительно установленные для каждого региона (биотопа) интервалы площади кроны пихты по категориям, с которыми сравнивается площадь кроны каждого дерева.

На третьем этапе методики по результатам выполнения первого и второго этапов принимается решение о наличии очага уссурийского полиграфа на исследуемом участке пихтового леса. Оно формируется в соответствии с рассмотренными выше порогами отпада для каждой возрастной категории деревьев пихты и правилами обнаружения очагов стволовых вредителей в хвойных лесах [28]. Отметим, что в случае деревьев пихты заселенными по этим правилам являются деревья класса

«Отмирающее», а свежеработанными — деревья класса «Свежий сухостой». Это означает, что в соответствии с предлагаемой методикой можно проводить анализ и принимать решение о наличии очага как в случае заселенных уссурийским полиграфом деревьев класса «Отмирающее», так и в случае свежеработанных им деревьев класса «Свежий сухостой». Иными словами, можно использовать результаты любого из двух вариантов вычислений, проводимых на втором и третьем этапах методики.

Приведем разработанный алгоритм, реализующий второй и третий этапы методики.

Начало

Шаг 1. Выбор исследуемого участка пихты площадью 1 га (10 000 м²) на панораме и ввод его координат.

Шаг 2. Ввод результатов мультиклассификации деревьев пихты исследуемого участка, полученных с помощью модели СНС на панораме (маска сегментации, класс c каждого дерева, M — общее число деревьев пихты на участке); ввод N — значения относительного естественного отпада деревьев пихты, %.

Шаг 3. Ввод интервальных значений площади крон пихты (в пикселях): S_0 — нижняя граница площади крон молодых деревьев (деревьев первой категории по возрасту), S_1 — верхняя граница площади крон молодых деревьев, S_2 — верхняя граница площади крон средневозрастных деревьев (деревьев второй категории по возрасту); если деревья пихты приспевающие, спелые или перестойные (деревья третьей категории по возрасту), то площадь их крон должна быть более S_2 .

Шаг 4. Цикл по i -му дереву пихты исследуемого участка, $i = 1, 2, \dots, M$; $i = 1$.

Шаг 4.1. Вычисление в пикселях площади S_i кроны i -го дерева на маске сегментации; процедура вычисления площади позволяет при перекрытии на изображении части кроны дерева вышележащей кроной древесного полога провести сплайн-интерполяцию недостающей части контура кроны этого дерева и в итоге более точно вычислить площадь перекрытой части кроны

Шаг 4.2. Если S_i больше или равно S_0 , но меньше или равно S_1 , то это дерево первой категории и далее переход на Шаг 5, иначе на Шаг 4.3.

Шаг 4.3. Если S_i больше S_1 , но меньше или равно S_2 , то это дерево второй категории и переход на Шаг 6, иначе на шаг 4.4.

Шаг 4.4. Если S_i больше S_2 , то это дерево третьей категории и переход на Шаг 7, иначе на Шаг 8.

Шаг 5. Формирование списка с номером 1 деревьев первой категории по возрасту и подсчет количества деревьев L_1 в списке. Переход на Шаг 8.

Шаг 6. Формирование списка с номером 2 деревьев второй категории по возрасту и подсчет количества деревьев L_2 в списке. Переход на Шаг 8.

Шаг 7. Формирование списка с номером 3 деревьев третьей категории по возрасту и подсчет количества деревьев L_3 в списке. Переход на Шаг 8.

Шаг 8. $i = i + 1$, если $i \leq M$, то далее на Шаг 4.1, иначе на Шаг 9.

Шаг 9. Цикл по текущему номеру j сформированного списка деревьев соответствующей категории возраста, $j = 1, 2, 3$; $j = 1$ (номер списка деревьев первой категории).

Шаг 9.1. Начало реализации первого варианта — подсчет в j -м списке количества K_{j2} деревьев второго класса состояния здоровья (класс «Отмирающие»); переход на Шаг 9.2.

Шаг 9.2. Начало реализации второго варианта — подсчет в j -м списке количества K_{j3} деревьев третьего класса состояния здоровья (класс «Свежий сухостой»); переход на Шаг 9.3.

Шаг 9.3. Если $[(K_{j2} / L_j) \cdot 100 - N]$ % больше или равно 5 %, то принятие решения о наличии очага вредителей деревьев первой категории и выдача сообщения «Очаг вредителей молодых деревьев по первому варианту»; переход на Шаг 9.4.

Шаг 9.4. Если $[(K_{j3} / L_j) \cdot 100 - N]$ % больше или равно 5 %, то принятие решения о наличии очага вредителей деревьев первой категории и выдача сообщения «Очаг вредителей молодых деревьев по второму варианту»; переход на Шаг 9.5.

Шаг 9.5. $j = j + 1$, если $j \leq 3$, то переход на Шаг 9.6, иначе на Конец.

Шаг 9.6. Начало реализации первого варианта — подсчет в j -м списке количества K_{j2} деревьев второго класса состояния здоровья (класс «Отмирающие»); переход на Шаг 9.7.

Шаг 9.7. Начало реализации второго варианта — подсчет в j -м списке количества K_{j3} деревьев третьего класса состояния здоровья (класс «Свежий сухостой»); переход на Шаг 9.8.

Шаг 9.8. Если $[(K_{j2} / L_j) \cdot 100 - N]$ % больше или равно 3 %, то принятие решения о наличии очага вредителей деревьев второй категории и выдача сообщения «Очаг вредителей средневозрастных деревьев по первому варианту»; переход на Шаг 9.9.

Шаг 9.9. Если $[(K_{j3} / L_j) \cdot 100 - N]$ % больше или равно 3 %, то принятие решения о наличии очага вредителей деревьев второй категории и

выдача сообщения «Очаг вредителей средне-возрастных деревьев по второму варианту»; переход на Шаг 9.10.

Шаг 9.10. $j = j + 1$, если $j \leq 3$, то переход на Шаг 9.11, иначе на Конец.

Шаг 9.11. Начало реализации первого варианта — подсчет в j -м списке количества K_{j2} деревьев второго класса состояния здоровья (класс «Отмирающие»); переход на Шаг 9.12.

Шаг 9.12. Начало реализации второго варианта — подсчет в j -м списке количества K_{j3} деревьев третьего класса состояния здоровья (класс «Свежий сухостой»); переход на Шаг 9.13.

Шаг 9.13. Если $[(K_{j2} / L_j) \cdot 100 - N] \%$ больше или равно 2 %, то принятие решения о наличии очага вредителей деревьев третьей категории и выдача сообщения «Очаг вредителей приспевающих, спелых и перестойных деревьев по первому варианту»; переход на Шаг 9.14.

Шаг 9.14. Если $[(K_{j3} / L_j) \cdot 100 - N] \%$ больше или равно 2 %, то принятие решения о наличии очага вредителей деревьев третьей категории и выдача сообщения «Очаг вредителей приспевающих, спелых и перестойных деревьев по второму варианту»; переход на Конец.

Конец

На выходе алгоритма появляются сообщения — выводы о наличии очага вредителей на исследуемом участке для каждой возрастной категории деревьев. Для повышения достоверности результатов в алгоритме реализованы два варианта вычислений: для класса деревьев «Отмирающее» и класса «Свежий сухостой».

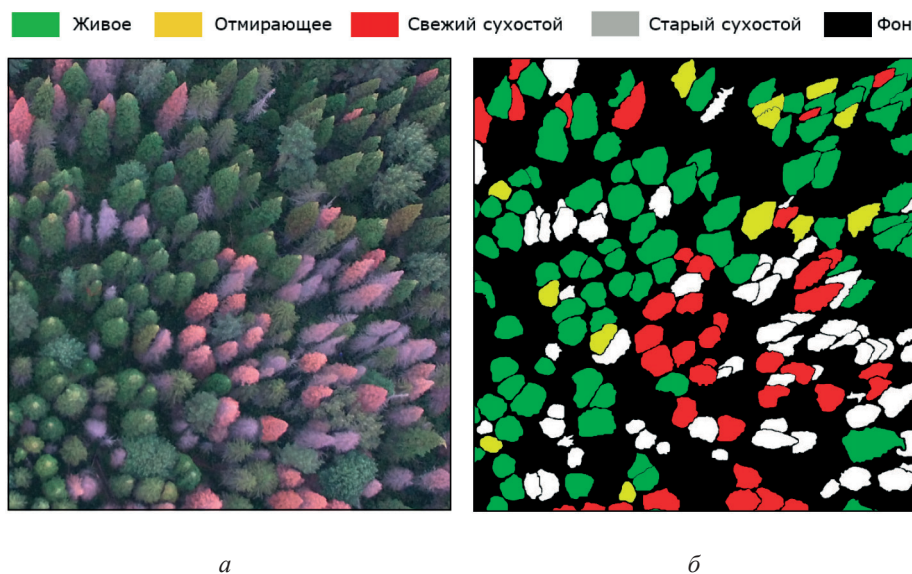
Используемая для мультиклассификации пораженных деревьев пихты на изображениях модель Res-Мо-U-Net и разработанный алгоритм программно-реализованы на языке Python 3 в среде фреймворка PyTorch.

Результаты и обсуждение

Для апробации предложенной методики обнаружения очага размножения уссурийского полиграфа был выбран участок пихтового леса площадью 1 га, на котором имеются деревья пихты, пораженные этим стволовым вредителем. Этот экспериментальный участок входит в состав ранее обследованного лесопатологами большого участка пихтового древостоя, расположенного в Бакчарском районе Томской области (Бакчарское лесничество). Местоположение большого участка: Парбигское участковое лесничество, окрестности поселка Парбиг, квартал 72, выдел 23 ($57^{\circ}16'35,2''$ с. ш. $81^{\circ}30'18,7''$ в. д.). Основные характеристики

деревьев пихты на этом участке, обследованном в августе 2017 г. и детально описанном в работе [15], таковы: состав древостоя 9П1Б+К, средний диаметр ствола ($20,9 \pm 0,8$) см, средняя высота деревьев ($20,1 \pm 1,2$) м, средний возраст ($71,8 \pm 4,0$) лет, полнота 1,0. Как следует из работ [15, 17, 20], в 2016–2017 гг. Бакчарский район Томской области можно было охарактеризовать как действующий фронт инвазии уссурийского полиграфа, поэтому на участке древостоя, включая интересующий нас участок пихтового леса площадью 1 га, наблюдалась активная стадия освоения насаждений пихты этим вредителем. Это показали результаты наземного обследования описанного выше участка, которое проводилось в августе 2017 г. группой специалистов-лесопатологов ИМК-ЭС СО РАН, в том числе И.А. Керчевым, являющимся одним из ведущих специалистов России по этому вредителю. В группу также входили специалисты Центра защиты леса Томской области. Ключевой задачей группы было выявление распространения этого инвазионного вредителя и оценка повреждения им насаждений. При наземном обследовании этого участка леса было установлено, что встречаемость дальневосточного короеда на деревьях пихты довольно высока и составила 87,4 %, в том числе 43,2 % деревьев отработано уссурийским полиграфом единолично, еще 29,5 % совместно с черным пихтовым усачом, а остальные 14,7 % — в комплексе с разными видами усачей и рогахвостами. Еще 10,5 % пихт отработаны без участия уссурийского полиграфа, преимущественно черным пихтовым усачом, а на 2,1 % не было обнаружено признаков деятельности стволовых насекомых. Все это позволило специалистам охарактеризовать данный участок как очаг именно уссурийского полиграфа [15, 17].

Кроме наземного обследования данный участок был дополнительно отснят с помощью фотокамеры, установленной на БПЛА DJI Phantom 3 Standart. Съемка проводилась в видимом диапазоне электромагнитного спектра (RGB) с высоты 365 и 388 м в период с 7 по 28 августа 2017 г. Были получены RGB-изображения высокого разрешения (0,1 м). Визуально на изображениях данный участок пихтового древостоя можно считать очагом стволового вредителя — уссурийского полиграфа, так как в отличие от очага филофага на этих изображениях видны красные кроны (признак сохранения хвои после гибели дерева пихты) [20]. Участки гибели пихтарников и кедрочей в год объедания сибирским шелкопрядом, приводящим к гибели насаждений, на изображениях выглядят серыми



Результаты аэрофотосъемки и мультиклассификации изображения изучаемого участка: *a* — исходное изображение участка; *b* — маска сегментации изображения, полученная с помощью модели Res-Mo-U-Net
 UAV image and multiclass classification of the study area: *a* — study area; *b* — segmentation mask obtained using the Res-Mo-U-Net model

Результаты выявления очага уссурийского полиграфа на экспериментальном участке пихтового леса

Results of the small spruce bark beetle outbreak detection in the study area of fir forest

Показатель	Категория деревьев пихты по возрасту			Всего деревьев
	Первая	Вторая	Третья	
Количество деревьев пихты по классам состояния здоровья:				
живое	18	60	14	92
отмирающее	4	8	1	13
свежий сухой	11	23	5	39
старый сухой	8	45	10	63
Всего деревьев по категориям	41	136	30	—
Отпад деревьев класса «Отмирающее» (K_{22} / L_j) · 100 – <i>N</i> , %	8,8	4,9	2,3	—
Отпад деревьев класса «Свежий сухой» (K_{23} / L_j) · 100 – <i>N</i> , %	25,8	15,9	15,7	—

из-за голых стволов и ветвей в результате полной дефолиации. Эти результаты дистанционного обследования позволяют наряду с результатами наземного обследования характеризовать данный участок как очаг размножения именно уссурийского полиграфа.

Перед проведением этапа мультиклассификации изображения экспериментального участка площадью 1 га (рисунок, *a*) оно было разрезано на фрагменты размером 256×256×3 пикселей, которые затем должны подаваться для анализа на вход выбранной модели СНС.

Этап собственно мультиклассификации (первый этап) описанной выше разработанной методики выполнялся с помощью предварительно обученной модели СНС Res-Mo-U-Net. Она была обучена на выборке, включающей в себя 2004 фрагмента и соответствующие им маски сегментации размером 256×256×3 пикселей, и валидирована на выборке из 672 фрагментов и их масок такого же размера. Исходные RGB-изображения для подготовки этих выборок были получены той же группой обследования при съемке в период

с 7 по 28 августа 2017 г. описанного выше участка пораженных уссурийским полиграфом деревьев пихты в Бакчарском районе Томской области в работе [32]. Там же показано, что результаты валидации модели Res-Mo-U-Net по точности классификации высоки, что позволяет использовать эту обученную модель при апробации методики. В результате мультиклассификации изображения экспериментального участка с помощью модели Res-Mo-U-Net получена маска сегментации (рисунок, б). Отметим, что это изображение экспериментального участка для чистоты исследований не использовалось при получении обучающей и валидационной выборки.

На втором этапе из 209 обнаруженных с помощью модели на маске сегментации и классифицированных по степени поражения уссурийским полиграфом деревьев пихты анализировались кроны 207 деревьев, т. е. $M = 207$ при выполнении разработанного алгоритма, поскольку два дерева не относятся к основному пологу. Затем была рассчитана площадь кроны каждого дерева пихты. Для Томской области ранее выявлены следующие интервалы площади кроны пихты: молодые деревья (56, 1310) пикселей, средневозрастные (1311, 3914) пикселей и приспевающие/спелые/перестойные более 3914 пикселей. При этом для этого региона естественный отпад $N = 1\%$. Это позволило в соответствии с приведенным выше алгоритмом отнести каждое дерево к той или иной категории по возрасту.

На третьем этапе в соответствии с разработанным алгоритмом сделаны расчеты по отпаду деревьев каждой категории возраста и применены соответствующие решающие правила.

В таблице даны итоговые результаты апробации предложенной методики. Приведено количество деревьев пихты на участке 1 га по классам состояния здоровья. Из данных таблицы следует, что получено превышение естественного отпада ($N = 1\%$) по всем трем возрастным категориям и в случае каждого варианта расчетов. Так, при учете деревьев только класса «Отмирающее» (первый вариант расчета) фактический отпад составил 8,8 % (молодые деревья, при пороге 5 %), 4,9 % (средневозрастные деревья, порог 3 %) и 2,3 % (приспевающие, спелые и перестойные деревья, порог 2 %). Каждый из этих результатов подтвердил наличие очага. Результаты вычислений по второму варианту, т. е. в случае деревьев класса «Свежий сухостой», для всех категорий деревьев по возрасту значительно превышают соответствующие значения фактического отпада, вычисленные по первому варианту расчетов. Это

только подтверждает правильность выводов о наличии очага, сделанных по результатам расчетов в случае деревьев класса «Отмирающее». В работах [15, 20] изложены результаты наземного мониторинга деревьев пихты этого же участка, выполненные также в 2017 г., из которых следует, что на участке имеется очаг размножения уссурийского полиграфа. По сути, эти результаты независимых специалистов из ИМКЭС СО РАН и Центра защиты леса Томской области подтвердили сделанные нами выводы о наличии очага.

При апробации методики не были использованы данные наземного мониторинга пихтовых лесов. Однако мы опирались на результаты предыдущих исследований в виде интервалов площадей кроны деревьев пихты, характерных для той или иной возрастной категории деревьев этой породы в Томской области.

Выводы

Разработана методика оперативного выявления очагов размножения уссурийского полиграфа путем нейросетевого анализа изображений пораженных деревьев пихты. Особенностью методики является обязательное выполнение мультиклассификации с помощью современной модели нейронной сети Res-Mo-U-Net пораженных деревьев на изображениях. По результатам оценки площади кроны деревьев на полученных при мультиклассификации масках сегментации изображений выявляется их возраст и после расчетов фактического отпада деревьев с учетом их возраста принимается решение о наличии очага размножения уссурийского полиграфа на исследуемом участке пихтового леса.

В целях апробации предложенной методики выполнен нейросетевой анализ изображения пораженного уссурийским полиграфом участка пихтового леса площадью 1 га в Бакчарском районе Томской области. Сделаны выводы о наличии очага размножения этого вредителя. Выводы подтверждены результатами наземного мониторинга деревьев пихты этого же участка, выполненного также в 2017 г. другими экспертами. Результаты апробации указывают на перспективность методики для практического применения.

Благодарности

Авторы выражают благодарность канд. биол. наук, зав. лабораторией ИМКЭС СО РАН И.А. Керчеву за предоставленные изображения пораженных уссурийским полиграфом деревьев пихты.

Список литературы

- [1] Кривец С.А., Бисирова Э.М., Керчев И.А., Пац Е.Н., Чернова Н.А. Трансформация таежных экосистем в очаге инвазии полиграфа уссурийского *Polygraphus proximus* Blandf. (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) в Западной Сибири // Российский Журнал Биологических Инвазий, 2015. № 1. С. 41–63.
- [2] Дебков Н.М. Природный потенциал возобновления в пихтовых лесах, поврежденных в ходе инвазии уссурийского полиграфа // Лесотехнический журнал, 2017. Т. 7. № 1. С. 58–68.
- [3] Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды 2023». URL: <https://ecostr.ru/novosti/gosdoklad-o-sostoyanii-i-ob-ohrane-okruzhayushhejsredy-2023/> (дата обращения 28.03.2025).
- [4] Bystrov S.O., Antonov I.A. First record of the four-eyed fir bark beetle *Polygraphus proximus* Blandford, 1894 (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) from Irkutsk province, Russia // Entomological Review, 2019, v. 99, pp. 54–55.
- [5] Dedyukhin S.V., Titova V.V. Finding of the bark beetle *polygraphus proximus* Blandford, 1894 (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) in Udmurtia // Russian J. of Biological Invasions, 2021, v. 12, pp. 258–263.
- [6] Kerchev I.A., Mandelshtam M.Y., Krivets S.A., Ilinsky Y.Y. Small spruce bark beetle *Ips amitinus* (Eichhoff, 1872) (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae): a new alien species in West Siberia // Entomological review, 2019, v. 99, pp. 639–644.
- [7] Kerchev I.A., Krivets S.A., Bisirova E.M., Smirnov N.A. Distribution of the small spruce bark beetle *Ips amitinus* (Eichhoff, 1872) in Western Siberia // Russian J. of Biological Invasions, 2022, v. 13, pp. 58–63.
- [8] Smirnov N.A., Kerchev I.A. Experimental rearing of the small spruce bark beetle *Ips amitinus* (Eichhoff, 1872) (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) on aboriginal Siberian coniferous species // Acta Biologica Sibirica, 2024, v. 10, pp. 1699–1710. DOI: 10.5281/zenodo.14468138
- [9] Chang W.Y., Lantz V.A., Hennigar C R., MacLean D.A. Economic impacts of forest pests: a case study of spruce budworm outbreaks and control in New Brunswick, Canada // Canadian J. of Forest Research, 2012, v. 42, pp. 490–505.
- [10] Van Lierop P., Lindquist E., Sathyapala S., Franceschini G. Global Forest area disturbance from fire, insect pests, diseases and severe weather events // Forest Ecology and Management, 2015, v. 352, pp. 78–88.
- [11] Seidl, R., Schelhaas, M.J., Rammer, W., Verkerk, P.J. Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage // Nature Climate Change, 2014, v. 4, pp. 806–810. DOI: 10.1038/nclimate2318
- [12] Алексеев Н.А., Щербаков А.Н. Стволовые вредители крупномерного посадочного материала хвойных пород. URL: https://www.greeninfo.ru/protection_plants/pests_and_diseases.html/Article/_/aID/5095 (дата обращения 28.03.2025).
- [13] Кобзарь В.Ф., Колесова Н.И., Петрик А.А. Уссурийский полиграф *Polygraphus proximus* Blandford, 1894 в пихтарниках экопарка «Озера на Снежной» (Иркутская область) // Фитосанитария. Карантин растений, 2023. Т. 1. С. 59–71. DOI: 10.69536/a4850-3897-3753-x
- [14] Senf C., Pflugmacher D., Zhiqiang Y., Sebold J., Knorn J., Neumann M., Hostert P., Seidl R. Canopy mortality has doubled in Europe’s temperate forests over the last three decades // Nature Communications, 2018, v. 9. DOI: 10.1038/s41467-018-07539-6
- [15] Кривец С.А., Бисирова Э.М., Волкова Е.С., Дебков Н.М., Керчев И.А., Мельник М.А., Никифоров А.Н., Чернова Н.А. Технология мониторинга пихтовых лесов в зоне инвазии уссурийского полиграфа в Сибири. Томск: Изд-во УМИУМ, 2018. 74 с.
- [16] Ярмишко В.Т., Игнатъева О.В., Евдокимов А. Некоторые аспекты мониторинга сосновых лесов в экстремальных условиях Кольского Севера // Самарский научный вестник, 2019. Т. 8. № 2. С. 81–86. DOI: 10.24411/2309-4370-2019-12115
- [17] Musolin D.L., Kirichenko N.I., Karpun N.N., Aksenenko E.V., Golub V.B., Kerchev I.A., Mandelshtam M.Y., Vasaitis R., Volkovitch M.G., Zhuravleva E.N., Selikhovkin A.V. Invasive insect pests of forests and urban trees in Russia: Origin, pathways, damage, and management // Forests, 2022, v. 13, no. 4, pp. 521.
- [18] Chenari A., Erfanifard Y., Dehghani M., Pourghasemi H.R. Woodland mapping at single-tree levels using object-oriented classification of unmanned aerial vehicle (UAV) images // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2017, v. XLII-4/W4, pp. 43–49.
- [19] Safonova A., Tabik S., Alcaraz-Segura D., Rubtsov A., Maglinets Y., Herrera F. Detection of fir trees (*Abies sibirica*) damaged by the bark beetle in unmanned aerial vehicle images with deep learning // Remote Sensing, 2019, v. 11, no. 6, pp. 643.
- [20] Керчев И.А., Маслов К.А., Марков Н.Г., Токарева О.С. Семантическая сегментация поврежденных деревьев пихты на снимках с беспилотных летательных аппаратов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2021. Т. 18. № 1. С. 116–126. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-116-126
- [21] Zhou H., Yuan X., Zhou H., Shen H., Ma L., Sun L., Fang G., Sun H. Surveillance of pine wilt disease by high resolution satellite // J. of Forestry Research, 2022, v. 33, pp. 1401–1408.
- [22] Zhou Y., Liu W., Bi H., Chen R., Zong S., Luo Y. A detection method for individual infected pine trees with pine wilt disease based on deep learning // Forests, 2022, v. 13, no. 11, p. 1880.
- [23] Марков Н.Г., Маслов К.А., Керчев И.А., Токарева О.С., Мачука К.Р., Осипова В.В. Полносверточные нейронные сети для классификации поврежденных деревьев сосны сибирской кедровой на изображениях с БПЛА // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: Материалы IX Международ. науч. конф. Красноярск, 13–16 сентября 2022. Красноярск: Изд-во СФУ, 2022. С. 61–64.
- [24] Мачука К.Р. Модель полносверточной нейронной сети для семантической сегментации деревьев пихты на изображениях с БПЛА // Молодежь и современные информационные технологии: Материалы XXI Международ. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 15–18 апреля 2024 г. Томск: ТПУ, 2024. С. 60–63.

- [25] Мачука К.Р., Марков Н.Г. Модели нейронных сетей для сегментации снимков деревьев пихты, полученных с помощью БПЛА // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: Материалы XI Междунар. науч. конф. Красноярск, 10–13 сентября 2024 г. Красноярск: СФУ, 2024. С. 344–347.
- [26] Li X., Wang A. Forest pest monitoring and early warning using UAV remote sensing and computer vision techniques // *Sci Rep*, 2025, v. 15. DOI: 10.1038/s41598-024-84464-3
- [27] Luo Y., Huang H., Roques A. Early Monitoring of Forest Wood-Boring Pests with Remote Sensing // *Annual review of entomology*, 2023, v. 68, pp. 277–298. DOI: 10.1146/annurev-ento-120220-125410
- [28] Маслов А.Д. Методические рекомендации по надзору, учету и прогнозу массовых размножений стволовых вредителей и санитарного состояния лесов. Пушкино: Изд-во ВНИИ лесоводства и механизации лесного хозяйства, 2006. 68 с.
- [29] Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. Cambridge, MA: MIT Press, 2016.
- [30] Rahman M.A., Wang Y. Optimizing intersection-over-union in deep neural networks for image segmentation // *Advances in Visual Computing*, 2016, v. 10072, pp. 234–244. DOI: 10.1007/978-3-319-50835-1_22
- [31] Bertels J., Eelbode T., Berman M., Vandermeulen D., Maes F., Bisschops R., Blaschko M. Optimizing the dice score and jaccard index for medical image segmentation: theory & practice // *Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention*, 2019, v. 11765. DOI: 10.1007/978-3-030-32245-8_11.
- [32] Марков Н.Г., Мачука К. Модели и методы глубокого обучения для решения задач дистанционного мониторинга лесных ресурсов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 2024. Т. 335. № 6. С. 55–74. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4600
- [33] Kerchev I.A., Markov N.G., Machuca C.R., Tokareva O.S. Classification of pest-damaged coniferous trees in unmanned aerial vehicles images using convolutional neural network models // *Computer Research and Modeling*, 2024, v. 16, no. 5, pp. 1271–1294.
- [34] Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation // *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, 2015, v. 9351. DOI: 10.1007/978-3-319-24574-4_28.
- [35] He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition // *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016, pp. 770–778.

Сведения об авторах

Марков Николай Григорьевич — д-р техн. наук, профессор отделения информационных технологий (ОИТ) Инженерной школы информационных технологий и робототехники (ИШИТР), ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», markovng@tpu.ru

Мачука Мендоса Кристиан Родриго✉ — аспирант, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», kristianrodrigo1@tpu.ru

Поступила в редакцию 26.05.2025.

Одобрено после рецензирования 01.09.2025.

Принята к публикации 18.02.2026.

DETECTION OF SMALL SPRUCE BARK BEETLE OUTBREAKS USING NEURAL NETWORK ANALYSIS OF SIBERIAN FIR TREES IMAGES

N.G. Markov, C.R. Machuca✉

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenina av., 634050, Tomsk, Russia

kristianrodrigo1@tpu.ru

The main tasks of remote forest pathology monitoring of coniferous forests infested with insect pests are considered. The importance of using multiclass classification results of coniferous trees in high-resolution images obtained during aerial forest monitoring using spacecraft or unmanned aerial vehicles for rapid problem-solving is demonstrated. A method for the rapid detection of small spruce bark beetle outbreaks is proposed. This method involves multiclass classification of infested trees in images using the Res-Mo-U-Net neural network model, identification of tree age based on the assessment of their crown area using segmentation masks obtained through multiclass classification, and decision-making on the presence of small spruce bark beetle outbreaks in the studied fir forest area based on calculations of actual tree mortality. To test the proposed method, a neural network analysis of an image of a fir forest area infested by the small spruce bark beetle in the Tomsk region was carried out. The results of the testing indicate the potential of the method for practical application.

Keywords: coniferous forests pathology monitoring, remote sensing, small spruce bark beetle outbreaks, convolutional neural network

Suggested citation: Markov N.G., Machuca C.R. *Obnaruzhenie ochagov ussuriyskogo poligrafa s pomoshch'yu neyrosetevogo analiza izobrazheniy derev'ev pikhty* [Detection of small spruce bark beetle outbreaks using neural network analysis of siberian fir trees images]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2026, vol. 30, no. 2, pp. 31–42. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-2-31-42

References

- [1] Krivets S.A., Bisirova E.M., Kerchev I.A., Pats E.N., Chernova N.A. *Transformatsiya taezhnykh ekosistem v ochage invazii poligrafa ussuriyskogo Polygraphus proximus Blandf. (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) v Zapadnoy Sibiri* [Transformation of taiga ecosystems in western Siberia in invasion focus of four-eyed fir bark beetle *Polygraphus proximus* Blandford (coleoptera: curculionidae, scolytinae)]. *Rossiyskiy Zhurnal Biologicheskikh Invaziy* [Russian J. of Biological Invasions], 2015, pp. 41–63.
- [2] Debkov N.M. *Prirodnyy potentsial vozobnovleniya v pikhtovykh lesakh, povrezhdennykh v khode invazii ussuriyskogo poligrafa* [The natural potential of regeneration in fir forests, damaged during the invasion of *Polygraphus proximus*]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Journal], 2017, v. 7, no. 1. pp. 58–68.
- [3] *Gosudarstvennyy doklad «O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy 2023»* [State report «On the state and protection of the environment 2023»]. Available at: <https://ecostr.ru/novosti/gosdoklad-o-sostoyanii-i-ob-okhrane-okruzhayushhej-sredy-2023/> (accessed 28.03.2025).
- [4] Bystrov S.O., Antonov I. A. First record of the four-eyed fir bark beetle *Polygraphus proximus* Blandford, 1894 (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) from Irkutsk province, Russia. *Entomological Review*, 2019, v. 99, pp. 54–55.
- [5] Dedyukhin S.V., Titova V.V. Finding of the bark beetle *Polygraphus proximus* Blandford, 1894 (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) in Udmurtia. *Russian Journal of Biological Invasions*, 2021, v. 12, pp. 258–263.
- [6] Kerchev I.A., Mandelshtam M.Y., Krivets S.A., Ilinsky Y.Y. Small spruce bark beetle *Ips amitinus* (Eichhoff, 1872) (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae): a new alien species in West Siberia. *Entomological review*, 2019, v. 99, pp. 639–644.
- [7] Kerchev I.A., Krivets S.A., Bisirova E.M., Smirnov N.A. Distribution of the small spruce bark beetle *Ips amitinus* (Eichhoff, 1872) in Western Siberia. *Russian J. of Biological Invasions*, 2022, v. 13, pp. 58–63.
- [8] Smirnov N.A., Kerchev I.A. Experimental rearing of the small spruce bark beetle *Ips amitinus* (Eichhoff, 1872) (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) on aboriginal Siberian coniferous species. *Acta Biologica Sibirica*, 2024, v. 10, pp. 1699–1710. DOI: 10.5281/zenodo.14468138
- [9] Chang W.Y., Lantz V.A., Hennigar C R., MacLean D.A. Economic impacts of forest pests: a case study of spruce budworm outbreaks and control in New Brunswick, Canada. *Canadian J. of Forest Research*, 2012, v. 42, pp. 490–505.
- [10] Van Lierop P., Lindquist E., Sathyapala S., Franceschini G. Global Forest area disturbance from fire, insect pests, diseases and severe weather events. *Forest Ecology and Management*, 2015, v. 352, pp. 78–88.
- [11] Seidl, R., Schelhaas, M.J., Rammer, W., Verkerk, P.J. Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. *Nature Climate Change*, 2014, v. 4, pp. 806–810. DOI: 10.1038/nclimate2318
- [12] Alekseev N.A., Shcherbakov A.N. *Stvolovye vrediteli krupnomernogo posadochnogo materiala khvoynykh porod* [Stem pests of large-sized planting material of coniferous trees]. Available at: https://www.greeninfo.ru/protection_plants/pests_and_diseases.html/Article/_aID/5095 (accessed 28.03.2025).

- [13] Kobzar' V.F., Kolesova N.I., Petrik A.A. *Ussuriyskiy poligraf Polygraphus proximus Blandford, 1894 v pikhtarnikakh ekoparka «Ozera na Snezhnoy» (Irkutskaya oblast')* [Polygraphus proximus Blandford, 1894 in the fir forests of the «Lakes on Snezhnaya» Ecopark (Irkutsk Oblast)]. *Fitosanitariya. Karantin rasteniy* [Plant Health and Quarantine], 2023, v. 1, pp. 59-71. DOI: 10.69536/a4850-3897-3753-x
- [14] Senf C., Pflugmacher D., Zhiqiang Y., Sebald J., Knorn J., Neumann M., Hostert P., Seidl R. Canopy mortality has doubled in Europe's temperate forests over the last three decades. *Nature Communications*, 2018, v. 9. DOI: 10.1038/s41467-018-07539-6
- [15] Krivets S.A., Bisirova E.M., Volkova E.S., Debkov N.M., Kerchev I.A., Mel'nik M.A., Nikiforov A.N., Chernova N.A. *Tekhnologiya monitoringa pikhtovykh lesov v zone invazii ussuriyskogo poligrafa v Sibiri* [Technology for monitoring fir forests in the Ussuri polygraph invasion zone in Siberia]. Tomsk: UMIUM, 2018, 74 p.
- [16] Yarmishko V.T., Ignat'eva O.V., Evdokimov A. *Nekotorye aspekty monitoringa sosnovykh lesov v ekstremal'nykh usloviyakh Kol'skogo Severa* [Some aspects of scots pine forests monitoring in extreme conditions of the kola north]. *Samarskiy nauchnyy vestnik* [Samara Scientific Bulletin], 2019, v. 8, no 2, pp. 81-86. DOI:10.24411/2309-4370-2019-12115.
- [17] Musolin D.L., Kirichenko N.I., Karpun N.N., Akseenko E.V., Golub V.B., Kerchev I.A., Mandelshtam M.Y., Vasaitis R., Volkovitch M.G., Zhuravleva E.N., Selikhovkin A.V. Invasive insect pests of forests and urban trees in Russia: Origin, pathways, damage, and management. *Forests*, 2022, v. 13, no. 4, pp. 521.
- [18] Chenari A., Erfanifard Y., Dehghani M., Pourghasemi H.R. Woodland mapping at single-tree levels using object-oriented classification of unmanned aerial vehicle (UAV) images. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2017, v. XLII-4/W4, pp. 43-49.
- [19] Safonova A., Tabik S., Alcaraz-Segura D., Rubtsov A., Maglinets Y., Herrera F. Detection of fir trees (*Abies sibirica*) damaged by the bark beetle in unmanned aerial vehicle images with deep learning. *Remote Sensing*, 2019, v. 11, no. 6, pp. 643.
- [20] Kerchev I.A., Maslov K.A., Markov N.G., Tokareva O.S. *Semanticheskaya segmentatsiya povrezhdennykh derev'ev pikhty na snimkakh s bespilotnykh letatel'nykh apparatov* [Semantic segmentation of damaged fir trees in unmanned aerial vehicle images]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2021, vol. 1, no. 1, pp. 116-126. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-116-126.
- [21] Zhou H., Yuan X., Zhou H., Shen H., Ma L., Sun L., Fang G., Sun H. Surveillance of pine wilt disease by high resolution satellite. *J. of Forestry Research*, 2022, v. 33, pp. 1401-1408.
- [22] Zhou Y., Liu W., Bi H., Chen R., Zong S., Luo Y. A detection method for individual infected pine trees with pine wilt disease based on deep learning. *Forests*, 2022, v. 13, no. 11, p. 1880.
- [23] Markov N.G., Maslov K.A., Kerchev I.A., Tokareva O.S., Machuka K.R., Osipova V.V. *Polnosvertochnye neyronnye seti dlya klassifikatsii povrezhdennykh derev'ev sosny sibirskoy kedrovoy na izobrazheniyakh s BPLA* [Fully convolutional networks for classification of damaged pinus sibirica trees in uav imagery]. *Regional'nye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli: Materialy IX Mezhdunar. nauch. konf.* [Regional Problems of Remote Sensing of the Earth. Proceedings of the IX International Scientific Conf.], Krasnoyarsk, September 13-16, 2022. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2022, pp. 61-64.
- [24] Machuka K.R. *Model' polnosvertochnoy neyronnoy seti dlya semanticheskoy segmentatsii derev'ev pikhty na izobrazheniyakh s BPLA* [A Fully Convolutional Neural Network Model for Semantic Segmentation of Fir Trees in UAV Images]. *Molodezh' i sovremennye informatsionnye tekhnologii: Materialy XXI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Youth and modern information technologies. Proceedings of the XXI International scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists], Tomsk, April 15-18, 2024. Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2024, pp. 60-63.
- [25] Machuka K.R., Markov N.G. *Modeli neyronnykh setey dlya segmentatsii snimkov derev'ev pikhty, poluchennykh s pomoshch'yu BPLA* [Neural networks models for semantic segmentation of siberian fir trees in UAV images]. *Regional'nye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli: Materialy XI Mezhdunar. nauch. konf.* [Regional Problems of Remote Sensing of the Earth. Proceedings of the IX International Scientific Conf.], Krasnoyarsk, September 10-13, 2024. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2024, pp. 344-347.
- [26] Li X., Wang A. Forest pest monitoring and early warning using UAV remote sensing and computer vision techniques. *Sci Rep*, 2025, v. 15. DOI: 10.1038/s41598-024-84464-3
- [27] Luo Y., Huang H., Roques A. Early Monitoring of Forest Wood-Boring Pests with Remote Sensing. *Annual review of entomology*, 2023, v. 68, pp. 277-298. DOI: 10.1146/annurev-ento-120220-125410
- [28] Maslov A.D. *Metodicheskie rekomendatsii po nadzoru, uchetu i prognozu massovykh razmnozheniy stvolovykh vreditel'ey i sanitarnogo sostoyaniya lesov* [Methodological recommendations for monitoring, recording and forecasting mass reproduction of stem pests and the sanitary condition of forests]. Pushkino: VNII lesovodstva i mekhanizatsii lesnogo khozyaystva, 2006, 68 p.
- [29] Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. Cambridge, MA: MIT Press, 2016.
- [30] Rahman M.A., Wang Y. Optimizing intersection-over-union in deep neural networks for image segmentation. *Advances in Visual Computing*, 2016, v. 10072, pp. 234-244. DOI: 10.1007/978-3-319-50835-1_22
- [31] Bertels J., Eelbode T., Berman M., Vandermeulen D., Maes F., Bisschops R., Blaschko M. Optimizing the dice score and jaccard index for medical image segmentation: theory & practice. *Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention*, 2019, v. 11765. DOI: 10.1007/978-3-030-32245-8_11
- [32] Markov N.G., Machuka K. *Modeli i metody glubokogo obucheniya dlya resheniya zadach distantsionnogo monitoringa lesnykh resursov* [Deep learning models and methods for solving the problems of remote monitoring of forest resources]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], 2024, v. 335, no. 6, pp. 55-74. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4600


- [33] Kerchev I.A., Markov N.G., Machuca C.R., Tokareva O.S. Classification of pest-damaged coniferous trees in unmanned aerial vehicles images using convolutional neural network models. *Computer Research and Modeling*, 2024, v. 16, no. 5, pp. 1271–1294.
- [34] Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, 2015, v. 9351. DOI: 10.1007/978-3-319-24574-4_28.
- [35] He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition. *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016, pp. 770–778.

Acknowledgments

The authors extend their sincere appreciation to I.A. Kerchev, Cand. Sci. (Biology), Head of the Laboratory at the Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, for generously providing images of fir forest areas affected by the small spruce bark beetle.

Authors' information

Markov Nikolay Grigor'evich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Department of Information Technologies, National Research Tomsk Polytechnic University, markovng@tpu.ru

Machuca Mendosa Cristian Rodrigo  — pg. of the National Research Tomsk Polytechnic University, kristianrodigo1@tpu.ru

Received 26.05.2025.

Approved after review 01.09.2025.

Accepted for publication 18.02.2026.

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

СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ И ФОТОГРАФИЧЕСКИХ СНИМКОВ ИЗ КОСМОСА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПОЖАРОВ

М.Ю. Беляев^{1, 2✉}, А.М. Есаков², Х.Х. Ильясов³, В.Е. Назайкинский³

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

²ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева» («РКК «Энергия»), Россия, 141070, Московская обл., г. Королев, ул. Ленина, д. 4а

³ФГБОУ «Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук» (ИПМех РАН), Россия, 119526, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1

mikhail.belyaev@rsce.ru

Рассмотрены методы применения спектральных изображений и космических фотоснимков для определения фронта горения и границ участков выгорания при мониторинге пожаров. Использованы данные спектральных систем спутников Sentinel-2 и Landsat-8, а также фотоснимки с Международной космической станции, получаемые в рамках космических экспериментов «Ураган», «Сценарий». Обработаны и исследованы данные, полученные во время пожара в 2020 г. на о. Кахоолаве, входящем в группу Гавайских островов. Показаны возможности совместного применения разнотипных данных для оценки динамики пожаров.

Ключевые слова: лесные пожары, спектральные данные, космические фотоснимки, фронт горения, участки выгорания, индексы вегетации

Ссылка для цитирования: Беляев М.Ю., Есаков А.М., Ильясов Х.Х., Назайкинский В.Е. Совместное использование спектральных и фотографических снимков из космоса для мониторинга пожаров // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2026. Т. 30. № 2. С. 43–57. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-2-43-57

Ежегодные лесные пожары наносят огромный ущерб как растительности, так и животному миру, лишая их естественной среды обитания. Принимая во внимание весьма значительные площади выгорания и достаточно продолжительное время, требуемое на воспроизводство растений, актуальность приобретают задачи своевременного обнаружения очагов возгорания и прогнозирования распространения огня. Одним из перспективных методов в этом направлении считается наблюдение поверхности Земли из космоса [1–19], которое в современных условиях позволяет обнаруживать отдельные объекты и события площадью в несколько десятков метров. Существенным недостатком космических средств мониторинга признано малое количество космических аппаратов (КА) пригодных для обнаружения и отслеживания объектов горения с необходимым пространственным и временным разрешением. Так, например, для спутников Sentinel-2 (пространственное разрешение 10...20 м.) прохождение над одной и той же точкой земной по-

верхности происходит с интервалом в 5 сут., а для Landsat-8 — 16 сут. Как правило, если каким-либо аппаратом фиксируется начало пожара, то к следующему моменту пролета над тем же (либо близким к нему) участком Земли горение уже прекращается. Исключительными можно считать ситуации, когда время развития пожаров превышает характерные периоды полного цикла оборота спутника (группы спутников) вокруг Земли. В отдельных (достаточно редких) случаях удается обнаружить сочетание данных от разнотипных спутников, которые вследствие некратности периодов обращения отстоят один от другого на меньшие временные интервалы.

Значительное влияние на условия съемки оказывает атмосфера и положение Солнца. Поскольку спектральная аппаратура фиксирует излучение, исходящее от Земли, то для ее работы требуется соблюдение, по крайней мере, следующих условий: либо должен быть внешний облучающий источник над снимаемым участком поверхности для получения отраженного излучения, либо излучение должно непосредственно исходить от поверхности Земли. В большинстве случаев речь идет о съемке

в дневное время, что сужает временной диапазон наблюдения. При непосредственном излучении от поверхности Земли в результате горения (средний и дальний инфракрасные диапазоны) съемка может происходить и в ночное время, но она, как правило, уступает в детализации камерам видимого спектра и ближнего ИК-диапазона.

Указанные трудности в сочетании с отсутствием взаимосвязи между отдельными средствами наблюдения делают отслеживание процесса развития пожара весьма нетривиальной задачей. В настоящей статье рассматривается совместное использование данных со спутников Sentinel-2, Landsat-8 и фотоснимков с Международной космической станции (МКС) для обнаружения фронта горения и изменения во времени границы зоны выгорания.

Остров Кахоолаве (Kaho'olawe) вулканического происхождения, входит в группу Гавайских островов. Характерные размеры острова — около 18 км в длину и 11 км в ширину, максимальная высота — около 450 м. Остров располагается в подветренной дождевой тени о. Мауи (Maui) и характеризуется полусухим климатом. В результате деятельности человека природа о. Кахоолаве претерпела существенное изменение. Вероятно, еще с доисторических времен местные леса выжигались в целях расширения площадей для земледелия [20]. Последующее заселение острова чужеродными копытными млекопитающими, уже после экспедиций Кука, привело к серьезной деградации ландшафта и эрозии почвы. Как результат, к концу XIX в. — началу XX в. участки выше

200 м н. у. м. практически лишились растительности и почвы. В 1941–1994 гг. о. Кахоолаве использовался ВМС США для военных учений с боевыми стрельбами и бомбометанием. В 1965 г. в его восточной оконечности были взорваны заряды общей массой около 500 т тротила, что, возможно, привело к расколу скальных пород и попаданию части грунтовых вод в океан. В 1993 г. остров передан штату Гавайи, однако его очистка от взрывоопасных предметов не закончена и в настоящее время.

Достаточно скудная растительность острова представлена зарослями травы с отдельно стоящими или образующими небольшие группы деревьями и кустарниками. Наиболее плотные заросли деревьев наблюдаются по склонам оврагов, где, по-видимому, исторически они не подвергались серьезному воздействию со стороны человека.

Согласно данным комиссии Kaho'olawe Island Reserve Commission (KIRC) пожар на острове был обнаружен 22.02.2020 г. После нескольких суток тушения огня было принято решение о приостановке работ по причине опасности детонации неразорвавшихся боеприпасов. Пожар был потушен спустя 6 сут. благодаря начавшимся дождям и действиям пожарных расчетов.

Цель работы

Цель работы — отработка методов применения спектральных изображений со спутников и фотоснимков с борта МКС для определения фронта горения и границ участков выгорания.

Т а б л и ц а 1

Характеристики мультиспектральных систем космического аппарата Sentinel-2
Characteristics of the Sentinel-2 Multispectral Systems

Номер полосы	2A		2B		Пространственное разрешение, м
	Центральная длина волны, нм	Ширина полосы, нм	Центральная длина волны, нм	Ширина полосы, нм	
B1	442,7	21	442,3	21	60
B2	492,4	66	492,1	66	10
B3	559,8	36	559,0	36	10
B4	664,6	31	665,0	31	10
B5	704,1	15	703,8	16	20
B6	740,5	15	739,1	15	20
B7	782,8	20	779,7	20	20
B8	832,8	106	833,0	106	10
B8A	864,7	21	864,0	22	20
B9	945,1	20	943,2	21	60
B10	1373,5	31	1376,9	30	60
B11	1613,7	91	1610,4	94	20
B12	2202,4	175	2185,7	185	20

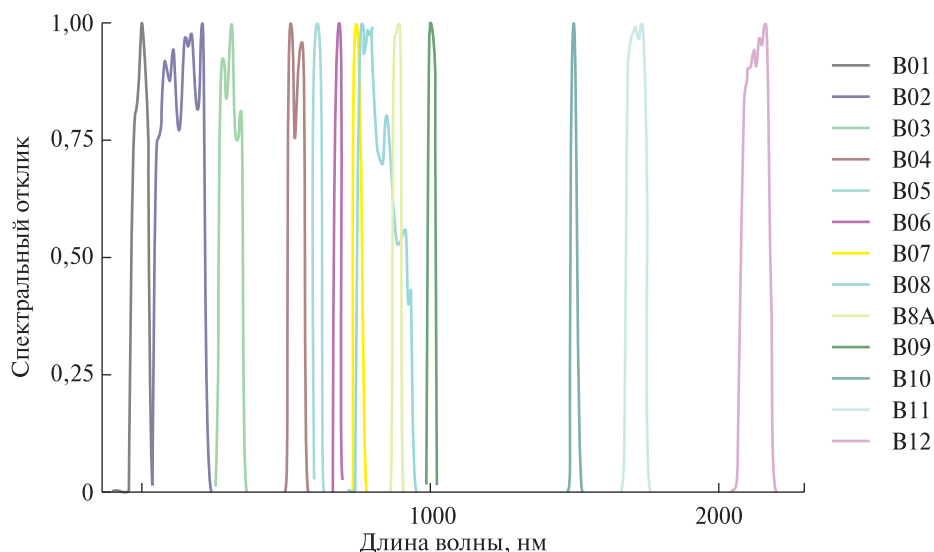


Рис. 1. Зависимость чувствительности датчиков мультиспектральных систем спутника Sentinel-2 (2A) от длины волны

Fig. 1. Sensitivity of the Sentinel-2 (2A) multispectral system sensors as a function of wavelength

Материалы и методы

Источниками данных со спутников Sentinel-2 (2A, 2B) выступают 13-полосные мультиспектральные системы MSI (Multi Spectral Instrument). Пространственное разрешение изображений зависит от диапазона частот и изменяется от 10 до 60 м, глубина оцифровки составляет 12 бит (табл. 1).

Временной интервал между съемками одних и тех же участков земной поверхности составляет 5 сут. для пары спутников (их вращение происходит в противофазе), либо 10 сут., если вследствие привязки к конкретной спектральной системе требуется сравнивать данные, получаемые одной и той же аппаратурой (рис. 1).

Как видно из рис. 1, спектральные характеристики Sentinel-2B и 2A отличаются незначительно, полосы B07 и B8A перекрываются полосой B08, при этом чувствительность в полосе B8A почти в 2 раза выше чувствительности датчиков в полосе B08 на тех же частотах. Можно предположить, что обработка спектральных изображений с использованием полосы B08 будет схожей с результатами, полученными с применением данных полосы B07.

Спектральное оборудование спутника Landsat-8 представлено двумя устройствами: OLI (Operational Land Imager) для видимого излучения и TIRS (Thermal Infrared Sensor) для инфракрасного диапазона, глубина оцифровки 12 бит (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Характеристики спектральных систем космического аппарата Landsat-8
Characteristics of the Landsat-8 Spectral Systems

Номер полосы	Диапазон частот, нм	Ширина полосы, нм	Пространственное разрешение, м
1	435...451	16	30
2	452...512	60	30
3	533...590	57	30
4	636...673	37	30
5	851...879	28	30
6	1566...1651	85	30
7	2107...2294	187	30
8	503...676	173	15
9	1363...1384	21	30
10	10 600...11 190	590	100
11	11 500...12 510	1010	100

Полосы 1–9 относятся к камере OLI, 10, 11 — к камере TIRS, обе камеры используют для работы аналого-цифровые преобразователи с 12-битной дискретизацией. Периодичность получения спектральных изображений со спутника Landsat-8 составляет 16 сут.

Для анализа состояния растительного покрова, определения участков с активным горением, выделения водных поверхностей и других процессов используются отношения вида

**Определение индексов по спектральным данным
космических аппаратов Sentinel-2 и Landsat 8**
Determination of indices based on spectral data from the Sentinel-2 and Landsat 8 spacecraft

Название индекса	Расшифровка (англ.)	Sentinel-2		Landsat 8	
		Центральная длина волны полосы 1, нм	Центральная длина волны полосы 2, нм	Центральная длина волны полосы 1, нм	Центральная длина волны полосы 2, нм
NBR	Normalized burn ratio	2202,4	832,8	–	–
NBR-A	Normalized burn ratio (narrow)	2202,4	864,7	2220	865
NBR-S	Normalized burn ratio (short-wave IR)	1613,7	864,7	1608.5	865
NDVI	Normalized difference vegetation index	664,6	832,8	655	865
GNDVI	Green normalized difference vegetation index	559,8	832,8	560	865
NDVIre1	Normalized difference vegetation index red edge 1	704,1	832,8	–	–
NDVIre2	Normalized difference vegetation index red edge 2	740,5	832,8	–	–
NDVIre3	Normalized difference vegetation index red edge 3	782,8	832,8	–	–
NDre1	Normalized difference red edge 1	704,1	740,5	–	–
NDre2	Normalized difference red edge 2	704,1	782,8	–	–

$$I = \frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2},$$

где $V_{1,2}$ — интенсивности излучения в двух различных спектральных полосах.

Величина I в дальнейшем будет называться общепринятым термином «индекс». Очевидно, значение индекса изменяется в диапазоне $[-1,1]$, при этом величина -1 означает полное отсутствие в заданной точке признака, описываемого индексом, а 1 — точное наличие. В тех случаях, когда $V_{1,2}$ принимают нулевые значения, индексу присваивается величина -1 (табл. 3).

Индекс NDVI использован в статьях [21–30] для оценки состояния растительного покрова, а в работах [25–28] — для оценки последствий пожаров, NBR — в работах [31, 32] для детектирования горения, NDVI и NBR совместно применялись в работах [33, 34]. Различные варианты индексов, построенных на спектральных полосах от красного до среднего ИК-диапазонов, описаны в работе [35].

Значительное влияние на индексы оказывают облака, в зависимости от их интенсивности значения индексов могут быть серьезно искажены вплоть до предоставления неверной информации.

Результаты и обсуждение

Согласно данным комиссии KIRC пожар на острове длился с 22.02.2020 по 28.02.2020. В указанный интервал попадают данные КА Sentinel-2 от 25.02.2020 и Landsat-8 от 27.02.2020. Оба сеанса съемки соответствуют активной фазе горения. Более ранние и поздние данные с указанных аппаратов получены либо до начала, либо после окончания пожара.

Состояние острова до начала (15.02.2020 и 20.02.2020), в самый активный момент (25.02.2020) и на завершающей фазе (27.02.2020) горения представлено на рис. 2. Изображения в верхнем ряду и слева внизу получены по спектральным данным Sentinel-2, внизу справа — по данным Landsat-8. Изобра-

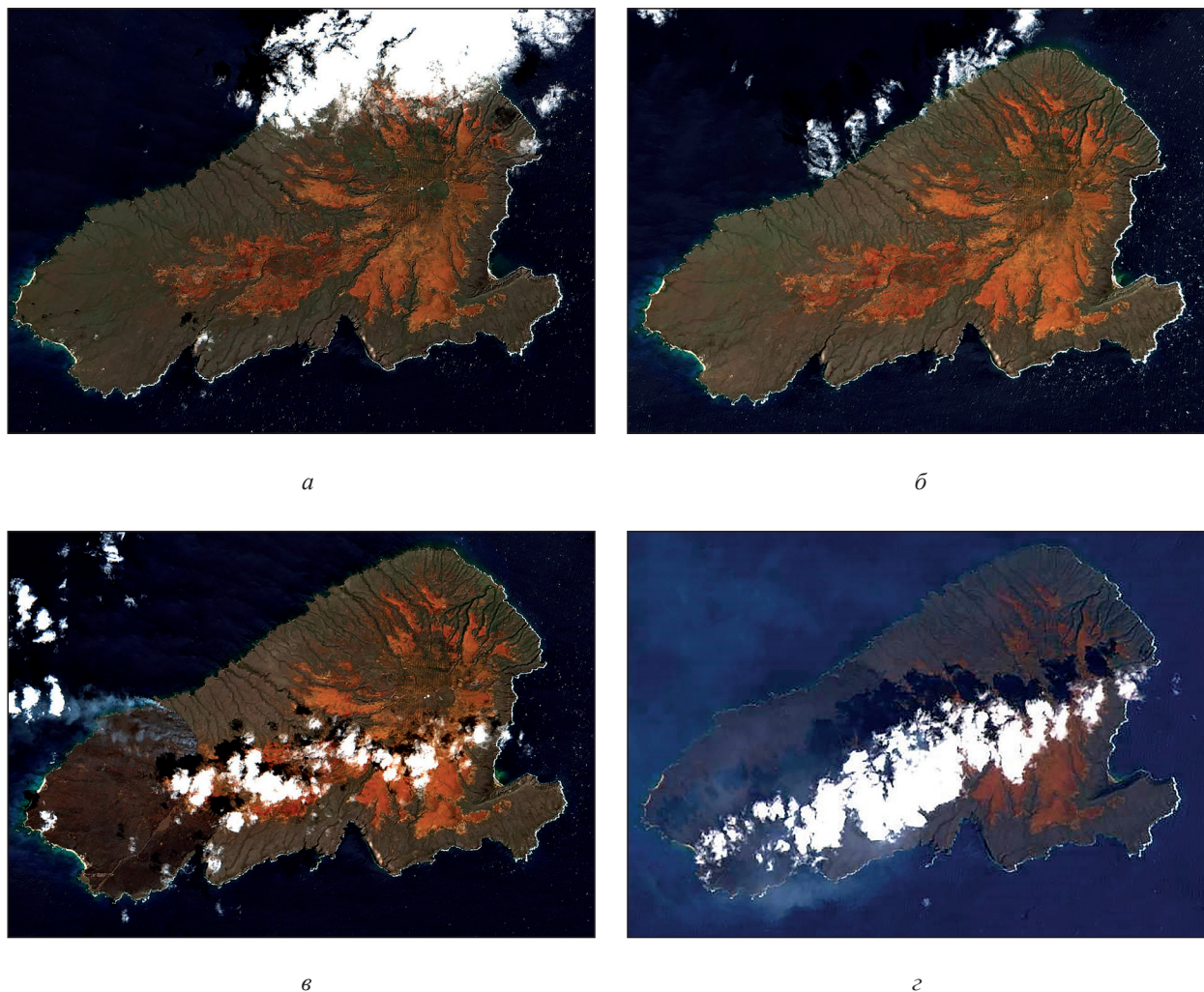


Рис. 2. Изображения о. Кахоолаве: даты съемки: а — 10.02.2020; б — 15.02.2020; в — 20.02.2020; г — 27.02.2020
Fig. 2. Images of Kahoolawe Island: dates: а — 10.02.2020; б — 15.02.2020; в — 20.02.2020; г — 27.02.2020

жение 15.02.2020 предназначено для демонстрации сложностей, возникающих при работе с индексами при существенной облачности.

Следует отметить, что спектральные данные Sentinel-2 после завершения горения 01.03.2020 и 06.03.2020 не представляют практической ценности по причине значительного покрытия облаками.

Съемка 25.02.2020 числа соответствует активной фазе горения растительного покрова, на ней отчетливо виден фронт со шлейфом дыма в верхней части острова. Нижняя часть, хотя и выгорела, но не имеет каких-либо явных признаков пожара; области, окрашенные в более светлые цвета (ближе к вершине), без существенной растительности и практически остаются неизменными. Причина подобного развития событий объясняется тем, что горение развивалось в основном за счет травы и низкорослых кустарников,

а в нижней части острова имеется достаточно крупный разлом скальных пород, который и послужил преградой для огня. На изображении от 27.02.2020 дымовые шлейфы выражены менее отчетливо, однако хорошо видна область выгоревшей растительности, частично закрытая облаками.

Ниже показаны (рис. 3) интенсивности индексов вегетации NDVI для различных моментов времени съемки, вычисляемые по формуле

$$F = \frac{MN_i}{2N},$$

где M — количество интервалов разбиения отрезка $[-1, 1]$;

N_i — количество значащих точек индекса, попавших в диапазон значений $[kh, (k+1)h]$, $h = 2/M$;

N — общее количество значащих точек в индексе.

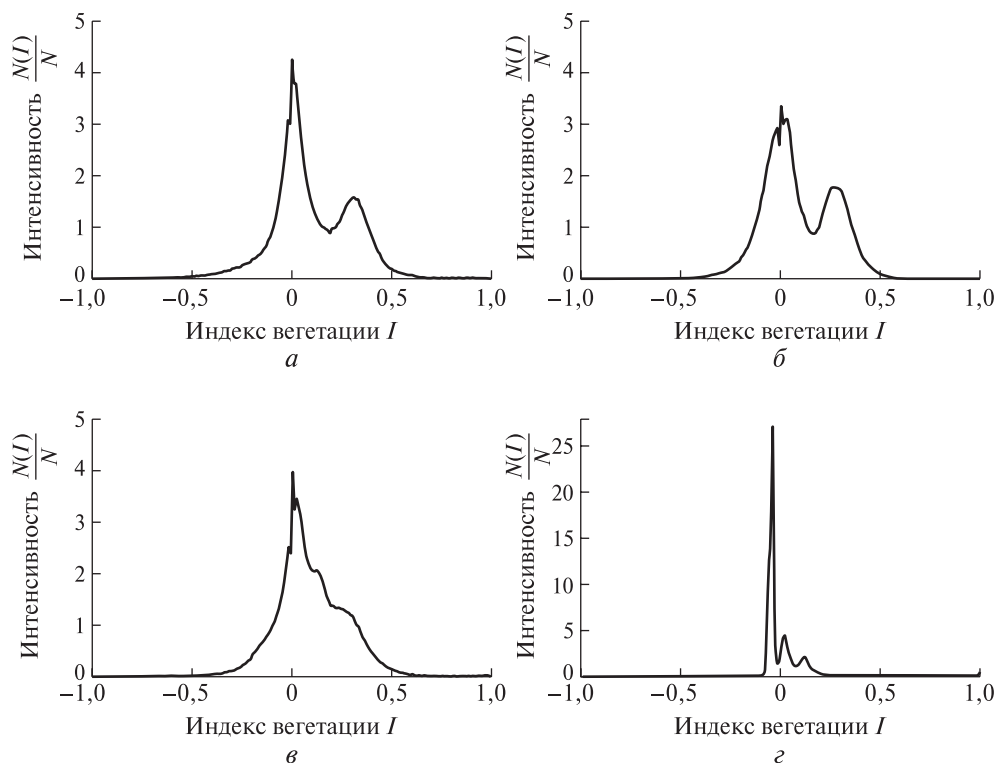


Рис. 3. Интенсивность индекса вегетации NDVI о. Кахоолаве: даты съемки: *a* — 15.02.2020; *б* — 20.02.2020; *в* — 25.02.2020; *з* — 27.02.2020

Fig. 3. NDVI vegetation index intensity of Kahoolawe Island: *dates*: *a* — 15.02.2020; *б* — 20.02.2020; *в* — 25.02.2020; *з* — 27.02.2020

Площадь под кривой, как следует из рис. 3, задаваемой указанным выражением, вычисленная по формуле прямоугольников, равна единице. На кривых, построенных по данным до начала горения, отчетливо прослеживается граница (локальный минимум на кривой вблизи значения 0,2) между значениями индекса, соответствующими участкам с интенсивным и редким растительными покровами. По мере выгорания растительности эта граница на кривых исчезает.

Визуализация рассчитанного по данным спектрометрии индекса вегетации NDVI в виде псевдоцветных изображений представлена на рис. 4. Для съемок 15, 20 и 25.02.2020 изображение получено путем преобразования значений индекса в диапазоне [0,2; 0,5] в градиентную палитру, от коричневого цвета (100, 100, 0) до зеленого (0, 255, 0) в RGB пространстве. Для съемки 27.02.2020 видимое изображение сформировано с помощью преобразования значений индекса в диапазоне [0,04; 0,5] в градиентную палитру в тех же цветах. Верхнее значение индекса при построении изображений взято равным 0,5, а не 1,0 в связи с отсутствием значащих точек в диапазоне [0,5; 1,0] (как следует из рис. 3). Уменьшение диапазона отображае-

мых значений позволяет ярче выделить цветом различия в индексе.

Из сравнения изображений о. Кахоолаве в видимом спектре и изображений индекса вегетации NDVI явно видно, что наличие облаков вносит погрешности в вычисление его значений. Так, например, на съемке 15.02.2020 верхняя часть острова как бы не имеет растительности, что явно не следует из изображения индекса вегетации от 20.02.2020. Точно так же на изображении от 27.02.2020 якобы есть интенсивная растительность в нижней части острова, но в действительности это густая облачность над этим участком в момент съемки.

Сопоставление значений индекса вегетации, полученных по данным 15.02.2020 и 20.02.2020, показывает, что в той части, где облачность была низкой, данные практически идентичны. Отсюда следует вывод: получаемая средствами мониторинга информация о вегетации достаточно стабильна в относительно небольших промежутках времени и ее можно использовать для обработки данных горения при относительно хороших условиях для съемки (при малой облачности).

На приведенных изображениях (рис. 5) имеются определенные дефекты, которые в даль-

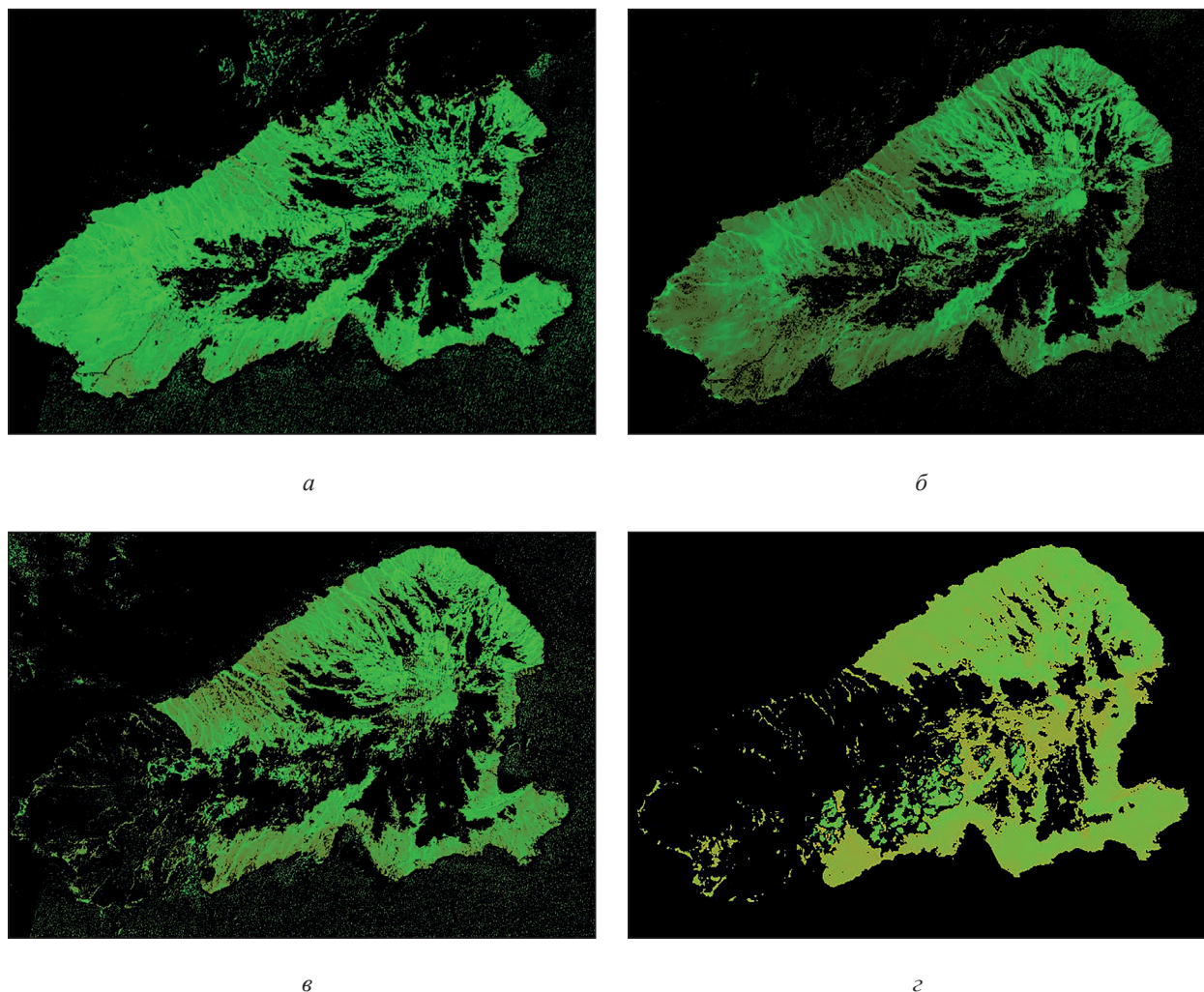


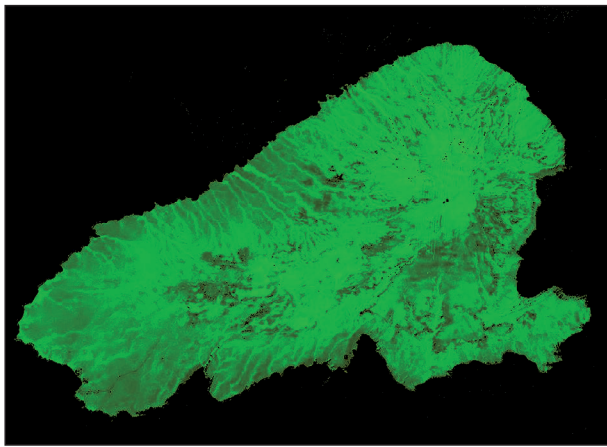
Рис. 4. Индексы вегетации NDVI по данным спектрометрии о. Кахоолаве: *даты съемки:* а — 15.02.2020; б — 20.02.2020; в — 25.02.2020; г — 27.02.2020
Fig. 4. NDVI vegetation indices based on spectrometry data for Kahoolawe Island: *dates:* а — 15.02.2020; б — 20.02.2020; в — 25.02.2020; г — 27.02.2020

нейшем следует минимизировать для получения более надежных результатов: у индекса вегетации NDVI имеются положительные значения в области, занятой водой (см. рис. 4, а, б). Для сравнения возможностей использования различных модификаций индекса вегетации (GNDVI, NDVIre1, NDVIre2, NDVIre3, NDre1 и NDre2), доступных для определения по спектрометрическим данным (съемка Sentinel-2 от 20.02.2020) представлены построенные по их значениям изображения (см. рис. 5).

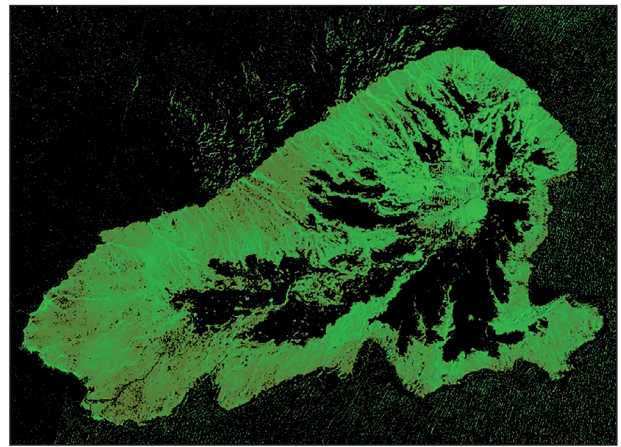
Как следует из рис. 5, индекс GNDVI в меньшей степени отражает перепады уровня растительности, однако не содержит такого количества дефектов, как индекс NDVI и не «показывает» растительность вне острова. Индекс NDVIre1 очень схож с индексом NDVI, а у индексов NDVIre2, NDVIre3 больше дефектов, нежели полезной информации. Индексы

NDre1 и NDre2 очень схожи по характеристикам с индексом NDVI и, вероятно, могут иногда использоваться как альтернатива в случае отсутствия спектральных данных ближнего ИК-диапазона.

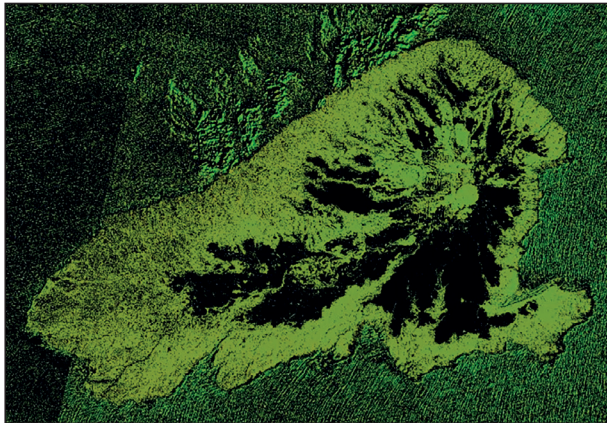
Ниже на рис. 6 приведены изображения индексов горения NBR-A и NBR-S. Индекс NBR-S представляет интерес если спектральная аппаратура не располагает средневолновым ИК-диапазоном, что актуально для научной аппаратуры МКС Гиперспектрометр [36–38]. Анализ индексов горения и вегетации показывает явную зависимость положения фронта горения от вегетации. На изображении индекса NBR-S четче прослеживается различие в плотности растительности и видно, что искривление фронта пожара приходится на участок с меньшей плотностью растительного покрова.



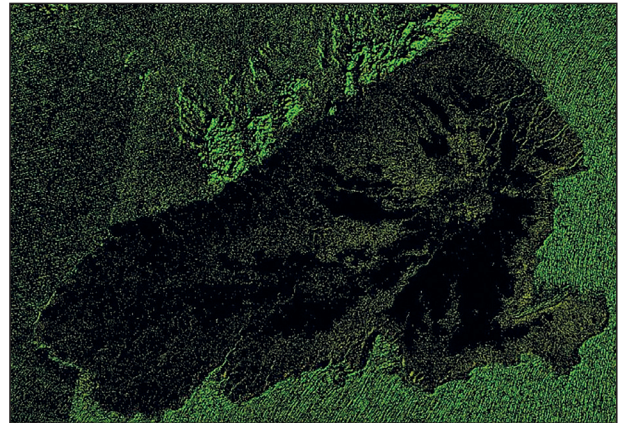
a



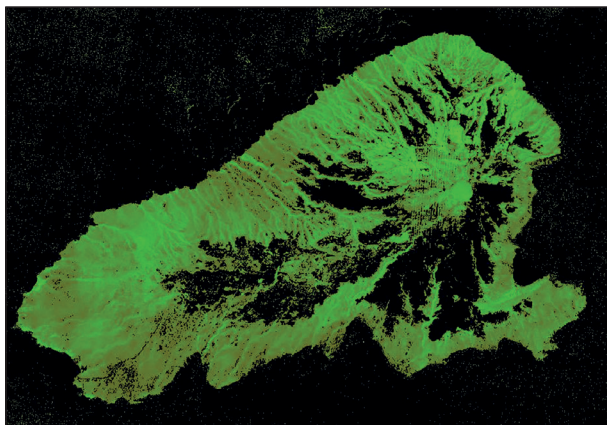
б



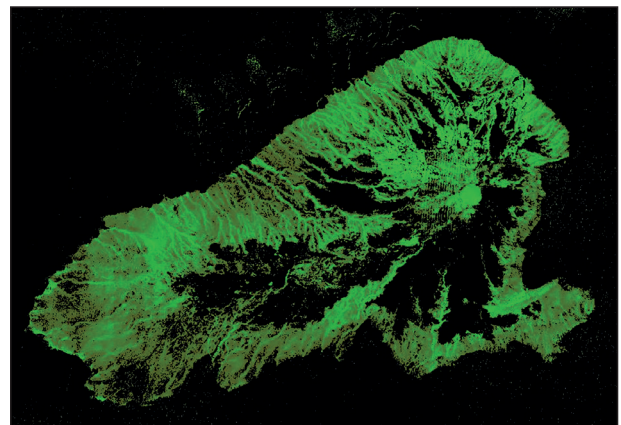
в



г



д



е

Рис. 5. Модифицированные индексы вегетации: *a* — GNDVI; *б* — NDVIre1; *в* — NDVIre2; *г* — NDVIre3; *д* — NDre1; *е* — NDre2

Fig. 5. Modified vegetation indices: *a* — GNDVI; *б* — NDVIre1; *в* — NDVIre2; *г* — NDVIre3; *д* — NDre1; *е* — NDre2

Для получения видимого изображения индекса NBR-A значения $[-1; 0,7]$ отображаются в цветах от черного (RGB 0, 0, 0) до белого

(RGB 255, 255, 255), значения в диапазоне $[0,7; 0,9]$ отображаются в оттенках красного цвета — от темного (RGB 100, 0, 0) до яркого

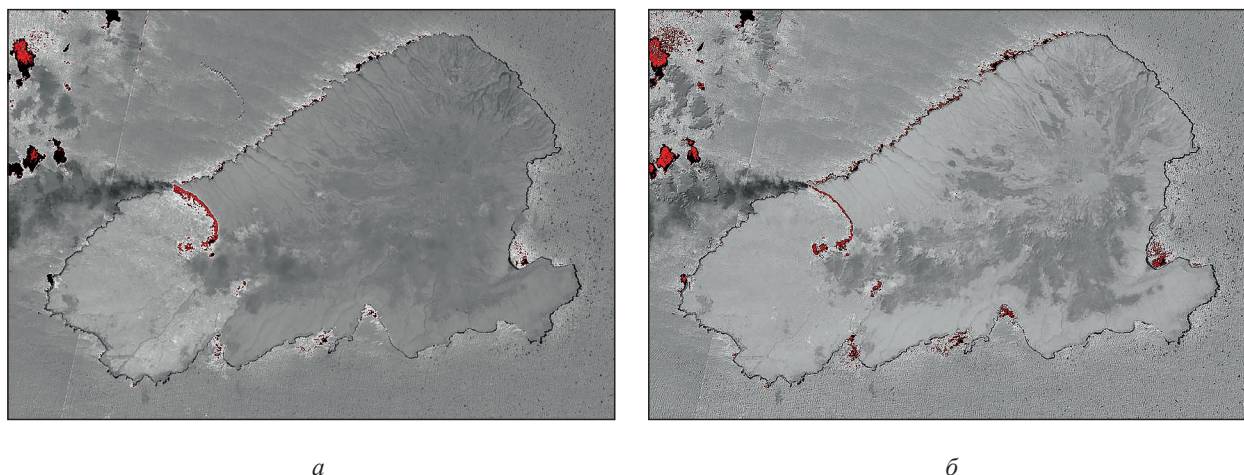


Рис. 6. Индексы горения NBR-A (а) и NBR-S (б), полученные по спектральным данным 25.02.2020

Fig. 6. NBR-A (a) and NBR-S (b) combustion indices obtained from spectral data on 25.02.2020

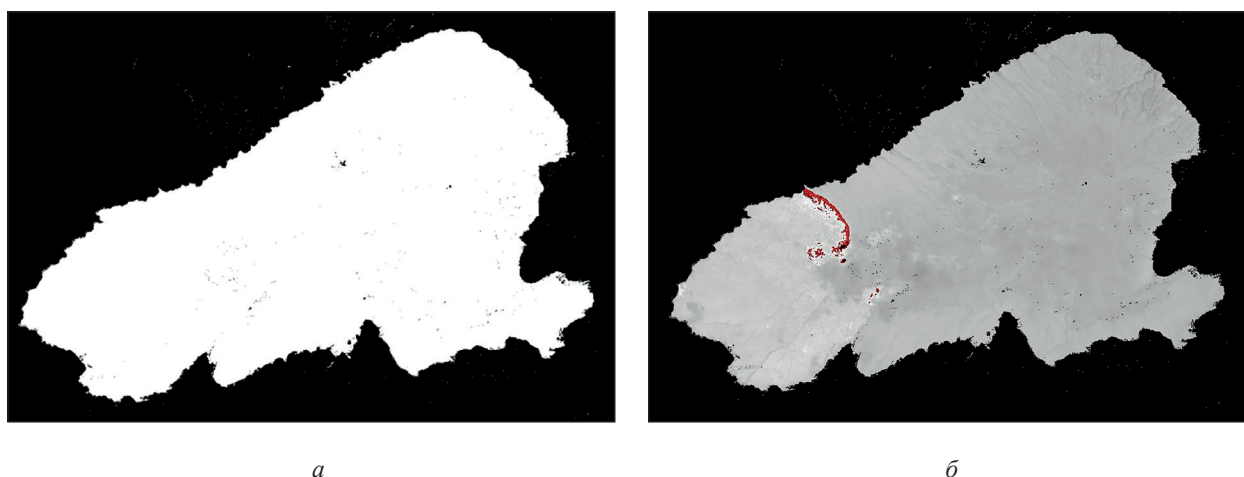


Рис. 7. Маска, построенная на основе индекса GNDVI (а); индекс NBR-A после применения маски (б)

Fig. 7. Mask constructed based on the GNDVI index (a); NBR-A index after applying the mask (b)

(RGB 255, 0, 0). Изображение для индекса NBR-S получают аналогично, только диапазон отображения изменяется на $[-1; 0,5]$ и $[0,5; 0,9]$. Как следует из рис. 6, индекс NBR-S практически не отличается от индекса NBR-A — небольшие различия есть в значении, по которому требуется проводить разделение на области горения и зоны, свободные от пожара. Оба индекса имеют один и тот же недостаток — наличие участков «ложного горения». В данном случае эти участки легко определяются, поскольку приходится на области, занятые водой. Для устранения их влияния на дальнейшую обработку данных съемок был использован метод маскирования с применением матрицы,

построенной на основе индекса GNDVI для спектральных данных от 20.02.2020. Формирование маски проводилось следующим образом: там, где значение индекса превышало 0,2, значение маски полагалось равным 1, в противном случае 0. На рис. 7 показаны изображения маски и результат ее применения к изображению индекса NBR-A.

В настоящей работе маски формировались простым отсечением по значению индекса GNDVI, что может приводить к некоторым незначительным дефектам (см. рис. 7). Для более качественного (но и более затратного в вычислительном плане) отделения водной поверхности от суши следует использовать

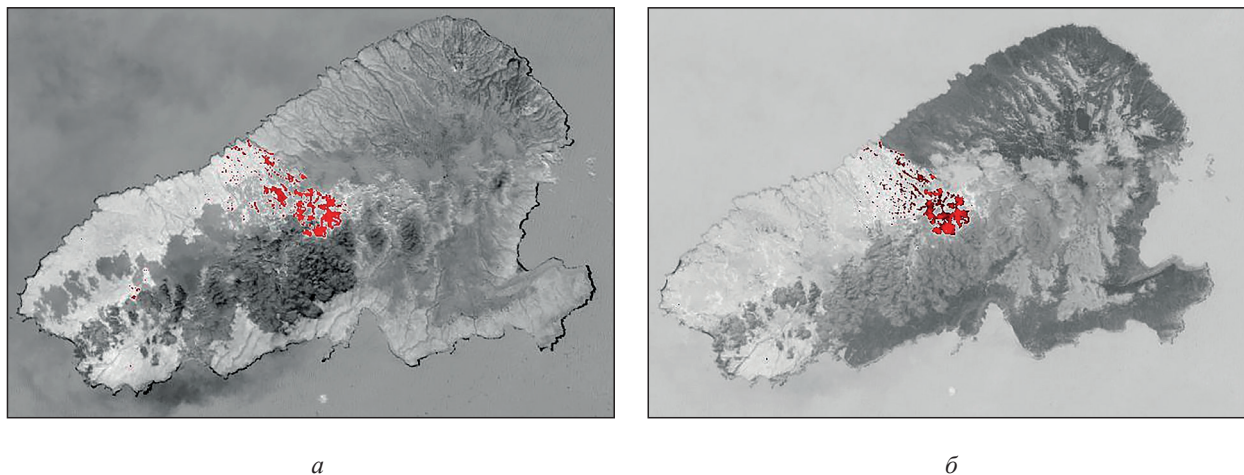


Рис. 8. Индексы горения NBR-A (*a*) и NBR-S (*б*), полученные по спектральным данным от 27.02.2020

Fig. 8. NBR-A (*a*) and NBR-S (*б*) combustion indices obtained from spectral data on 27.02.2020

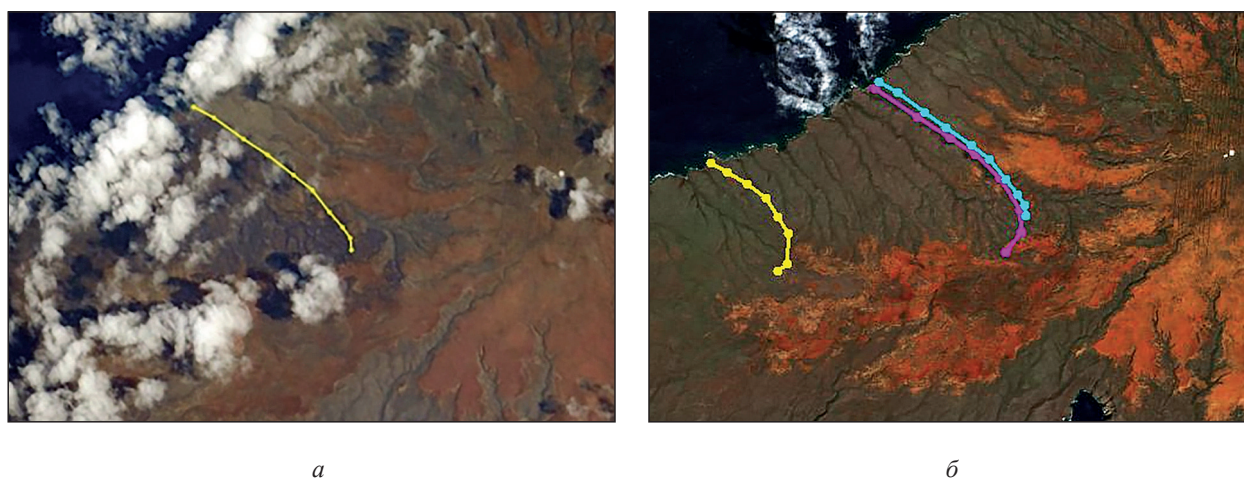


Рис. 9. Фотоснимок с борта Российского сегмента МКС от 06.03.2020, с нанесенным на нем положением границы выгоревшей растительности (*a*) и результаты совмещения фронтов горения и границ выгоревшей растительности (*б*)

Fig. 9. Photograph from the Russian segment of the ISS on 06.03.2020, with the location of the boundary of burnt vegetation marked on it (*a*) and the results of combining the fire fronts and the boundaries of burnt vegetation (*б*)

алгоритмы маскирования с дополнительным анализом пограничных значений индекса.

Изображения индексов горения NBR-A и NBR-S (рис. 8) были получены следующим образом: точки со значением индексов $[-1; 0,33]$ и $[-1; 0,2]$ соответственно окрашивались в оттенки серого в диапазоне от черного до белого, $[0,33; 1]$ и $[0,2; 1]$ соответственно — в оттенки красного от темного (RGB 100, 0, 0) до светлого (RGB 255, 0, 0).

Горение 27.02.2020 (см. рис. 8) в большей степени происходило в верхней части о. Кахоолаве (удаленной от воды) и распалось на отдельные

очаги. Сравнение индексов NBR-A, NBR-S и NDVI выявило искажения от облаков и их теней. Несмотря на это, открытое горение устойчиво детектируется в обоих индексах, позволяя высказать предположение об отсутствии значительного влияния на качество детектирования очагов пожаров от применения более коротковолновой части ИК-диапазона (1600 нм вместо 2200 нм).

Дальнейший анализ спектральных данных спутников Sentinel-2 и фотоснимков с МКС показал, что наиболее близок к дате завершения пожара 28.02.2020 и пригоден для восстановления границ выгорания снимок с МКС от 06.03.2020.

Положение фронтов горения и границ выгоревших участков демонстрируется на рис. 9. На рис. 9, *а* представлен фотоснимок с МКС от 06.03.2020 с выделенной на нем границей области выгорания, на рис. 9, *б* — изображение острова по спектральным данным Sentinel-2 от 15.02.2020, на котором показаны границы пожара: желтой линией — на 25.02.2020 (по индексу NBR-A, спектроизображение Sentinel-2), малиновой — на 27.02.2020 (по индексу NBR-A и зоне выгорания, спектроизображение Landsat-8), голубой — на 06.03.2020 (по зоне выгорания на снимке с борта Российского сегмента МКС).

Выводы

Проведенные анализ и обработка спектральных данных спутников Sentinel-2, Landsat-8 и фотоснимков с МКС позволили охарактеризовать возможности совместного применения разнотипных данных для оценки динамики пожара, в частности на о. Кахоолаве в 2020 г. Существующие космические аппараты, которые могут осуществлять мультиспектральную съемку, с их периодами обращения не дают возможность достаточно полно контролировать динамику процессов горения. Наличие значительной облачности над объектами съемки в сильной степени препятствует получению корректных количественных данных о процессах горения. Однако, несмотря на эти проблемы при использовании данных с нескольких аппаратов, наблюдения из космоса позволяют контролировать труднодоступные территории с приемлемой периодичностью и совместно с воздушными средствами мониторинга представляют собой мощнейший механизм контроля состояния природных и биологических ресурсов.

Список литературы

- [1] Garcia M.J.L., Caselles V. Mapping burns and natural reforestation using thematic mapper data // *Geocarto Int.*, 1991, v. 6, no. 1, pp. 31–37.
- [2] Wind B., Justice C.O., Vadrevu K.P., Ellicott E., Schroeder W. Active fires from the Suomi NPP visible infrared imaging radiometer suite: product status and first evaluation results // *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 2014, v. 119, pp. 803–816.
- [3] Мамедалиева В.М. Изменение лесных массивов северо-восточного региона Азербайджана по космическим снимкам // *ИзВУЗ Лесной журнал*, 2022. № 1. С. 88–97.
- [4] Барталев С.А., Ершов Д.В., Коровин Г.Н., Котельников Р.В., Лупян Е.А., Щетинский В.Е. Информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства РФ (состояние и перспективы развития) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2008. Вып. 5. Т. 2. С. 419–429.
- [5] Барталев С.А., Ершов Д.В., Коровин Г.Н., Котельников Р.В., Лупян Е.А., Щетинский В.Е. Основные возможности и структура информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ Рослесхоз) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2010. Т. 7. № 2. С. 97–105.
- [6] Барталев С.А., Егоров В.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2011. Т. 8. № 4. С. 285–302.
- [7] Барталев С.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Стыщенко Ф.В., Флитман Е.В. Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2012. Т. 9. № 2. С. 9–27.
- [8] Барталев С.А., Лупян Е.А., Стыщенко Ф.В., Панова О.Ю., Ефремов В.Ю. Экспресс-картографирование повреждений лесов России пожарами по спутниковым данным Landsat // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2014. Т. 11. № 1. С. 9–20.
- [9] Барталев С.А., Стыщенко Ф.В., Егоров В.А., Лупян Е.А. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // *Лесоведение*, 2015. № 2. С. 83–94.
- [10] Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
- [11] Буряк Л.В., Сухинин А.И., Каленская О.П., Пономарев Е.И. Последствия пожаров в ленточных борах юга Сибири // *Сибирский экологический журнал*, 2011. Т. 18. № 3. С. 331–339.
- [12] Кашницкий А.В., Лупян Е.А., Барталев С.А., Барталев С.С., Балашов И.В., Ефремов В.Ю., Стыщенко Ф.В. Оптимизация интерактивных процедур картографирования гарей в информационных системах дистанционного мониторинга природных пожаров // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2015. Т. 12. № 4. С. 7–16.
- [13] Кобец Д.А., Балашов И.В., Данилов И.Д., Лупян Е.А., Сычугов И.Г., Толпин В.А. Использование VI-технологий для создания инструментов для анализа данных спутникового мониторинга // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2015. Т. 12. № 4. С. 17–27.
- [14] Коровин Г.Н., Андреев Н.А. Авиационная охрана лесов. М.: Агропромиздат, 1988. 223 с.
- [15] Лупян Е.А., Савин И.Ю., Барталев С.А., Толпин В.А., Балашов И.В., Плотников Д.Е. Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности («ВЕГА») // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2011. Т. 8. № 1. С. 190–198.
- [16] Пономарев Е.И., Харук В.И. Горимость лесов Алтае-Саянского региона Сибири в условиях наблюдаемых изменений климата // *Сибирский экологический журнал*, 2016. № 1. С. 38–46. DOI:10.15372/SEJ20160104

- [17] Пономарев Е.И., Швецов Е.Г. Спутниковое детектирование лесных пожаров и геоинформационные методы калибровки результатов // Исследование Земли из космоса, 2015. № 1. С. 84–91. DOI:10.7868/S0205961415010054
- [18] Стыщенко Ф.В., Баргалева С.А., Егоров В.А., Лупян Е.А. Метод оценки степени повреждения лесов пожарами на основе спутниковых данных MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2013. Т. 10. № 1. С. 254–266.
- [19] Стыщенко Ф.В., Баргалева С.А., Иванова А.А., Лупян Е.А., Сычугов И.Г. Возможности оценки площадей лесных пожаров в регионах России на основе данных спутникового детектирования активного горения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2016. Т. 13. № 6. С. 189–298. DOI:10.21046/2070-7401-2016-13-6-289-298
- [20] Merlin M.D., Juvik J.O. Relationship among native and alien plants on pacific islands with and without significant human disturbance and feral ungulates // Alien plant invasions in native ecosystem of Hawaii. Univ. of Hawaii, 1992, pp. 597–624.
- [21] Jordan C.F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor // Ecology, 1969, v. 50, no. 4, pp. 663–666.
- [22] Ajai, Kamat D.S., Chaturvedi G.S., Singh A.K., Sinha S.K. Spectral assessment of leaf area index, chlorophyll content, and biomass of chickpea // Photogrammetric engineering and remote sensing, 1983, v. 49, no. 12, pp. 1721–1727.
- [23] Curran P.J. Multispectral remote sensing for the estimation of green leaf area index // Philosophical Transactions, 1983, v. 309, pp. 257–270.
- [24] Baret F., Champion I., Guyot G., Podaire A. Monitoring wheat canopies with a high spectral resolution radiometer // Remote Sens. Environ., 1987, v. 22, no. 2, pp. 367–378.
- [25] Kasischke E.S., French H.F. Locating and estimating the areal extent of wildfires in Alaskan boreal forests using multiple-season AVHRR NDVI composite data // Remote Sens. Environ., 1995, v. 51, no. 2, pp. 263–275.
- [26] Fernandez A., Illera P., Casanova J.L. Automatic mapping of surfaces affected by forest fires in Spain using AVHRR NDVI composite image data // Remote Sens. Environ., 1997, v. 60, no. 2, pp. 153–162.
- [27] Pereira J.M.C. A comparative evaluation of NOAA/AVHRR vegetation indexes for burned surface detection and mapping // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens., 1999, v. 37, no. 1, pp. 217–226.
- [28] Chuvieco E., Martin M.P., Palacios E.A. Assessment of different spectral indices in the red near-infrared spectral domain for burned land discrimination // Int. J. Remote Sens., 2002, v. 23, pp. 5103–5110.
- [29] Frampton W.J., Dash J., Watmough G., Milton E.J. Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013, v. 82, pp. 83–92.
- [30] Hill M.J. Vegetation index suites as indicators of vegetation state in grassland and savanna: An analysis with simulated Sentinel-2 data for a North American transect // Remote Sens. Environ., 2013, v. 137, pp. 94–111.
- [31] van Wagtenonk J.W., Root R.R., Key C.H. Comparison of AVIRIS and Landsat ETM+ detection capabilities for burn severity // Remote Sens. Environ., 2004, v. 92, no. 3, pp. 397–408.
- [32] Cocke A.E., Fule P.Z., Crouse J.E. Comparison of burn severity assessments using differenced normalized burn ratio and ground data // Int. J. Wildland Fire, 2005, v. 14, pp. 189–198.
- [33] Epting J., Verbyla D., Sorbel B. Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM+ // Remote Sens. Environ., 2005, v. 96, no. 3–4, pp. 328–339.
- [34] Escuin S., Navarro R., Fernandez P. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from Landsat TM/ETM images. // Int. J. Remote Sens., 2008, v. 29, no. 4, pp. 1053–1073.
- [35] Fernandez-Manso A., Fernandez-Manso O., Quintano C. Sentinel-2A red-edge spectral indices suitability for discriminating burn severity // Int. J. App. Earth Obs. Geoinf., 2016, v. 50, pp. 170–175.
- [36] Беляев М.Ю., Коротков Д.М., Кузьмичев А.С., Ни-коленко А.А., Черемисин М.В., Шибанов С.Ю., Щербаков М.В., Щербина Г.А. Дистанционное зондирование Земли с Российского сегмента МКС с использованием перспективной научной аппаратуры Гиперспектрометр // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Материалы 17-й Всерос. открытой конф. Москва, 11–15 ноября 2019 г. М.: ИКИ РАН, 2019. 508 с.
- [37] Беляев М.Ю. Научная аппаратура и методы изучения Земли в космическом эксперименте «Ураган» на Международной космической станции // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2021. Т. 18. № 3. С. 92–107.
- [38] Беляев М.Ю. Изучение Земли в эксперименте «Ураган» // Земля и Вселенная, 2024. № 2. С. 24–43.

Сведения об авторах

Беляев Михаил Юрьевич [✉] — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы автоматического управления», ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал); науч. руководитель космического эксперимента «Ураган», ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева» («РКК «Энергия»), mikhail.belyaev@rsce.ru

Есаков Алексей Михайлович — аспирант, инженер-программист Центра полезной нагрузки, ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева» («РКК «Энергия»), aleksey.esakov2@rsce.ru

Ильясов Хисам Хисамович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., ФГБОУ «Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук» (ИПМех РАН), ilyasov@ipmnet.ru

Назайкинский Владимир Евгеньевич — д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН, гл. науч. сотр., ФГБОУ «Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук» (ИПМех РАН)

Поступила в редакцию 28.04.2025.

Одобрено после рецензирования 15.09.2025.

Принята к публикации 21.01.2026.

USE OF SPECTRAL AND PHOTOGRAPHIC IMAGES FROM SPACE TO MONITOR WILDFIRES

M.Y. Belyaev^{1, 2✉}, A.M. Esakov², H.H. Il'yasov³, V.E. Nazaykinskiy³

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

²Rocket and Space Corporation Energia, named after S.P. Korolev, 4a, Lenin st., 141070, Korolev, Moscow reg., Russia

³A.Y. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, 101, bld. 1, Vernadsky av., 119526, Moscow, Russia

mikhail.belyaev@rsce.ru

This paper describes methods for using spectral images and satellite photographs to determine the flame front and burnt area boundaries during fire monitoring. Data from the spectral systems of the Sentinel-2 and Landsat-8 satellites, as well as photographs from the International Space Station (ISS) obtained during the Uragan and Scenario space experiments, are used. Data obtained during the 2020 fire on Kahoolawe Island, part of the Hawaiian Islands, are processed and analyzed. The possibility of combining these different types of data to assess fire dynamics is demonstrated.

Keywords: wildfires, spectral data, photographs from space, flame front, scorched areas, vegetation indexes

Suggested citation: Belyaev M.Yu., Esakov A.M., Il'yasov H.H., Nazaykinskiy V.E. *Sovmestnoe ispol'zovanie spektral'nykh i fotograficheskikh snimkov iz kosmosa dlya monitoringa pozharov* [Use of spectral and photographic images from space to monitor wildfires]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2026, vol. 30, no. 2, pp. 43–57. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-2-43-57


References

- [1] Garcia M.J.L., Caselles V. Mapping burns and natural reforestation using thematic mapper data // *Geocarto Int.*, 1991, v. 6, no. 1, pp. 31–37.
- [2] Wind B., Justice C.O., Vadrevu K.P., Ellicott E., Schroeder W. Active fires from the Suomi NPP visible infrared imaging radiometer suite: product status and first evaluation results. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 2014, v. 119, pp. 803–816.
- [3] Mamedaliev V.M. *Izmenenie lesnykh massivov severo-vostochnogo regiona Azerbaydzhana po kosmicheskim snimkam* [Changes in woodlands of north-eastern region of Azerbaijan according to images from space]. *Russian Forestry J.*, 2022, no. 1, pp. 88–97.
- [4] Bartalev S.A., Ershov D.V., Korovin G.N., Kotel'nikov R.V., Lupyan E.A., Shchetinskiy V.E. *Informatsionnaya sistema distantsionnogo monitoringa lesnykh pozharov Federal'nogo agentstva lesnogo khozyaystva RF (sostoyanie i*

- perspektivy razvitiya*) [Information system for remote monitoring of forest fires of the RF Federal Forest Management Agency (current status and prospects for further development)]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in Earth remote sensing], 2008, v. 2, pp. 419–429.
- [5] Bartalev S.A., Ershov D.V., Korovin G.N., Kotelnikov R.V., Lupyan E.A., Shchetinskiy V.E. *Osnovnye vozmozhnosti i struktura informatsionnoy sistemy distantsionnogo monitoringa lesnykh pozharov Federal'nogo agentstva lesnogo khozyaystva (ISDM Rosleskhoz)* [Core capabilities and architecture of the Information System for Remote Monitoring of forest fires of the Federal Forest Management Agency (ISRM Rosleskhoz)]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in Earth remote sensing], 2010, v. 7, no. 2, pp. 97–105.
- [6] Bartalev S.A., Egorov V.A., Ershov D.V., Isaev A.S., Lupyan E.A., Plotnikov D.E., Uvarov I.A. *Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii po dannym spektrometriya MODIS* [Satellite mapping of Russia's vegetation cover using data from MODIS Spectroradiometer]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in Earth remote sensing], 2011, v. 8, no. 4, pp. 285–302.
- [7] Bartalev S.A., Egorov V.A., Efremov V.Yu., Lupyan E.A., Stytsenko F.V., Flitman E.V. *Otsenka ploshchadi pozharov na osnove kompleksirovaniya sputnikovykh dannykh razlichnogo prostranstvennogo razresheniya MODIS i Landsat-TM/ETM+* [Estimation of surface area covered by wildfires based on integration of satellite data of different spatial resolution from MODIS and Landsat-TM/ETM+]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in Earth remote sensing], 2012, v. 9, no. 2, pp. 9–27.
- [8] Bartalev S.A., Lupyan E.A., Stytsenko F.V., Panova O.Yu., Efremov V.Yu. *Ekspress-kartografirovaniye povrezhdeniy lesov Rossii pozharami po sputnikovym dannym Landsat* [Instant mapping of damage to Russia's forests using satellite data from Landsat]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in Earth remote sensing], 2014, v. 11, no. 1, pp. 9–20.
- [9] Bartalev S.A., Stytsenko F.V., Egorov V.A., Lupyan E.A. *Sputnikovaya otsenka gibeli lesov Rossii ot pozharov* [Satellite-based estimate of loss of forests in Russia caused by wildfires]. *Lesovedenie* [Forestry], 2015, no. 2, pp. 83–94.
- [10] Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Lupyan E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Shabanov N.V. *Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii* [Satellite mapping of Russia's vegetative cover]. Moscow: IKI RAS, 2016, 208 p.
- [11] Buryak L.V., Sukhinin A.I., Kalenskaya O.P., Ponomarev E.I. *Posledstviya pozharov v lentochnykh borakh yuga Sibiri* [Fire effects in ribbon forests of Southern Siberia]. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal* [Siberian Environmental J.], 2011, v. 18, no. 3, pp. 331–339.
- [12] Kashnitskiy A.V., Lupyan E.A., Bartalev S.A., Bartalev S.S., Balashov I.V., Efremov V.Yu., Stytsenko F.V. *Optimizatsiya interaktivnykh protsedur kartografirovaniya garey v informatsionnykh sistemakh distantsionnogo monitoringa prirodnykh pozharov* [Optimizing interactive procedures for mapping burned-out forests in information systems for remote monitoring of wildfires]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in Earth remote sensing], 2015, v. 12, no. 4, pp. 7–16.
- [13] Kobets D.A., Balashov I.V., Danilov I.D., Lupyan E.A., Sychugov I.G., Tolpin V.A. *Ispol'zovanie VI-tekhnologiy dlya sozdaniya instrumentov dlya analiza dannykh sputnikovogo monitoring* [Use of BI-technologies to develop tools for analyzing satellite monitoring data]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in Earth remote sensing], 2015, v. 12, no. 4, pp. 17–27.
- [14] Korovin G.N., Andreev N.A. *Aviatsionnaya okhrana lesov* [Aerial forest conservation]. Moscow: Agropromizdat [Agropromizdat], 1988, 223 p.
- [15] Lupyan E.A., Savin I.Yu., Bartalev S.A., Tolpin V.A., Balashov I.V., Plotnikov D.E. *Sputnikovyy servis monitoringa sostoyaniya rastitel'nosti («VEGA»)* [Satellite service of monitoring vegetation condition («VEGA»)] *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in Earth remote sensing], 2011, v. 8, no. 1, pp. 190–198.
- [16] Ponomarev E.I., Kharuk V.I. *Gorimost' lesov Altae-Sayanskogo regiona Sibiri v usloviyakh nablyudaemykh izmeneniy klimata* [Frequency of fire occurrence in the forests of Altai-Sayans region of Siberia under conditions of observed climate changes]. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal* [Siberian Environmental J.], 2016, no 1, pp. 38–46. DOI:10.15372/SEJ20160104
- [17] Ponomarev E.I., Shvetsov E.G. *Sputnikovoe detektirovaniye lesnykh pozharov i geoinformatsionnye metody kalibrovki rezul'tatov* [Satellite detection of forest fires and geoinformation methods of calibrating the results]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [Earth Studies from Space], 2015, no. 1, pp. 84–91. DOI:10.7868/S0205961415010054
- [18] Chtytsenko F.V., Bartalev S.A., Egorov V.A., Lupyan E.A. *Metod otsenki stepeni povrezhdeniya lesov pozharami na osnove sputnikovykh dannykh MODIS* [A method for estimating the level of fire damage to forests based on MODIS satellite data]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in Earth remote sensing], 2013, v. 10, no. 1, pp. 254–266.
- [19] Stytsenko F.V., Bartalev S.A., Ivanova A.A., Lupyan E.A., Sychugov I.G. *Vozmozhnosti otsenki ploshchadey lesnykh pozharov v regionakh Rossii na osnove dannykh sputnikovogo detektirovaniya aktivnogo goreniya* [Feasibility of estimating surface area of wildfires based on data of satellite detection of active combustion]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in Earth remote sensing], 2016, v. 13, no. 6, pp. 189–298. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-289-298
- [20] Merlin M.D., Juvik J.O. Relationship among native and alien plants on pacific islands with and without significant human disturbance and feral ungulates. Alien plant invasions in native ecosystem of Hawaii. Univ. of Hawaii, 1992, pp. 597–624.
- [21] Jordan C.F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, 1969, v. 50, no. 4, pp. 663–666.

- [22] Ajai, Kamat D.S., Chaturvedi G.S., Singh A.K., Sinha S.K. Spectral assessment of leaf area index, chlorophyll content, and biomass of chickpea. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 1983, v. 49, no. 12, pp. 1721–1727.
- [23] Curran P.J. Multispectral remote sensing for the estimation of green leaf area index. *Philosophical Transactions*, 1983, v. 309, pp. 257–270.
- [24] Baret F., Champion I., Guyot G., Podaire A. Monitoring wheat canopies with a high spectral resolution radiometer. *Remote Sens. Environ.*, 1987, v. 22, no. 2, pp. 367–378.
- [25] Kasischke E.S., French H.F. Locating and estimating the areal extent of wildfires in Alaskan boreal forests using multiple-season AVHRR NDVI composite data. *Remote Sens. Environ.*, 1995, v. 51, no. 2, pp. 263–275.
- [26] Fernandez A., Illera P., Casanova J.L. Automatic mapping of surfaces affected by forest fires in Spain using AVHRR NDVI composite image data. *Remote Sens. Environ.*, 1997, v. 60, no. 2, pp. 153–162.
- [27] Pereira J.M.C. A comparative evaluation of NOAA/AVHRR vegetation indexes for burned surface detection and mapping. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 1999, v. 37, no. 1, pp. 217–226.
- [28] Chuvieco E., Martin M.P., Palacios E.A. Assessment of different spectral indices in the red near-infrared spectral domain for burned land discrimination. *Int. J. Remote Sens.*, 2002, v. 23, pp. 5103–5110.
- [29] Frampton W.J., Dash J., Watmough G., Milton E.J. Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, v. 82, pp. 83–92.
- [30] Hill M.J. Vegetation index suites as indicators of vegetation state in grassland and savanna: An analysis with simulated Sentinel 2 data for a North American transect. *Remote Sens. Environ.*, 2013, v. 137, pp. 94–111.
- [31] van Wagtenonk J.W., Root R.R., Key C.H. Comparison of AVIRIS and Landsat ETM+ detection capabilities for burn severity. *Remote Sens. Environ.*, 2004, v. 92, no. 3, pp. 397–408.
- [32] Cocks A.E., Fule P.Z., Crouse J.E. Comparison of burn severity assessments using differenced normalized burn ratio and ground data. *Int. J. Wildland Fire*, 2005, v. 14, pp. 189–198.
- [33] Epting J., Verbyla D., Sorbel B. Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM+. *Remote Sens. Environ.*, 2005, v. 96, no. 3–4, pp. 328–339.
- [34] Escuin S., Navarro R., Fernandez P. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from Landsat TM/ETM images. *Int. J. Remote Sens.*, 2008, v. 29, no. 4, pp. 1053–1073.
- [35] Fernandez-Manso A., Fernandez-Manso O., Quintano C. Sentinel-2A red-edge spectral indices suitability for discriminating burn severity. *Int. J. App. Earth Obs. Geoinf.*, 2016, v. 50, pp. 170–175.
- [36] Belyaev M.Yu., Korotkov D.M., Kuz'michev A.S., Nikolenko A.A., Cheremisin M.V., Shibanov S.Yu., Shcherbakov M.V., Shcherbina G.A. *Distsionnoye zondirovaniye Zemli s Rossiyskogo segmenta MKS s ispol'zovaniem perspektivnoy nauchnoy apparatury Giperspektrometr* [Earth remote sensing from the ISS Russian Segment using advanced scientific equipment HyperSpectrometer] *Materialy 17-y Vseros. otkrytoy konf. «Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa»* [Proceedings of the 17th All-Russia Open Conference «Current problems in Earth remote sensing from space»]. Moscow, November 11–15, 2019. Moscow: IKI RAN, 2019, 508 p.
- [37] Belyaev M.Yu. *Nauchnaya apparatura i metody izucheniya Zemli v kosmicheskoy eksperimente «Uragan» na Mezhdunarodnoy kosmicheskoy stantsii* [Scientific equipment and methods for studying Earth in the Uragan space experiment onboard the International Space Station]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in Earth remote sensing], 2021, t. 18, no. 3, pp. 92–107.
- [38] Belyaev M.Yu. *Izucheniye Zemli v eksperimente «Uragan»* [Studying Earth in the «Uragan» experiment]. *Zemlya i Vselennaya* [Earth and Universe], 2024, no. 2, pp. 24–43.

Authors' information

Belyaev Mikhail Yur'evich  — Dr. Sci. (Tech.), Professor, Head of Chair «Automatic Control Systems» of the BMSTU (Mytishchi branch); Research Supervisor of the Space experiment «Uragan», Rocket and Space Corporation Energia, named after S.P. Korolev, mikhail.belyaev@rsce.ru

Esakov Aleksey Mikhaylovich — pg., Software Engineer of the Payload Center of the Rocket and Space Corporation Energia, named after S.P. Korolev, aleksey.esakov2@rsce.ru

Ilyasov Hisam Hisamovich — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher of the Institute for Problems in Mechanics of RAS, ilyasov@ipmnet.ru

Nazaykinskiy Vladimir Evgen'evich — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Corresponding member of RAS, Chief Researcher of the Institute for Problems in Mechanics of RAS

Received 28.04.2025.

Approved after review 15.09.2025.

Accepted for publication 21.01.2026.

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

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА ОЗЕЛЕНЕНИЯ ГОРОДА БОБРОВА ВОРОНЕЖСКОЙ ОБЛАСТИ С УЧЕТОМ ОБРАЗОВАНИЯ ТУРИСТСКО-РЕКРЕАЦИОННОГО КЛАСТЕРА

В.В. Кругляк^{1✉}, Е.И. Гурьева²

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, 394087, г. Воронеж, ул. Мичурина, д. 1

²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Россия, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84

kruglyak_vl@mail.ru

Предложена концептуальная модель адаптивной системы озеленения Центрально-Черноземного экономического района (на примере города Боброва). Используются данные о городе Боброве как победителе Всероссийского конкурса лучших проектов создания комфортной городской среды. Представлена схема туристических маршрутов Бобровского района. Приведены общие сведения о городе Боброве Воронежской области. Рассмотрены объекты архитектурного наследия города Боброва. Указаны типичные ключевые проблемы малых городов России. Проанализирован малый исторический город России Бобров, который входит в список исторических городов. Выполнен ландшафтно-визуальный анализ проектируемой территории на основании Генерального плана городского поселения — город Бобров Бобровского муниципального района Воронежской области. Разработана схема развития культурного и исторического каркаса города Боброва. Установлен природный каркас Бобровского муниципального района.

Ключевые слова: адаптивная система озеленения, город Бобров, туристско-рекреационный кластер

Ссылка для цитирования: Кругляк В.В., Гурьева Е.И. Адаптивная система озеленения города Боброва Воронежской области с учетом образования туристско-рекреационного кластера // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2026. Т. 30. № 2. С. 58–75. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-2-58-75

Малые города являются множественной категорией населенных пунктов, характеризуются как стабильная группа и представляют собой важный компонент отечественного «городского каркаса». Большая часть малых городов обладает статусом исторических [1]. В отличие от относительно недавно сформированных малых городов малый исторический город — это особый тип сообщества, в котором в значительной мере сохранился отечественный историко-общекультурный потенциал, способный обновляться в наше время [2].

В современной российской туристической сфере все более увеличивается значимость именно малых исторических городов [3]. В связи с этим их развитие приобрело актуальность. Еще в 2017 г. Минстроем России был объявлен конкурс «Исторические поселения и малые города». Его цель заключалась в поддержке проектов по формированию красивых городских пространств, способствующих повышению качества жизни, привлечению в малые города рекреантов, развитию туристических услуг [4].

Поскольку в Воронежской области есть малые исторические города, они помогут повысить ее туристическую привлекательность с помощью трактования туристической индустрии (в том числе рекреационного и лечебного, культурно-познавательного и деревенского, спортивного и экстремального туризма, паломничества) как фактора формирования региона с точки зрения экологической активности, архитектурно-градостроительной деятельности и социального проектирования [5].

Предпосылки к формированию туристско-рекреационного кластера на территории Воронежской области и проблематика с ним связанная. Кластерное развитие является инструментом интеграции региональной туристической инфраструктуры и координации деятельности различных участников рынка туризма [6]. В Воронежской области есть все необходимые условия для развития туристической индустрии. Регион расположен на пересечении важных транспортных магистралей, имеет развитую инфраструктуру и достаточное количество туристических объектов [7]. Однако имеющиеся ресурсы недостаточно эффективно используются вследствие отсутствия единой

стратегии развития туризма в регионе. Кроме того, нет четкой координации деятельности муниципальных и туристических компаний, что затрудняет создание устойчивой туристической индустрии [8].

В рамках формирования туристско-рекреационного кластера (ТРК) в Воронежской области необходимо решить следующие задачи:

- определить основные виды туризма, которые можно развивать в регионе, и выделить его приоритетные направления;

- создать инфраструктуру для развития выбранных направлений туризма, включая гостиничное размещение, ресторанный индустрию, транспорт;

- определить стратегию продвижения Воронежской области как туристического направления на федеральном и международном уровне, сформировать образ территории, разработать соответствующий брендинг и имидж туристических услуг.

Одной из основных проблем, препятствующих развитию туризма в Воронежской области, является недостаточная информированность туристов о возможностях, предоставляемых регионом [9]. Для решения этой проблемы требуется создать единую информационную базу с информацией о туристических объектах, мероприятиях, достопримечательностях, транспорте и размещении. Это позволит повысить привлекательность региона для туристов и увеличить их число [10].

Формирование ТРК на территории Воронежской области может стать решением проблем, связанных с недостаточным использованием туристических ресурсов региона [11], позволит интегрировать региональную туристическую инфраструктуру, повысить привлекательность региона для туристов и развить устойчивую туристическую индустрию [12].

Примеры инновационных проектов ТРК включают в себя создание туристических инфраструктурных комплексов на базе природных ресурсов, сооруженных с использованием новейших решений и энергосберегающих технологий [13]. Кроме того, на базе зданий и территорий, адаптированных к различным потребностям посетителей разрабатываются проекты создания центров активного отдыха, в том числе спортивных, развлекательных, образовательных и культурных [14]. Другие проекты ТРК нацелены на развитие экологического и устойчивого туризма и предусматривают использование экологически чистых технологий и материалов [15], а также на создание социально-культурных центров, [16] обеспечивающих доступность туристических услуг для различных слоев насе-

ления [17], многие из которых реализуются согласно Федеральной целевой программе (ФЦП) «Развитие внутреннего и въездного туризма в Российской Федерации (2019–2025 годы)», утвержденной распоряжением Правительства России от 5 мая 2018 года № 872-р [18].

Цель работы

Цель работы — разработка концепции развития города Боброва Воронежской области на основании адаптивных систем озеленения с учетом образования туристско-рекреационного кластера.

Объекты и методы исследования

Объектом исследований послужило городское поселение город Бобров Бобровского района Воронежской области (рис. 1) [19].

Планировка Боброва в XVIII в. формировалась под воздействием отличительных черт рельефа и проездных путей [20]. Окончательно село Бобровское приобрело статус города в 1779 г., с открытием Воронежского наместничества [21]. В конце XVIII в. г. Бобров, как и сотня других Отечественных городов, подвергся административному градостроительному урегулированию, которое включает в себя такие объекты, как Никольская церковь (1782), Дмитриевский скит (1802), здания бывшей духовной семинарии (1822) и частных городских усадеб [22]. При проведении исследований были использованы методики системных исследований лесоаграрных ландшафтов [23], модели архитектурной рекреационных насаждений [24], методики градостроительного обследования [25], информационное моделирование [26, 27], технологии создания кластеров [28], маркетинга туризма [29], конкурентной способности туризма [30]. Соблюдены требования СанПиН 1.2.3685–21. Дендрологические обследования проведены по методике В.В. Кругляк, Е.И. Гурьевой. Обоснован дизайн парковой зоны города [33], метод визуально-ландшафтной оценки территорий [34], технологии реконструкции насаждений [35], планировочные предпосылки рационального природопользования города [36]. Градостроительная организация ландшафта города обоснована по данным А.Г. Большакова (2003). Проведены ландшафтно-экологические исследования [38, 39], ландшафтно-рекреационные исследования [40].

В первые десятилетия XX в. г. Бобров стал крупным промышленным центром Воронежской губернии. В 1912 г. здесь был открыт первый завод по производству сахара, а к началу

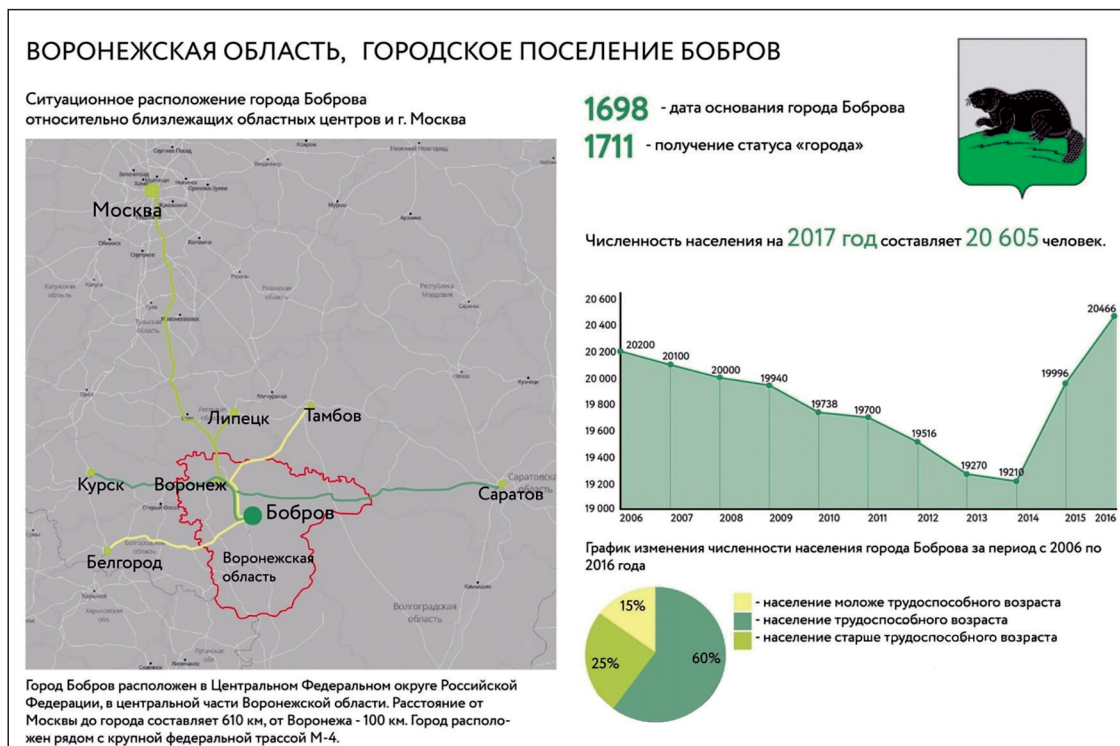


Рис. 1. Общие сведения о г. Боброве, по данным Администрации городского поселения города Боброва Бобровского муниципального района Воронежской области: <https://bobrov-r20.gosweb.gosuslugi.ru/> (дата обращения 28.12.2017 г.)

Fig. 1. General information about Bobrov city, according to the Administration of the urban settlement of Bobrov, Bobrovsky Municipal District, Voronezh Region. URL: <https://bobrov-r20.gosweb.gosuslugi.ru/> (accessed 28.12.2017)

1920-х гг. на территории Бобровского района уже функционировало около 30 промышленных предприятий. В 1930-е годы в городе была построена маслобойня и цех по производству оптических приборов, а с 1950-х годов началось развитие машиностроительной отрасли.

Комплекс воинской части, занявшей практически целую бывшую Базарную площадь, в настоящее время искажает восприятие исторической застройки, «разбивая» ее на локальные участки улиц, тем не менее современный г. Бобров как исторический город обладает значительным архитектурным наследием (рис. 2).

В настоящее время Бобров является крупным промышленным центром Центрально-Черноземного экономического района, где работают предприятия в различных отраслях промышленности, включая машиностроение и производство металлоконструкций, предприятия текстильной и пищевой промышленности, а также строительной отрасли. В городе находятся музей истории города, архитектурно-художественный музей, выставочный зал, кинотеатр и другие культурные и спортивные объекты.

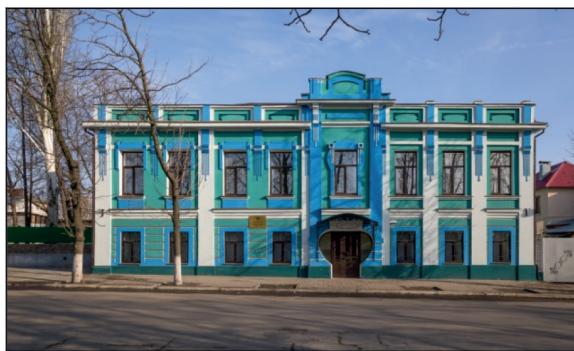
В ходе работ была использована модель и следующие методы исследования (рис. 3):

- 1) градостроительный анализ;
- 2) дендрологический анализ;
- 3) ретроспективный анализ;
- 4) ландшафтно-визуальный анализ;
- 5) функциональное зонирование территории;

6) анализ расположения предприятий малого и среднего бизнеса, производственных предприятий.

Проведенные нами градостроительный анализ и оценка условий и предпосылок формирования кластерной структуры позволили выявить следующие недостатки:

- 1) наличие большого количества ветхого жилья, не подлежащего реконструкции;
- 2) несоответствие центральной улицы современным стандартам;
- 3) неприспособленность к пешеходному движению, необеспеченность благоустроенными пешеходными связями маломобильных групп населения;
- 4) отсутствие современного благоустройства;
- 5) однообразие и неразвитость общественных центров;
- 6) плачевное состояние многих памятников архитектуры.



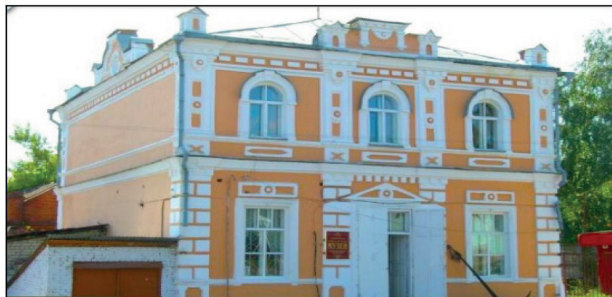
а



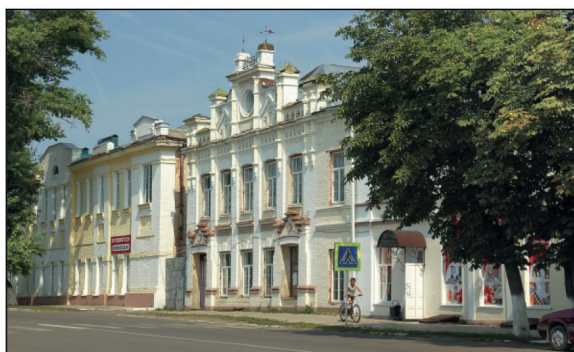
б



в



г



д



е



ж



з

Рис. 2. Архитектурное наследие г. Бобров: *а* — городская управа начала XIX в.; *б* — городская управа 1899 г.; *в* — городская администрация начала XIX в.; *г* — краеведческий музей; *д* — воинская часть; *е* — интернат; *ж* — школа № 1; *з* — школа № 3

Fig. 2. Architectural heritage of Bobrov: *a* — town hall, early 19th century; *б* — town hall, 1899; *в* — town administration, early 19th century; *г* — local history museum; *д* — military unit; *е* — boarding school; *ж* — school no. 1; *з* — school no. 3



Рис. 3. Модель исследований
Fig. 3. Research model

Наряду с имеющимися проблемами, г. Бобров занял достойное место в рейтинге по количеству зеленых зон среди других российских городов. В городе имеются линейные зеленые насаждения, парки, лесопарки, внутриквартальное озеленение — все это в совокупности составляет значительную площадь зеленых территорий. Адаптивная система озеленения сделала город Бобров привлекательным местом для проживания и отдыха жителей и туристов. Согласно рейтингу город — экологически чистый и благоприятный для проживания.

В результате проведенных исследований были разработаны рекомендации по проектированию неаллергенного озеленения [41], сохранению зеленых насаждений [42], улучшению градостроительной ситуации, развитию инфраструктуры и социальной сферы с использованием основных тенденций ландшафтной архитектуры [43, 44], а также по стимулированию развития малого и среднего бизнеса на данной территории.

Результаты и обсуждение

Ретроспективный анализ центральной части города показал, что памятники архитектуры конца XIX — начала XX вв. составляют в г. Боброве 83 %, 6 % приходится на начало XX в., около 1 % — на конец XIX в. (рис. 4).

Результатом ретроспективного анализа стала графическая реконструкция с разработкой схемы

развития культурного и исторического каркаса города Бобров.

Главной проблемой всех малых городов России (МГР), включая объект исследования, считается непрерывный отток населения в более крупные города вследствие отсутствия градообразующих объектов, что непосредственно связано с дефицитом рабочих мест (рис. 5).

Концептуальная модель адаптивной системы озеленения Центрально-Черноземного экономического района (применительно к городу Боброву и Бобровскому району Воронежской области), приведена на рис. 6.

Методика создания туристских кластеров. Создание ТРК в пределах Воронежской области предусматривает четыре этапа.

Первый этап — предпроектные работы, устанавливающие основные принципы построения кластера, его цели и задачи.

Второй этап — подготовка кластера, на котором определяются и описываются основные блоки кластера, проводятся маркетинговые исследования, анализ конкурентов и потенциальных потребителей туристических услуг, создаются необходимые инфраструктура и сервисы, проводятся мероприятия по повышению квалификации персонала.

Третий этап — запуск туристского кластера, на котором происходит старт туристических программ и маршрутов, проводятся мероприятия по привлечению туристов и продвижению кластера на рынке, осуществляются контроль

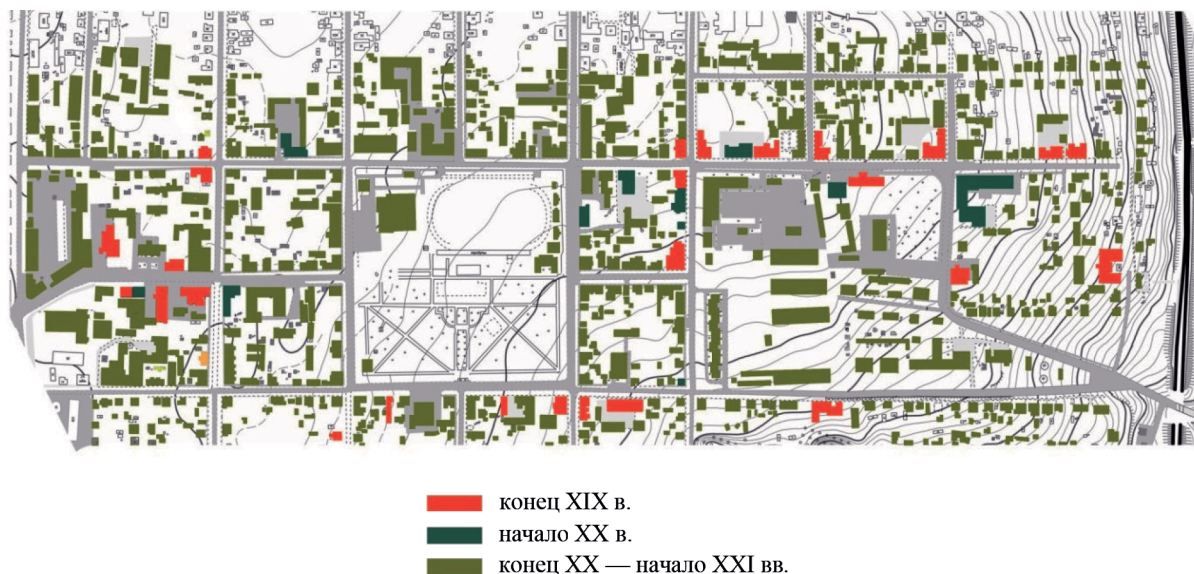


Рис. 4. Ретроспективный анализ (руководитель проекта Е.И. Гурьева, исполнитель Н.В. Паршакова)
 Fig. 4. Retrospective analysis (project manager E.I. Guryeva, implementer N.V. Parshakova)

и мониторинг функционирования кластера в целях устранения возможных проблем и улучшения качества предоставляемых услуг.

Четвертый этап — продолжение развития кластера, на котором осуществляется постоянная модернизация кластера, создаются новые продукты и маршруты, а также расширяются границы территории кластера, проводятся мероприятия по сохранению туристических потоков и их расширению, привлечению новых масс туристов, направленные на улучшение качества предоставляемых услуг и увеличение доходности кластера.

Формирование ТРК представляет собой сложный процесс, требующий комплексного подхода и охватывающий множество аспектов. При рациональной организации и оптимальной реализации кластерная модель может стать эффективным инструментом развития туристической отрасли и привести к значительному экономическому росту. Уникальные природные объекты делают поселение привлекательным для путешествий и отдыха на природе.

Для организации водного туризма на р. Битюг возможно использование катамаранов, каяков, плотов, а также организация рыбалок и пикников на берегу реки. Для развития экологического туризма возможны экскурсии по реке, наблюдение за дикой природой и фотосафари.

При перспективном планировании развития рекреации в городском поселении, следует учитывать природные особенности (рис. 7), благоприятные климатические условия и относительно спокойный рельеф.



Рис. 5. Типичные ключевые проблемы малых городов России

Fig. 5. Typical key problems of small towns in Russia



Рис. 6. Концептуальная модель адаптивной системы озеленения Центрально-Черноземного экономического района

Fig. 6. Conceptual model of an adaptive system of greening for the Central Black Earth Economic Region

Одним из основных инструментов регулирования градостроительной деятельности является функциональное зонирование территории, которое определяет условия ее использования. Ключевым элементом функционального зонирования является установление зон рекреации с различными ограничениями по использованию территории и ее защите. Важно учитывать биологические и природные особенности территории в целях сохранения экосистемы и не обуславливать негативные последствия для окружающей среды. Необходимо проводить мониторинг состояния экологической обстановки и принимать меры по ее улучшению, создавать специальные зоны для охраны рек, лесов, животного и растительного мира.

Предложения по функциональному использованию территории разработаны с учетом

сложившейся и перспективной планировочной структуры городского поселения Бобров, планировочных ограничений, требований Градостроительного кодекса Российской Федерации. В Генеральном плане г. Бобров на перспективу запланировано развитие следующих функциональных зон:

- 1) жилые зоны — в северно-западной части;
- 2) общественно-деловые зоны — в центральной и северо-западной части;
- 3) производственные зоны — в северо-западной части;
- 4) зоны инженерной и транспортной инфраструктуры — развитие во всех частях города;
- 5) рекреационные зоны — запланировано благоустройство сложившихся участков рекреации и создание нового участка в южной и западных частях;

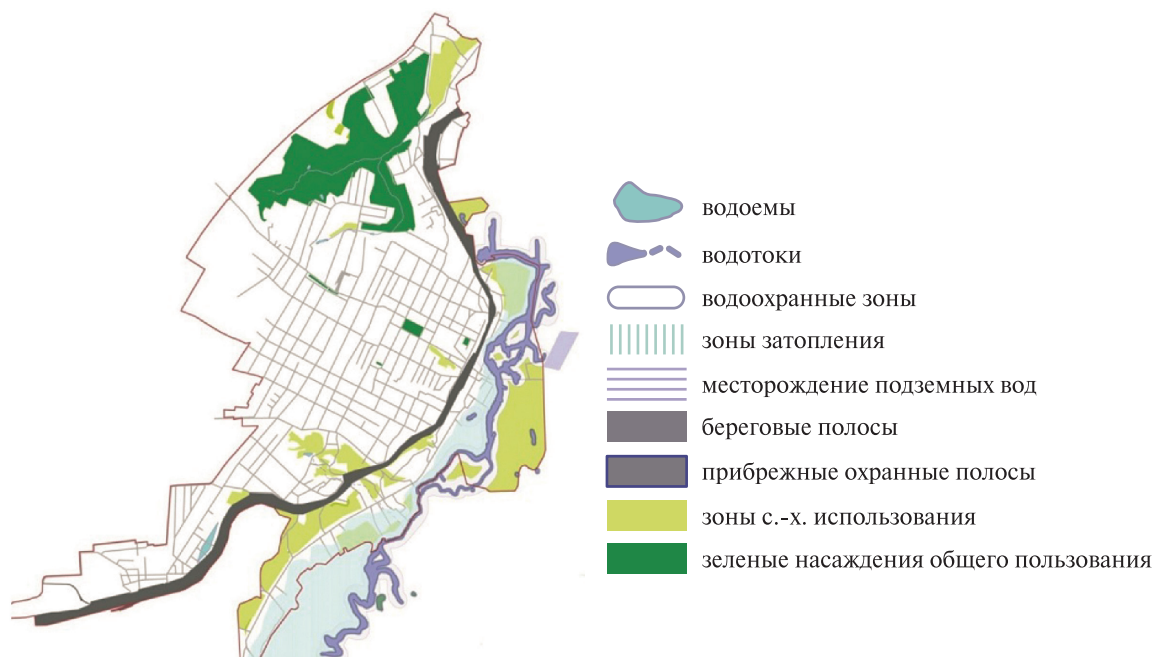


Рис. 7. Ландшафтно-визуальный анализ проектируемой территории (выполнен на основании Генерального плана городского поселения — город Бобров, Бобровского муниципального района Воронежской области)

Fig. 7. Landscape and visual analysis of the planned area (based on the General Plan of the urban settlement of Bobrov, Bobrovsky Municipal District, Voronezh Region)

6) зона сельскохозяйственного использования — на территории населенного пункта не предполагается;

7) зоны специального назначения на территории города представлены местами размещения кладбищ и водозаборных сооружений, расположенных в г. Бобров.

Анализ документов Генерального плана позволил разработать схему развития культурного и исторического каркаса города общественно-деловой зоны в центральной части города (рис. 8).

Концептуальная модель предполагает создание полностью пешеходной улицы в центре города с включением существующих объектов архитектуры, объектов бизнеса, с выходом к реке через благоустроенную набережную. При этом сложившаяся сетка улиц и дорог города представляет собой исторический памятник, поскольку была утверждена еще императрицей Екатериной II, однако все предлагаемые изменения городского каркаса не нанесут вред историко-культурному наследию города.

Город Бобров расположен на р. Битюг в Воронежской области. Он имеет богатую историю и обладает культурным наследием, связанным с его природным каркасом. Главной достопримечательностью Боброва является ландшафт — город окружают леса с разнообразными представителями флоры и фауны,

множество рек, озер, прудов и родников, есть парки, сады, аллеи. Перечисленные объекты обеспечивают уникальную экологическую среду, поэтому город Бобров является одним из лучших для пеших и велосипедных прогулок, экологического туризма и отдыха на природе.

Выполнение работ в соответствии с разработанной концепцией предусматривает четыре этапа.

1-й этап. Развитие культурного и исторического каркаса города Боброва не только за счет сохранения и исследования исторических памятников и достопримечательностей, но и за счет организации различных культурных и образовательных мероприятий. Активное развитие лесного хозяйства, в частности путем исследования лесов, создание новых учебно-научных центров, организация выездных мероприятий по охране лесов и лесопользованию. Формирование озелененных зон и парков, в том числе в Центральном районе, в которых будут проходить музыкальные, культурные и экологические мероприятия, спортивные соревнования. Создание пешеходной улицы как идеального места для прогулок.

2-й этап. Проектирование ТРК, в частности объектов отдыха и туризма с точной схемой (рис. 9). Разработка стратегии развития ТРК, программы его создания, инфраструктуры

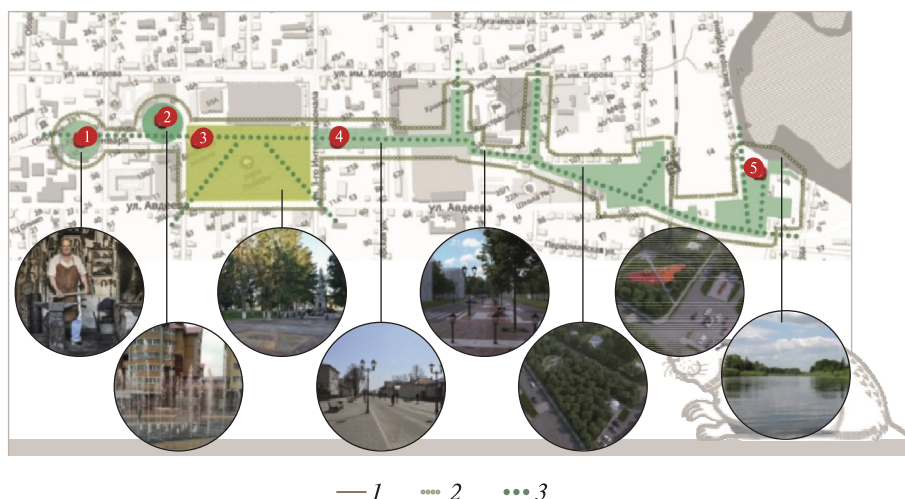


Рис. 8. Схема развития культурного и исторического каркаса города Бобров (руководитель Е.И. Гурьева, исполнитель Н.В. Паршакова): 1 — граница проектируемого участка; 2 — культурно-исторический каркас; 3 — ось каркаса; *цифры в кружочках*: 1 — музей и кузница; 2 — светодинамический фонтан; 3 — центральный парк; 4 — пешеходная улица; 5 — выход к реке Битюг

Fig. 8. Development scheme for the cultural and historical framework of Bobrov (directed by E.I. Guryeva, implemented by N.V. Parshakova): 1 — boundary of the planned site; 2 — cultural and historical framework; 3 — framework axis; *numbers in circles*: 1 — museum and smithy; 2 — dynamic light fountain; 3 — central park; 4 — pedestrian street; 5 — access to the Bityug River

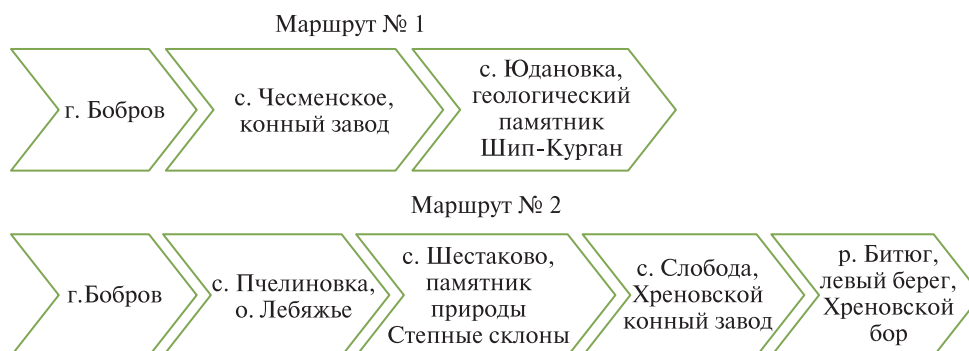


Рис. 9. Туристические маршруты
Fig. 9. Tourist routes

с учетом сезонности эксплуатации, вместимости и возрастного состава рекреантов.

В Бобровском районе функционирует несколько крупных предприятий в сфере обрабатывающей промышленности, которые оказывают значительное влияние на развитие экономики региона.

Для успешного создания ТРК важно учитывать следующие факторы:

- обеспеченность квалифицированными кадрами;
- наличие инфраструктуры;
- устойчивость основных отраслей и возможность их развития;

- уровень привлечения инвестиций и вероятность государственной поддержки;
- конкурентную ситуацию на рынке и потенциал возможных партнеров;
- разработку механизмов управления и стратегии развития.

Необходимо тщательно изучить перечисленные факторы и разработать оптимальный план.

Диагностика перспектив создания и развития кластера в соответствии с концепцией долгосрочного социально-экономического развития РФ на период до 2020 года, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации № 1662-р от 17 ноября 2008 г.,



Рис. 10. Природный каркас Бобровского муниципального района (руководитель Е.И. Гурьева, исполнитель Н.В. Паршакова) (номера у фото соответствуют условным обозначениям на карте): 1 — целинные склоны у с. Липовка; 2 — шип-курган у слияния рек Березовки и Икорца; 3 — памятник природы Степные склоны у с. Шестаково; 4 — оз. Лебяжье северо-восточнее ст. Дугинка; 5 — Вислинский затон на р. Битюг; 6 — дубняки бора по опушке массива; 7 — дубрава в пойме р. Битюг; 8 — осиновые колки на территории Хреновского конного завода; 9 — сложные боры около лесного колледжа; 10 — сложные боры около санатория; 11 — культуры сосны Суходского и Эгера; 12 — старейшие культуры сосны Верехи (Верехинские культуры); 13 — бор около поселка Висленского лесничества; 14 — старовозрастные насаждения Хреновского бора; 15, 16 — сосновые древостои надлуговых террас; 17 — культуры сосны Суходского; 18 — дендрарий Хреновского лесного колледжа имени Г.Ф. Морозова; 19 — Парк-усадьба Хреновского конного завода; 20 — разнотравно-ковыльная степь Хреновского конного завода

Fig. 10. Natural framework of Bobrovsky municipal district (headed by E.I. Guryeva, executed by N.V. Parshakova) (numbers in the photos correspond to the map signs): 1 — virgin slopes near the village of Lipovka; 2 — ship-mound at the confluence of the Berezovka and Ikortsa rivers; 3 — natural monument Steppe slopes near the village of Shestakovo; 4 — Lake Lebyazhye northeast of the station Duginka; 5 — Vistula backwater on the river Bityug; 6 — oak groves of the pine forest along the edge of the massif; 7 — oak grove in the floodplain of the river Bityug; 8 — aspen groves on the territory of the Khrenovsky stud farm; 9 — complex pine forests near the forestry college; 10 — complex pine forests near the sanatorium; 11 — plantations of Sukhodsky and Eger pine; 12 — the oldest pine cultures of Verekhya (Verekhinsky cultures); 13 — pine forest near the village of Vislenskoye forestry; 14 — old-growth stands of the Khrenovsky pine forest; 15, 16 — pine stands of supra-meadow terraces; 17 — Sukhodsky pine cultures; 18 — arboretum of the Khrenovsky Forestry College named after G.F. Morozov; 19 — park-estate of the Khrenovsky stud horse farm; 20 — forb-feather-grass steppe of the Khrenovsky stud farm



Рис. 11. Схема туристических маршрутов (руководитель Е.И. Гурьева, исполнитель Н.В. Паршакова) (номера у фото соответствуют условным обозначениям на карте): 1 — г. Бобров; 2 — с. Чесменское, конный завод; 3 — с. Юдановка, геологический памятник Шип-Курган; 4 — Хреновской бор; 5 — Хреновской конный завод; 6 — с. Шестаково, памятник природы Степные склоны у; 7 — с. Пчелиновка, о. Лебяжье

Fig. 11. Map of tourist routes (directed by E.I. Guryeva, executed by N.V. Parshakova) (the numbers in the photos correspond to the map signs): 1 — the town of Bobrov; 2 — the village of Chesmenskoye, stud horse farm; 3 — the village of Yudanovka, the geological monument of Ship-Kurgan; 4 — Khrenovsky coniferous forest; 5 — Khrenovsky stud horse farm; 6 — Shestakovo Village, Steppe Slopes Natural Monument; 7 — Pchelinovka Village, Lebyazhye lake

определила природное наследие, флору и фауну как богатые и разнообразные, представляющие уникальные возможности для развития экологического туризма. Были выявлены наиболее ценные территории для формирования природного каркаса Бобровского муниципального района (рис. 10) в целях создания инновационного туристического кластера (рис. 11).

Выделено 20 основных доминант для определения специфики типа ТРК, являющиеся объектами с высоким экономическим потенциалом, в том числе Парк-усадыба Хреновского конного завода. Анализ конкурентной устойчивости вы-

являемого ТРК определяется границами локального интегрального кластера и представляет разработанный нами туристический маршрут. Разработанная схема туристического маршрута предполагает собой синтез туристических ресурсов, туристской инфраструктуры, сформированных в конкретной местности г. Боброва и ориентированных на удовлетворение определенных потребностей туристов и путешественников.

Важное значение имеет проведение анализа возможностей развития инфраструктуры туристической зоны в целях создания новых развлекательных и спортивных объектов, мест отдыха

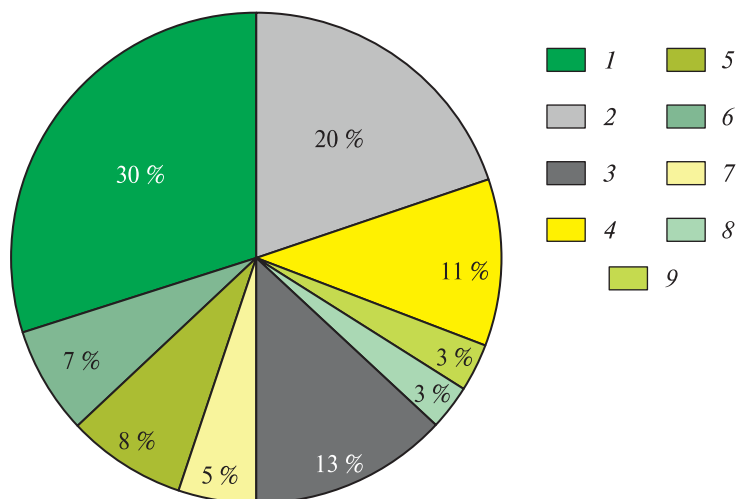


Рис. 12. Соотношение занятого населения в экономике по видам деятельности: 1 — сфера услуг; 2 — населения, занятого в сельском хозяйстве; 3 — торговля; 4 — обрабатывающее производство; 5 — образование; 6 — здравоохранение; 7 — транспорт и связь; 8 — строительство; 9 — производство и распределение электроэнергии, газа и воды [19]

Fig. 12. Ratio of employed population in the economy by type of activity: 1 — Services; 2 — Population employed in agriculture; 3 — Trade; 4 — Manufacturing; 5 — Education; 6 — Healthcare; 7 — Transportation and Communications; 8 — Construction; 9 — Production and Distribution of Electricity, Gas, and Water [19]

для привлечения не только местных жителей, но и туристов из соседних регионов. При этом сохранению и восстановлению исторического наследия города, его культурных и архитектурных ценностей следует уделять первостепенное внимание.

3-й этап. Проведение мероприятий по созданию и развитию ТРК, которые бы предусматривали выполнение градостроительной организацией туристической сети перечня работ по реализации программы и стратегии развития, комплексному мониторингу, контролю на разных уровнях на основе различных объектов, объединенных в систему и связанных тематическими маршрутами.

В соответствии с проектом концепции экономического развития и повышения качества жизни малых городов РФ на период 2015–2030 гг. формирование перечня организаций — потенциальных участников ТРК, расположение предприятий малого и среднего бизнеса, производственных предприятий (рис. 12) большинство из которых сосредоточено в центральной части города, и большой процент (30 %) населения, заняты в сфере услуг. После отбора предприятий — потенциальных участников ТРК была выполнена оценка потенциала его развития. Важнейшим конкурентным преимуществом

Повышение индекса качества городской среды г. Боброва за период 2018–2023 гг.

Improvement of the Urban Environment Quality Index of Bobrov for the period 2018–2023

Год	Индекс качества
2018	146
2019	165
2020	176
2021	179
2022	180
2023	204

туристической отрасли Бобровского района является историко-культурное наследие на основании Федерального Закона «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации» № 73-ФЗ от 25 июня 2002 года.

4 этап. Дальнейшее развитие ТРК.

По итогам 2023 г., в число наиболее комфортных городов Воронежской области в категории «Малые города» (население до 50 тыс. чел.) вошли семь городов Воронежской области, включая Бобров, с индексом качества городской среды 204 (таблица, рис. 13).



Рис. 13. Город Бобров — победитель IV Всероссийского конкурса лучших проектов создания комфортной городской среды (2021–2022) URL: <https://drive.google.com/file/d/124Z-eksd2ezVr5kmj-51kc8ZTeoS94eD/view> (дата обращения 25.12.2025 г.)

Fig. 13. The city of Bobrov is the winner of the IV All-Russian competition of the best projects for creating a comfortable urban environment (2021–2022) URL: <https://drive.google.com/file/d/124Z-eksd2ezVr5kmj-51kc8ZTeoS94eD/view> (accessed 25.12.2025)

Выводы

Установлено, что для города Боброва Бобровского района Воронежской области использование адаптивной системы озеленения —

комплекса озелененных территорий, имеющих многофункциональную роль (экологическую, дендрологическую, градостроительную), способствует созданию кластеров, в том числе туристско-рекреационных. Концепция развития

города Боброва с учетом создания туристско-рекреационного кластера является обоснованной для развития и улучшения жизни граждан.

Ландшафтно-визуальный и ретроспективный анализы исследуемой территории показали, что основными объектами туристско-рекреационного кластера являются, озелененные территории, объекты культуры, достопримечательные места, особо охраняемые природные территории.

Разработанная схема туристических маршрутов, туристско-рекреационный кластер смогут обеспечить повышение конкурентной способности туристического продукта региона на рынке.


Рекомендуемые дендрологические ресурсы города Боброва и Бобровского района, включая дендрологические коллекции, признаны разнообразными и включают 184 вида из 26 семейств.

Список литературы

- [1] Большаков А.И. Современные подходы к определению туристских кластеров // *Сервис в России и за рубежом*, 2012. Т. 33. № 6. С. 50–58.
- [2] Бакуменко О.А. Классификация туристских кластеров // *Закономерности и тенденции развития науки в современном обществе*. Ч. 3. Уфа: РИЦ БашГУ, 2013. С. 30–34.
- [3] Александрова А.Ю. Туристские кластеры: содержание, границы, механизм функционирования // *Современные проблемы сервиса и туризма*, 2007. № 1. С. 51–61.
- [4] Дудов А.А. Российские курорты в условиях становления рыночных отношений // *Российская экономическая жизнь*, 1994. № 8. С. 105–108.
- [5] Галиуллина Г.К., Галимов Ш.Ш., Шабанова Л.Б. Методика анализа туристского кластера региона // *Вестник ТИСБИ*, 2014. № 2 (58). С. 141–149.
- [6] Глаголева Л.Э., Куксова И.В., Певнева Д.М. Перспективы развития сельского туризма Воронежской области // *Экономика. Инновации. Управление качеством*, 2015. № 2 (11). С. 84–87.
- [7] Гришин С.Ю. Методологические подходы к классификации туристских кластеров // *Вестник Национальной Академии туризма*, № 32 (34), 2015. С. 7–10.
- [8] Гурьева Е.И. Комплексная оценка систем озеленения рекреационно-оздоровительных объектов // *Инженерные системы и сооружения*, 2014. № 4(17). С. 78–82.
- [9] Енин А.Е. Градостроительное развитие малых исторических городов Черноземья // *Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета*. Строительство и архитектура, 2008. № 4. С. 9–18.
- [10] Енин А.Е., Азизова-Полужктова А.Н. Архитектурная туристско-рекреационная система Центрально-Черноземного региона России // *Архитектура и строительство России*, 2017. № 1 (221). С. 53–58.
- [11] Куксова И.В., Германчук Б.А. Исследование санаторно-оздоровительного туризма в Воронежской области // *Экономика. Инновации. Управление качеством*, 2015. № 2 (11). С. 88–90.
- [12] Морозова Л.С., Большаков А.И. Классификация приграничных туристских кластеров // *Сервис в России и за рубежом*, 2012. № 11. С. 33–40.
- [13] Кашина И.Ю., Нефедова И.Б. Методические аспекты исследования Территориальной организации рекреации // *Вестник МГУ. Сер. 5. География*, 1995. № 3. С. 31–35.
- [14] Кружалин В.И., Шабалина Н.В., Кружалин К.В. Теоретико-методологические подходы к туристско-рекреационному проектированию // *Вопросы географии: Теория и практика туризма*. Т. 139. М.: Издательский дом «Кодекс», 2014. С. 100–122.
- [15] Лысова Н.Ю. Малый исторический город: культурные параметры и актуальные проблемы // *Регионология*, 2008. № 2. С. 84.
- [16] Кирюшина Т.С., Архипов Ю.Р. Оценка производственного градообразующего потенциала малого города в системе малых городов (на примере Чувашии) // *Естественные и технические науки*, 2016. № 9 (99). С. 38–44.
- [17] Митрофанова А.В. Формирование регионального туристского кластера Калининградской области // *Вестник Института Балтийского региона*, 2009. № 2. С. 37–40.
- [18] Сериков М.Т. Развитие городов и концепция экосистемного пользования на прилегающих территориях // *Развитие малых городов Центрально-Черноземного региона: Материалы I Рос. рег. конф.*, Воронеж, 22–24 мая 1996 г. Воронеж: Изд-во Воронежского государственного архитектурно-строительного университета, 1996. С. 102–106.
- [19] Администрация городского поселения город Бобров Бобровского района Воронежской области. Официальный сайт. URL: <http://bobrovcity.ru/> (дата обращения 22.06.2025).
- [20] Загоровский В.П. Воронежская историческая энциклопедия. Воронеж: Истоки, 1992. 251 с.
- [21] Кригер Л.В., Чесноков Г.А. Архитектура исторических городов Воронежской области. Воронеж: Изд-во Центра духовного возрождения Черноземного края, 2002. 320 с.
- [22] Елецких В.Л., Капустина Н.И., Кригер Л.В., Соколов А.Ю., Степанова Е.Д., Юрьев Ю.Н. Бобров. Визитная карточка. Воронеж: Творческое объединение «Альбом», 2011. 48 с.
- [23] Методика системных исследований лесоаграрных ландшафтов. М.: Изд-во ВАСХНИЛ, 1985. 112 с.
- [24] Кругляк В.В., Семенютина А.В., Гурьева Е.И. Модели архитектоники рекреационных насаждений для адаптивных систем озеленения // *Вестник Воронежского государственного университета*. Серия: География. Геоэкология, 2017. № 3. С. 108–112.
- [25] Есаулов Г.В. Архитектурно-градостроительное наследие Юга России: Его формирование и культурный потенциал: дис. ... д-ра архитектуры. М., 2004. 57 р.
- [26] Nguyen T.H. Evaluating Sustainability of Architectural Designs Using Building Information Modeling // *The Open Construction and Building Technology J.*, 2010, no. 4, pp. 1–8.

- [27] Чурсина Л.В. Формирование городских социальных пространств с использованием информационных технологий // *Architecture and Modern Information Technologies*, 2021. № 1 (54). С. 236–247.
- [28] Thuermer K.E. Companies and Regional Enhance Their Strengths by Building Clusters // *Keller International Publishing*, 2000, v. 17, no. 1, pp. 106–112.
- [29] Vellas F. The International Marketing of Travel and Tourism: a strategic approach. Great Britain: Basingstoke : Macmillan, 1999, 329 p.
- [30] Young I. Public-Private Sector Cooperation: Enhancing Tourism Competitiveness // *Annals of Tourism Research*, 2002, v. 29, no. 2, pp. 96–99.
- [31] СанПиН 1.2.3685–21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания, 2021. 998 с.
- [32] Кругляк В.В., Гурьева Е.И. Древоводство. Воронеж: Изд-во ВГЛТА, 2011. 144 с.
- [33] Земскова О.В., Семенов В.С. Инновационный материал для дизайна парковой зоны города // *Перспективы науки*, 2020. № 2 (125). С. 42–46.
- [34] Теодоронский В.С. О методах визуально-ландшафтной оценки территорий при создании объектов ландшафтной архитектуры // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2021. Т. 25. № 2. С. 57–63.
- [35] Методическое руководство и технические условия по реконструкции городских зеленых насаждений. М.: МГУЛ, 2001. 58 с.
- [36] Баженов А.В. Планировочные предпосылки рационального природоиспользования города (на примере средних городов ЦЧР): дис. ... канд. архитектуры: 18.00.04. М., 1984. 170 с.
- [37] Большаков А.Г. Градостроительная организация ландшафта как фактор устойчивого развития территории: дис. ... д-ра архитектуры: 18.00.01. Иркутск, 2003. 424 с.
- [38] Макаров В.З. Теория и практика ландшафтно-экологических исследований крупных городов с применением ГИС-технологий: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук: 25.00.23. СПб., 2001. 44 с.
- [39] Кравченко Э.В., Будагов И.В., Кравченко Е.С. Об учете экологических факторов при планировании использования городских земель // *Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник)*, 2013. № 3. С. 116–117.
- [40] Прокопенко В.В., Ганжа О.А. К вопросу о методах оценки показателя комфортности ландшафтно-рекреационных территорий крупнейших городов (на примере города Волгограда) // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*, 2015. Вып. 40 (59). С. 73–88.
- [41] Иванова Н.В., Дубов И.А., Назаров К.Р., Мурадов И.С. Проектирование не аллергенного озеленения урбанизированных территорий // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*, 2021. № 4 (85). С. 230–242.
- [42] Фролов А.К. Окружающая среда крупного города и жизнь растений в нем. СПб.: Наука, 1996. 328 с.
- [43] Саймондс Дж. Ландшафт и архитектура. М.: Стройиздат, 1965. 193 с.
- [44] Залеская Л.С. Ландшафтная архитектура. М.: Стройиздат, 1979. 237 с.

Сведения об авторах

Кругляк Владимир Викторович  — д-р с.-х. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», kruglyak_vl@mail.ru

Гурьева Елена Ивановна — канд. с.-х. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», gurjeva_el@mail.ru

Поступила в редакцию 19.01.2026.

Одобрено после рецензирования 15.02.2026.

Принята к публикации 02.03.2026.

ADAPTIVE SYSTEM OF GREENING IN BOBROV CITY (VORONEZH REGION) WITHIN TOURIST AND RECREATIONAL CLUSTER

V.V. Kruglyak^{1✉}, E.I. Gur'eva²

¹Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I, 1, Michurina st., 394087, Voronezh, Russia

²Voronezh State Technical University, 84, 20-Oktyabrya st., 394006, Voronezh, Russia

kruglyak_vl@mail.ru

A conceptual model of an adaptive greening system for the Central Black Earth Region (using the city of Bobrov as an example) is proposed. We used the data on the city of Bobrov, the winner of the All-Russian competition for the best projects to create a comfortable urban environment. A map of tourist routes in the Bobrovsky district is presented. General information about the city of Bobrov in the Voronezh region is provided. The architectural heritage sites in Bobrov city are examined. Typical key problems of small towns in Russia are indicated. The small historical town of Russia Bobrov, which is included in the list of historical towns of the Russian Federation, was analyzed. A landscape-visual analysis of the designed territory was carried out based on the General Plan of the urban settlement of Bobrov. A plan for the development of the cultural and historical framework of Bobrov city has been developed. The natural framework of the Bobrovsky municipal district has been established.

Keywords: adaptive system of greening, the city of Bobrov, tourism and recreation cluster

Suggested citation: Kruglyak V.V., Gur'eva E.I. *Adaptivnaya sistema ozeleneniya goroda Bobrova Voronezhskoy oblasti s uchetom obrazovaniya turistsko-rekreatsionnogo klastera* [Adaptive system of greening in Bobrov city (Voronezh region) within tourist and recreational cluster]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2026, vol. 30, no. 2, pp. 58–75. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-2-58-75

References

- [1] Bol'shakov A.I. *Sovremennyye podkhody k opredeleniyu turistskikh klasterov* [Modern approaches to defining tourist clusters]. *Servis v Rossii i za rubezhom* [Service in Russia and abroad], 2012, v. 33, no. 6, pp. 50–58.
- [2] Bakumenko O.A. *Klassifikatsiya turistskikh klasterov* [Classification of tourist clusters]. *Zakonomernosti i tendentsii razvitiya nauki v sovremennoy obshchestve* [Patterns and tendencies of development of science in modern society]. Part 3. Ufa: RIC BashSU, 2013, pp. 30–34.
- [3] Aleksandrova A.YU. *Turistskiye klastery: sodержaniye, granitsy, mekhanizm funktsionirovaniya* [Tourist clusters: content, boundaries, mechanism of functioning]. *Sovremennyye problemy servisa i turizma* [Modern problems of service and tourism], 2007, no. 1, pp. 51–61.
- [4] Dudov A.A. *Rossiyskiye kurorty v usloviyakh stanovleniya rynochnykh otnosheniy* [Russian resorts in the conditions of formation of market relations]. *Rossiyskaya ekonomicheskaya zhizn'* [Russian economic life], 1994, no. 8, pp. 105–108.
- [5] Galiullina G.K., Galimov SH.SH., Shabanova L.B. *Metodika analiza turistskogo klastera regiona* [Methodology for analyzing a regional tourist cluster]. *Vestnik TISBI*, 2014, no. 2 (58), pp. 141–149.
- [6] Glagoleva L.E., Kuksova I.V., Pevneva D.M. *Perspektivy razvitiya sel'skogo turizma Voronezhskoy oblasti* [Prospects for the development of rural tourism in the Voronezh region]. *Ekonomika. Innovatsii. Upravleniye kachestvom* [Economy. Innovations. Quality Management], 2015, no. 2 (11), pp. 84–87.
- [7] Grishin S.YU. *Metodologicheskiye podkhody k klassifikatsii turistskikh klasterov* [Methodological approaches to the classification of tourist clusters]. *Vestnik Natsional'noy Akademii turizma* [Vestnik of the National Academy of Tourism], no. 32 (34), 2015, pp. 7–10.
- [8] Gur'yeva Ye.I. *Kompleksnaya otsenka sistem ozeleneniya rekreatsionno-ozdorovitel'nykh ob'yektov* [Comprehensive Assessment of Landscaping Systems for Recreational and Health Facilities]. *Inzhenernyye sistemy i sooruzheniya* [Engineering Systems and Structures], 2014, no. 4(17), pp. 78–82.
- [9] Yenin A.Ye. *Gradostroitel'noye razvitiye malyykh istoricheskikh gorodov Chernozem'ya* [Urban Development of Small Historical Towns of the Chernozem Region]. *Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura* [Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture], 2008, no. 4, pp. 9–18.
- [10] Yenin A.Ye., Azizova-Poluektova A.N. *Arkhitekturnaya turistsko-rekreatsionnaya sistema Tsentral'no-Chernozemnogo regiona Rossii* [Architectural Tourism and Recreation System of the Central Black Earth Region of Russia]. *Arkhitektura i stroitel'stvo Rossii* [Architecture and Construction of Russia], 2017, no. 1 (221), pp. 53–58.
- [11] Kuksova I.V., Germanchuk B.A. *Issledovaniye sanatorno-ozdorovitel'nogo turizma v Voronezhskoy oblasti* [Study of Sanatorium and Health Tourism in the Voronezh Region]. *Ekonomika. Innovatsii. Upravleniye kachestvom* [Economy. Innovations. Quality Management], 2015, no. 2 (11), pp. 88–90.

- [12] Morozova L.S., Bol'shakov A.I. *Klassifikatsiya prigranichnykh turistskikh klasterov* [Classification of Border Tourism Clusters]. *Servis v Rossii i za rubezhom* [Service in Russia and Abroad], 2012, no. 11, pp. 33–40.
- [13] Kashina I.YU., Nefedova I.B. *Metodicheskiye aspekty issledovaniya Territorial'noy organizatsii rekreatsii* [Methodological Aspects of the Study of Territorial Organization of Recreation]. *Vestnik MGU. Ser. 5. Geografiya* [Bulletin of Moscow State University. Series 5. Geography], 1995, no. 3, pp. 31–35.
- [14] Kruzhalin V.I., Shabalina N.V., Kruzhalin K.V. *Teoretiko-metodologicheskiye podkhody k turistsko-rekreatsiionomu proyektirovaniyu* [Theoretical and Methodological Approaches to Tourism and Recreation Design]. *Voprosy geografii: Teoriya i praktika turizma* [Voprosy Georgii: Theory and Practice of Tourism], t. 139. Moscow: Izdatel'skiy dom «Kodeks», 2014, pp. 100–122.
- [15] Lysova N.YU. *Malyy istoricheskiy gorod: kul'turnyye parametry i aktual'nyye problemy* [Small historical town: cultural parameters and current problems]. *Regionologiya* [Regionology], 2008, no. 2, p. 84.
- [16] Kiryushina T.S., Arkhipov YU.R. *Otsenka proizvodstvennogo gradoobrazuyushchego potentsiala malogo goroda v sisteme malykh gorodov (na primere Chuvashii)* [Assessment of the industrial city-forming potential of a small town in the system of small towns (on the example of Chuvashia)]. *Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki*, 2016. № 9 (99). S. 38–44. [Natural and technical sciences], 2016, no. 9 (99), pp. 38–44.
- [17] Mitrofanova A.V. *Formirovaniye regional'nogo turistskogo klastera Kaliningradskoy oblasti* [Formation of a regional tourism cluster in the Kaliningrad region]. *Vestnik Instituta Baltiyskogo regiona* [Bulletin of the Institute of the Baltic Region], 2009, no. 2, pp. 37–40.
- [18] Serikov M.T. *Razvitiye gorodov i kontseptsiya ekosistemnogo pol'zovaniya na prilegayushchikh territoriyakh* [Urban development and the concept of ecosystem use in adjacent territories]. *Razvitiye malykh gorodov Tsentral'no-chernozemnogo regiona: mater. I Rossiyskoy regional'noy konferentsii* [Development of small towns of the Central Black Earth Region: Proc. of the 1st Russian regional conference], Voronezh, May 22–24, 1996. Voronezh: Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, 1996, pp. 102–106.
- [19] *Administratsiya gorodskogo poseleniya gorod Bobrov Bobrovskogo rayona Voronezhskoy oblasti* [Administration of the urban settlement of Bobrov, Bobrovsky District, Voronezh Region]. Available at: <http://bobrovcity.ru/> (accessed 22.06.2025).
- [20] Zagorovskiy V.P. *Voronezhskaya istoricheskaya entsiklopediya* [Voronezh Historical Encyclopedia]. Voronezh: Istoki, 1992, 251 p.
- [21] Kriger L.V., Chesnokov G.A. *Arkhitektura istoricheskikh gorodov Voronezhskoy oblasti* [Architecture of historical towns of the Voronezh Region]. Voronezh: Tsentr dukhovnogo vrozozhdeniya Chernozemnogo kraya [Center for the Spiritual Revival of the Black Earth Region], 2002, 320 p.
- [22] Yeletskikh V.L., Kapustina N.I., Kriger L.V., Sokolov A.Y., Stepanova Y.D., Yur'yev Y.N. *Bobrov. Vizitnaya kartochka* [Bobrov. Business Card]. Voronezh: Creative Association «Album», 2011, 48 p.
- [23] *Metodika sistemnykh issledovaniy lesoagrarnykh landshaftov* [Methodology of Systems Research of Forest-Agricultural Landscapes]. Moscow: VASKhNIL, 1985, 112 p.
- [24] Kruglyak V.V., Semenyutina A.V., Gur'yeva Ye.I. *Modeli arkhitektoniki rekreatsiionnykh nasazhdeniy dlya adaptivnykh sistem ozeleneniya* [Models of Architectonics of Recreational Plantings for Adaptive Landscaping Systems]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya* [Bulletin of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology], 2017, no. 3, pp. 108–112.
- [25] Yesaulov G.V. *Arkhitekturno-gradostroitel'noye naslediyе Yuga Rossii: Yego formirovaniye i kul'turnyy potentsial* [Architectural and urban planning heritage of the South of Russia: Its formation and cultural potential]. Dis. Dr. Sci. (Architecture). Moscow, 2004, 57 p.
- [26] Nguyen T.H. Evaluating Sustainability of Architectural Designs Using Building Information Modeling. *The Open Construction and Building Technology J.*, 2010, no. 4, pp. 1–8.
- [27] Chursina L.V. *Formirovaniye gorodskikh sotsial'nykh prostranstv s ispol'zovaniyem informatsionnykh tekhnologiy* [Formation of urban social spaces using information technologies]. *Architecture and Modern Information Technologies* [Architecture and Modern Information Technologies], 2021, no. 1 (54), pp. 236–247.
- [28] Thuermer K.E. *Companies and Regional Enhance Their Strengths by Building Clusters*. Keller International Publishing, 2000, v. 17, no. 1, pp. 106–112.
- [29] Vellas F. *The International Marketing of Travel and Tourism: a strategic approach*. Great Britain: Basingstoke: Macmillan, 1999, 329 p.
- [30] Young I. Public-Private Sector Cooperation: Enhancing Tourism Competitiveness. *Annals of Tourism Research*, 2002, v. 29, no. 2, pp. 96–99.
- [31] *SanPiN 1.2. 3685–21 Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti diya cheloveka faktorov srede obitaniya. Ofitsial'nyy internet-portal pravovoy informatsii* [Russian sanitary rules and regulations. SanPiN 1.2. 3685–21 Hygiene standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans. Official Internet portal of legal information], 2021, 998 p.
- [32] Kruglyak V.V., Gur'eva E.I. *Drevovodstvo* [Arboriculture]. Voronezh: VGLTA Publishing House, 2011, 144 p.
- [33] Zemskova O.V., Semenov V.S. *Innovatsionnyy material dlya dizayna parkovoy zony goroda* [Innovative material for the design of the city park area]. *Perspektivy nauki* [Prospects of Science], 2020, no. 2 (125), pp. 42–46.
- [34] Teodoronskiy V.S. *O metodakh vizual'no-landshaftnoy otsenki territoriy pri sozdanii ob'etov landshaftnoy arkhitektury* [Visual landscape areas assessment techniques when creating objects of landscape architecture]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 2, pp. 57–63. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-2-57-63
- [35] *Metodicheskoe rukovodstvo i tekhnicheskiye usloviya po rekonstruktsii gorodskikh zelenykh nasazhdeniy* [Methodological guidelines and technical conditions for the reconstruction of urban green spaces]. Moscow: MGUL, 2001, 58 p.

- [36] Bazhenov A.V. *Planirovochnye predposylki ratsional'nogo prirodopol'zovaniya goroda (na primere srednikh gorodov TsChR)* [Planning prerequisites for rational natural use of the city (on the example of medium-sized cities of the Central Asian Republic)]. Dis. Cand. Sci. Architecture, 18.00.04. Moscow, 1984, 170 p.
- [37] Bol'shakov A.G. *Gradostroitel'naya organizatsiya landshafta kak faktor ustoychivogo razvitiya territorii* [Urban planning organization of the landscape as a factor of sustainable development of the territory]. Dis. Dr. Sci. Architecture, 18.00.01. Irkutsk, 2003, 424 p.
- [38] Makarov V.Z. *Teoriya i praktika landshaftno-ekologicheskikh issledovaniy krupnykh gorodov s primeneniem GIS-tehnologiy* [Theory and practice of landscape and environmental studies of large cities using GIS technologies]. Dis. Dr. Sci. (Geographical), 25.00.23. St. Petersburg, 2001, 44 p.
- [39] Kravchenko E.V., Budagov I.V., Kravchenko E.S. *Ob uchete ekologicheskikh faktorov pri planirovanii ispol'zovaniya gorodskikh zemel'* [On the consideration of environmental factors in the planning of urban land use]. Nauka. Tekhnika. Tekhnologii (politekhnichestkiy vestnik) [Nauka. Technic. Technologies (Polytechnic Bulletin)], 2013, no. 3, pp. 116–117.
- [40] Prokopenko V.V., Ganzha O.A. *K voprosu o metodakh otsenki pokazatelya komfortnosti landshaftno-rekreatsionnykh territoriy krupneyshikh gorodov (na primere goroda Volgograda)* [On the issue of methods for assessing the comfort index of landscape and recreational territories of the largest cities (on the example of the city of Volgograd)]. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura [Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture], 2015, iss. 40 (59), pp. 73–88.
- [41] Ivanova N.V., Dubov I.A., Nazarov K.R., Muradov I.S. *Proektirovanie neallergennoy ozeleneniya urbanizirovannykh territoriy* [Designing non-allergenic landscaping of urbanized territories]. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura [Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture], 2021, no. 4 (85), pp. 230–242.
- [42] Frolov A.K. *Okruchayushchaya sreda krupnogo goroda i zhizn' rasteniy v nem* [The environment of a large city and the life of plants in it]. St. Petersburg: Nauka, 1996, 328 p.
- [43] Simonds J. *Landshaft i arkhitektura* [Landscape and architecture]. Moscow: Stroyizdat, 1965, 193 p.
- [44] Zalesskaya L.S. *Landshaftnaya arkhitektura* [Landscape architecture]. Moscow: Stroyizdat, 1979, 237 p.

Authors' information

Kruglyak Vladimir Viktorovich✉ — Dr. Sci. (Agriculture), Professor of the Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, kruglyak_vl@mail.ru

Gur'eva Elena Ivanovna — Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the Voronezh State Technical University, gurjeva_el@mail.ru

Received 19.01.2026.

Approved after review 15.02.2026.

Accepted for publication 02.03.2026.

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

ФОРЗИЦИЯ ЕВРОПЕЙСКАЯ — УНИКАЛЬНЫЙ ИНОРАЙОННЫЙ КУСТАРНИК В ОЗЕЛЕНЕНИИ Г. АРХАНГЕЛЬСКА

О.С. Залывская✉, Н.А. Бабич

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

o.zalvyskaya@narfu.ru

Приведены результаты инвентаризации насаждений г. Архангельска в период с 2002 по 2024 гг., в результате которой зафиксирован необычный для данной климатической области вид — *Forsythia europaea* Vahl. Проанализирована комплексная оценка состояния дендроинтродуцента. Представлены данные об особенностях его зимостойкости, морозоустойчивости, санитарного состояния, декоративности, сезонного развития и роста. Выявлено прохождение всех фенологических фаз, характерных для данного вида. Установлено, что ежегодный прирост составляет $0,27 \pm 0,050$ м, рост побегов продолжается с июня по август. Определено, что подготовленность кустарника к зиме удовлетворительная — к началу сентября побеги одревесневают, сохраняется зеленая окраска листьев вплоть до листопада (конец октября). Показано, что цветение продолжается более 10 дней до распускания листьев, плодоношение по интенсивности значительно. Проведена интегральная оценка перспективности интродукции и расчет акклиматизационного числа согласно общепринятым методикам. Считаем необходимым продолжить исследование уникального для озеленения г. Архангельска дендроинтродуцента *Forsythia europaea* Vahl в части выяснения возможных путей его размножения в культуре.

Ключевые слова: форзиция европейская, биоразнообразие, видовой состав, интродуценты древесной флоры

Ссылка для цитирования: Залывская О.С., Бабич Н.А. Форзиция европейская — уникальный инорайонный кустарник в озеленении г. Архангельска // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2026. Т. 30. № 2. С. 76–88. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-2-76-88

Тема подбора ассортимента древесных растений для озеленения городов остается актуальной. Широко известно высказывание академика Н.В. Цицина (1898–1980), ответственного редактора Бюллетеня Главного ботанического сада: «Введение каждого нового растения в культуру равносильно великому открытию» [1]. Детальными исследованиями по интродукции растений охвачены большие территории нашей страны, в том числе и Европейский Север [2–12].

По схеме древокультурных районов г. Архангельск относится к району 3 — зоне хвойных лесов [13]. Согласно рекомендациям для данного района возможны к посадке ель колючая, лиственница сибирская, сосна кедровая сибирская, туя западная, из лиственных пород — тополь бальзамический, кизильник блестящий, сирень обыкновенная и др. [14].

Ранее опубликованы материалы, свидетельствующие об увеличении разнообразия декоративных древесных пород, используемых на Европейском Севере России [15].

Начиная с 2002 г. нами были обследованы насаждения в пределах Архангельской агломерации, а на территории г. Архангельска обнаружен уникальный для данной климатической области инорайонный кустарник *Forsythia europaea* Vahl, который был планомерно исследован. Кустарник произрастает не на территории ограниченного или специального назначения, как это часто бывает с редко встречающимися видами, а на общедоступной территории в посадках одной из центральных улиц и является элементом городского озеленения.

В научных публикациях дендрологов, ботаников и интродукторов приводятся рекомендации по применению декоративных древесных пород при озеленении городов и поселков. В отношении насаждений декоративных древесных пород проводится инвентаризационная оценка по различным климатическим зонам. В работе [16] используется термин «дендрологический раритет (дендрораритет)», под которым следует понимать экземпляры древесных и кустарниковых видов, отличающиеся выдающимися показателями, нетипичными для вида в данной географической точке (размеры, возраст), или виды, редко встречающиеся в данной

географической точке. Согласно данной терминологии форзиция европейская в Архангельской агломерации относится к дендрораритету.

Интродуцентами региона являются более 30 видов, среди которых преобладают кустарники. Редкими видами в насаждениях исследуемого региона являются лох серебристый, калина Бульденеж, черемуха Маака, снежноточник белый, ясень обыкновенный, барбарисы обыкновенный и Тунберга, сосна горная, кедровый стланик, можжевельник обыкновенный, тополь белый. Они произрастают на территориях общего, специального и ограниченного пользования, зачастую единично или микрогруппами.

Цель работы

Цель работы — комплексное исследование уникального дендроинтродуцента *Forsythia europaea* Vahl, произрастающего в г. Архангельске.

Материалы и методы

В ходе работ применяли общепринятые методы, используемые при исследованиях древесных интродуцентов [17].

Для изучения сезонного развития проводили фенологические наблюдения по методике Е.Н. Булыгина [18] с применением регионального компонента [19]. Общим началом вегетации растений считали фазу набухания почек, окончанием вегетации — полный листопад. При наблюдении за каждым экземпляром за начало фазы принимали день, когда на растении распускается не менее 10 % почек, разворачивается не менее 10 % листьев и т. д.

Сезонный рост фиксировали на боковых побегах по методике, изложенной в работе [20]. Фиксировали продолжительность периода роста, начало и конец вегетации, длительность удержания листы и другие фенологические фазы.

Оценку зимостойкости и морозоустойчивости выполняли по шкалам, разработанным в Главном ботаническом саду Российской академии наук имени Н.В. Цицина (ГБС РАН им. Н.В. Цицина). Степень декоративности оценивали по авторской шкале [21].

Фиксировали категорию подготовленности вида к длительному холодному периоду года. Растения с одревесневшими побегами, прекратившие свой рост и сбросившие листву к наступлению отрицательных температур относятся к категории I. Растения, прекратившие свой рост тогда, когда отрицательные температуры уже наступили, и сохраняющие листву иногда на всю зиму, относятся к категории II. Растения

с недревесневшими побегами, довольно сильно обмерзающие, относятся к категории III.

Санитарное состояние было оценено по шкале (отличное, хорошее, удовлетворительное), включающей в себя наличие или отсутствие сухих ветвей на растениях, признаков повреждения листьев вредителями или болезнями, других изменений ассимиляционного аппарата.

Линейные замеры плодов осуществляли с помощью электронного штангенциркуля.

Оценку обилия цветения и плодоношения проводили по методике, изложенной в работе [22]. Характеристику плодов и семян выполняли согласно ГОСТ 13056.1-8-97 [23]. Интегральную оценку перспективности интродукции и вычисление акклиматизационного числа проводили по общепринятым методикам.

Результаты и обсуждение

Форзиция европейская (*Forsythia europaea* Vahl) относится к семейству Маслиновые (*Oleaceae*), естественно произрастает в западной части Балканского полуострова, все остальные виды рода *Forsythia* — на территории Приморского края России и в Восточной Азии (Китай, Япония, Корея). Такая разорванность естественного ареала говорит о древности рода.

Название дано растению в честь шотландского ботаника и садовода Уильяма Форсайта, жившего в Англии во второй половине XVIII в., который привез форзицию из Китая. В настоящее время символика рода Форзиция применяется на марках Албании, Южной Кореи, Швейцарии, кроме того, растение является символом г. Сеула.

Высота кустарника на родине составляет от 1 до 3 м, изредка до 6 м, ширина — до 2 м. Кора серо-коричневая, грубая; листья простые без прилистников, овальные с зазубринами; расположение супротивное; длина листа — от 2 до 15 см. Цветки колокольчатые, ярко-желтые, одиночные, диаметром 3–4 см. Цветет до распускания листьев, опыляется насекомыми. Имеет плод коробочку, вскрывающуюся по гнездам, с несколькими крылатыми семенами.

Данный вид достаточно морозоустойчив по сравнению с другими видами рода *Forsythia*, однако при морозах (свыше $-30 \dots -35$ °C) цветочные почки у растения вымерзают. К экологическим условиям нетребователен, может расти как на открытом пространстве, так и в полутени. Основное требование к почве — ее водопроницаемость. Сразу после завершения цветения кустарники можно формировать, без обрезки куст становится раскидистым. Форзиция слабо подвержена болезням и вредителям. Размножается растение семенами или черенками.

Т а б л и ц а 1

Сезонное развитие форзиции европейской в г. Архангельске в 2023–2025 гг.
Seasonal Development of Albanian Forsythia (*Forsythia europaea* Vahl) in Arkhangelsk in 2023–2025

Фенологическая фаза		2023	2024	2025
Распускание листьев	Набухание почек	15.05	25.05	17.05
	Распускание почек	18.05	26.05	20.05
	Развертывание листьев	24.05	29.05	24.05
	Полное облиствение	01.06	10.06	01.06
Цветение	Начало	19.05	28.05	17.05
	Массовое	24.05	01.06	25.05
	Окончание	30.05	06.06	30.05
	Оценка цветения, балл	2	1	2
Созревание плодов и семян	Появление плодов	08.06	–	16.06
	Массовое созревание плодов	18.06	–	20.06
	Оценка плодоношения, балл	2	–	1
Осенняя окраска листьев		16.10	29.09	30.09
Листопад	Начало листопада	12.10	18.10	05.10
	Окончание листопада	18.11	20.11	01.11
Продолжительность вегетационного периода, сут.		165	157	146

В Европейской части России данная порода чрезвычайно популярна, в садах и парках ее применяют в качестве солитера, а также в группах. Главным декоративным элементом являются желтые цветки, которые появляются еще в безлистном состоянии, значительно оживляя пейзаж.

Кроме форзиции европейской многообразие рода включает в себя несколько основных видов: форзиция яйцевидная (*Forsythia ovata* Nakai), форзиция средняя (*Forsythia intermedia* Zabel.), форзиция зеленая (*Forsythia viridissima* Lindl.), форзиция свисающая (*Forsythia suspensa* Vahl). Они различаются по высоте и ширине куста, форме кроны, характеру расположения листьев и цветков на стебле, интенсивностью цветения, а также ареалом естественного обитания [24, 25].

Применение форзиции на северных территориях не столь обширно, как в других регионах, и не столь широко, как большинства других видов кустарников, тем не менее его возможно использовать в качестве солитера, в миксбордерах в сочетании с цветочными культурами, в декоративных группах. Также данный вид актуален для флористов и фитодизайнеров.

В условиях г. Архангельска этот кустарник достигает высоты 1,7 м, диаметра стволиков — 3–4 см, что соответствует биологической характеристике вида. Зимостойкость вида составляет 2 балла (обмерзает не более 50 % длины однолетних побегов), индекс морозостойчивости — 12,3, что означает такую характеристику, как «значительно обмерзает» в нижнем пределе

или означает «умеренно обмерзает», причем без потери декоративных качеств.

В г. Архангельске вегетация вида *Forsythia europaea* Vahl начинается в среднем 15 мая с фенофазы набухания почек. Цветение происходит с 19 по 30 мая до распускания листьев, что соответствует видовым особенностям кустарника. Интенсивность цветения 2 балла по шкале В.Г. Каппера (для кустарников максимальный балл — 3, минимальный — 0). Ранняя и теплая весна 2023 г. привнесла изменения в сезонное развитие растений: вегетация началась раньше обычного и продолжалась дольше (табл. 1). Погодные условия 2024 г. значительно повлияли на начало вегетации кустарника и на интенсивность его цветения. Поздняя затяжная и холодная весна сказалась на снижении балла цветения до 1 и сдвинула срок цветения на конец мая — начало июня, плоды в тот год не вызревали. В 2025 г. погодные условия приблизились к среднегодовым, цветение произошло в середине мая (рис. 1).

Годичный прирост побега в длину составляет $0,27 \pm 0,050$ м, рост продолжается с июня по август. Подготовленность кустарника к зиме удовлетворительная, побеги одревесневают уже к началу сентября, но окончание листопада зафиксировано лишь в ноябре после установления отрицательных значений температуры воздуха. При этом в течение первых недель осени листва остается в зеленом состоянии и без видимых признаков повреждений, что, безусловно, сказывается на декоративных свойствах кустарника в целом.



а



б

Рис. 1. Фенологические фазы *Forsythia europaea* Vahl в 2025 г.: а — цветение (28.05); б — осеннее расцветивание (29.09)

Fig. 1. Phenological phases of *Forsythia europaea* Vahl in 2025: а — flowering (May 28); б — autumn bloom (September 29)

По данным фенологических исследований, цветение форзиции европейской в условиях г. Архангельска длительное и продолжается более 10 сут. Это имеет огромное значение не только для декоративных качеств вида, но и для характеристики репродуктивной функции интродуцента. Вступление инорайонной породы в фазу цветения и плодоношения в новых условиях рассматривается как элемент адаптации [26, 27].

Нами установлено, что сроки и обилие цветения зависят от весенних погодных условий текущего года. Ранняя и благоприятная по температурному режиму весна 2023 г. обеспечила более высокий балл цветения по сравнению с затяжной весной 2024 г. (2 и 1 балл цветения соответственно). Плодоношение также варьирует по годам, причем оно более непостоянно, чем цветение.

Форзиция — первоцвет среди кустарников, что довольно редкое явление для интродуцентов на Европейском Севере России (рис. 2). При этом местные виды ив и тополь дрожащий отличаются ранним цветением, что вносит зрительное разнообразие в северные урбандшафты, визуальное радует население и восполняет недостаток положительных эмоций, недополу-

ченных им вследствие продолжительной зимы, что подтверждается опросами.

Для данного вида требуются следующие агротехнические условия.

1. Легкая, слегка известковая и обязательно не сырая, дренированная почва (например, смесь листовой земли, перегноя и песка в соотношении 1:1:2), поскольку избыточное увлажнение может стать ограничивающим фактором (это важно учитывать).

2. Отсутствие сквозняков, поскольку северные города отличаются частой сменой холодных и теплых воздушных масс, сопровождаемой сильными ветрами; лишь около 40 сут. в году отмечается безветренная погода. Обеспеченность светом, т. е. произрастание на хорошо освещенных участках, в связи с чем важен учет близости затеняющих построек.

3. Внесение органических удобрений в приствольный круг слоем 15...20 см одновременно с теплым поливом, что стимулирует рост побегов и цветковых почек.

4. Рыхление почвы в начале цветения и внесение комплексных минеральных удобрений (70...100 г на 1 м²), что следует повторять после завершения цветения в конце мая и начале июня, в том числе внесение фосфорно-калийных



Рис. 2. Цветение *Forsythia europaea* Vahl в г. Архангельске
Fig. 2. *Forsythia europaea* Vahl blooming in Arkhangelsk

удобрений (20...30 г на 1 м²) в сентябре для повышения морозостойкости.

5. Регулярная санитарная и формирующая обрезка после цветения, чтобы не повредить двухгодичные побеги, несущие основное количество цветочных почек (важно учитывать, что чрезмерная стрижка ведет к уменьшению цветоносных побегов). Укорачивание отцветших побегов не более чем на треть, прореживание загущенных участков.

6. Укрытие (в отдельных случаях) для защиты в зимнее время до наступления ранней весны.

Значимыми для растений показателями, характеризующими климатические условия, являются переходы среднесуточной температуры воздуха через 0, +5, +10, +15 °С и продолжительность периодов с температурой воздуха выше и ниже указанных пределов (табл. 2).

Так, фенофаза набухания почек у форзиции европейской в г. Архангельске происходит во второй декаде мая сразу же после перехода температуры воздуха через +5 °С. Фенофаза, характеризующая конец вегетации древесных пород, наступает сразу же после перехода температуры воздуха через 0 °С, что обеспечивает удовлетворительную подготовленность к зиме. Опадение листьев после устойчивого перехода температуры воздуха через –5 °С снижает показатели зимостойкости и морозостойкости вида.

Т а б л и ц а 2

**Важные переходы температуры воздуха
(по данным авторов)**

**Important air temperature transitions
(according to the authors' data)**

Температурный фон, °С	Дата		Длительность периода, сут.
> 0	18.04	22.10	186
> 5	13.05	29.09	138
> 10	4.06	5.09	92
> 15	3.07	6.08	33
< 0	22.10	18.04	179
< –5	14.11	29.03	136
< –10	13.12	6.03	84

Фаза распускания листьев зафиксирована в третьей декаде мая и к началу июня облиственность становится полной. Плодоношение оценивается в 1–2 балла, т. е. его интенсивность ниже, чем интенсивность цветения, что закономерно при интродукции в направлении на север.

Окончание роста побегов, появление осенней окраски листьев и листопад свидетельствуют о конце вегетации древесных растений. У форзиции европейской зеленая окраска листьев сохраняется вплоть до их опадения, листопад происходит в течение месяца — с середины октября по середину ноября, что



Рис. 3. Осеннее расцветивание листьев *Forsythia europaea* Vahl
Fig. 3. Autumn leaf coloring of *Forsythia europaea* Vahl

значительно позже, чем у других инорайонных кустарников региона. Небольшое расцветивание происходит начиная со второй половины октября и затрагивает в первую очередь проводящую систему листа, цвет сменяется на бурый, а затем на желтый, не оказывая заметного влияния на общий облик растения (рис. 3). Однако в ареале естественного обитания у форзиции европейской осенью листья пурпурного цвета, у отдельных сортов — ярко-желтые или бледно-фиолетовые.

Вызревание побегов связано с лигнификацией клеточных оболочек. Вовремя завершённый процесс одревеснения оказывает значительное влияние и на зимостойкость растений. Неодревесневшие побеги к моменту наступления отрицательных температур сильно обмерзают.

Плоды собраны в начале июня, проведены их замеры. Биометрические данные плодов соответствуют видовым особенностям: длина $5,0 \pm 0,01$ мм, ширина $3,0 \pm 0,01$ мм, толщина $1,0 \pm 0,01$ мм. Масса 100 шт. плодов $0,2 \pm 0,01$ г. Путём взрезывания обнаружено, что все собранные коробочки пустые, невызревание семян, вероятно, связано с тем, что в период их формирования недостаточно тепла, так как климатические особенности весны в регионе исследования значительно отличаются от таковых в естественном местопроизрастании вида (табл. 3).

По литературным данным [24, 25] слабое завязывание семян также объясняется тем, что в культуре у форзиции часто отсутствуют цветки одной из форм (короткостолбчатые или длинностолбчатые), необходимые для переопыления, которое осуществляют насекомые.

Общая продолжительность вегетации *Forsythia europaea* Vahl в Архангельской агломерации составляет 165 сут. Анализ фенологической информации показал, что начало вегетации сдвинуто на позднюю весну, цветение по интенсивности и продолжительности не уступает таковому на родине вида, что свидетельствует об адаптации. В то же время исследования показали, что все плоды-коробочки пустые.

В течение календарного года проводили комплексную оценку (в баллах) декоративности инорайонного кустарника, по адаптированной авторской методике декоративность оценивали в баллах [21]:

Архитектоника кроны.....	3
Длительность цветения.....	3
Степень цветения.....	4
Окраска, величина цветков.....	4
Привлекательность внешнего вида	
плодов.....	3
Аромат цветков, плодов, листьев.....	3
Осенняя окраска листьев.....	4
Продолжительность облиствения.....	3
Повреждаемость.....	4
Зимостойкость.....	4

Т а б л и ц а 3

**Среднесуточная температура в г. Архангельске
(по данным авторов)**

Average daily temperature in Arkhangelsk (according to the authors' data)

Месяц	Температура воздуха, °С		
	среднесуточная	минимальная	максимальная
Январь	-11,1	-14,8	-6,9
Февраль	-10,7	-14,1	-5,7
Март	-8,5	-12,9	-3,1
Апрель	-1,5	-5,0	3,6
Май	6,6	3,0	10,8
Июнь	12,4	8,6	16,2
Июль	15,6	12,0	19,5
Август	13,7	10,5	17,1
Сентябрь	8,1	5,6	11,3
Октябрь	2,6	0,6	4,8
Ноябрь	-3,7	-7,1	-1,6
Декабрь	-8,5	-11,7	-5,5
Итого:	1,2	-17,7	20,5

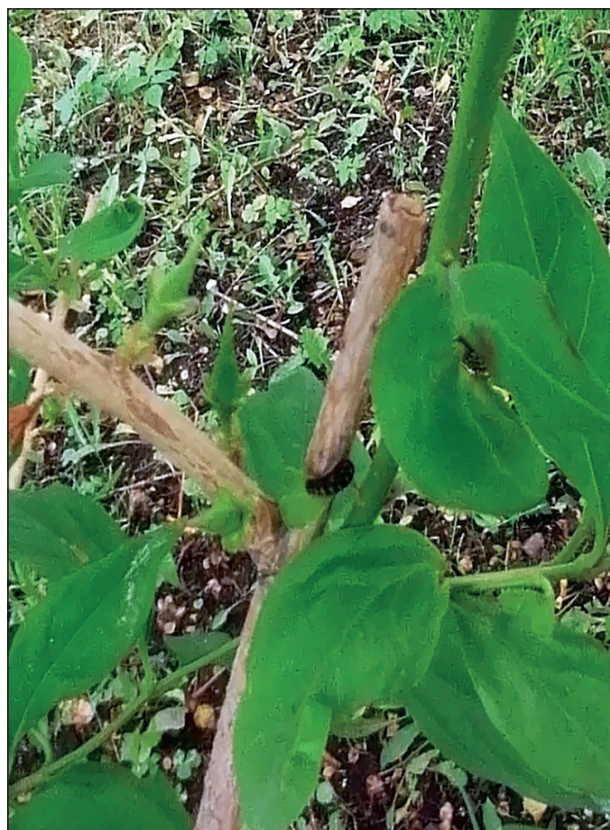


Рис. 4. *Acronicta alni* Linnaeus на ассимиляционном аппарате

Fig. 4. *Acronicta alni* Linnaeus on the assimilation apparatus

Степень декоративности *Forsythia europaea* Vahl в условиях г. Архангельска высокая — 35 баллов. Такой показатель обеспечивается прежде всего высокими баллами санитарного состояния, цветения и зимостойкости.

Санитарное состояние форзиции европейской характеризуется как хорошее, поскольку имеются ветви, которые подверглись обмерзанию, листья повреждены насекомыми-филлофагами; при этом отсутствуют хлорозы, некрозы, пигментации. Наличие энтомовредителя *Acronicta alni* Linnaeus приводит к изъятию не более 5 % площади листовой поверхности (рис. 4).

Выполнена интегральная оценка перспективности интродукции по следующим восьми показателям: зимостойкости, сохранению габитуса, способности растений к генеративному развитию, степени ежегодного вызревания побегов, возможным способам размножения в культуре, регулярности прироста побегов, побегообразовательной способности, степени повреждаемости вредителями и болезнями [28]. Форзиция европейская в г. Архангельске относится к группе II перспективности интродукции:

Зимостойкость, балл.....	2
Сохранение габитуса, балл.....	3
Генеративное развитие, балл.....	0
Вызревание побегов, группа.....	2-я
Способность размножения в культуре.....	низкая
Прирост побегов, мм.....	270
Побегообразовательная способность.....	средняя
Повреждение вредителями и болезнями, %.....	5

Зимостойкость — показатель, который может варьировать по годам и зависит от множества факторов, в том числе от обеспечения растений влагой в течение предшествующего года, температурного режима осени, проведенных за период исследования агротехнических

Акклиматизационное число дендроинтродуцента
Acclimatization number of the introduced dendro-introducer

Ежегодный рост		Генеративное развитие			Устойчивость к зимним условиям		Акклиматизационное число А	Степень адаптации
длина прироста, мм	балл	цветение и плодоношение, балл	качество семян, %	балл	по шкале ГБС	балл		
270	2	2	0	2	II	4	66	хорошая

мероприятий. Так, в 2023 г. балл зимостойкости у форзиции европейской в г. Архангельске был выше, чем в 2024 г.

Сохранение габитуса — важный показатель при введении новых пород в культуру, характеризующий степень адаптации вида, в данном случае форма произрастания у растения сохраняется, что для кустарников вполне ожидаемо.

Балл генеративного развития у форзиции, по нашим данным, довольно низкий, что объясняется отсутствием вызревших семян. В то же время интенсивность цветения, согласно глазомерно-фенологической оценке по шкале В.Г. Каппера [22] для кустарников, составляет 2 балла, т. е. цветение среднее (цветки на половине ветвей).

Группа вызревания побегов определена по описанной выше методике. Вторая категория соответствует частично одревесневшим побегам, характеризующимся прекращением роста лишь с наступлением отрицательных температур и длительным удержанием листвы на ветвях.

Указанная низкая способность размножения в культуре объясняется экстремальностью района для форзиции европейской и применением растения в качестве дендрораритета, т. е. ограничено.

Прирост побегов и побегообразовательная способность у исследуемого кустарника определена как средняя и высокая, что в целом характерно для кустарников, условия роста в течение летнего периода благоприятные.

Степень поражения вредителями и болезнями у исследуемого вида невелика, что объясняется несформированностью консортивных связей у нового вида в данных условиях.

Для оценки степени адаптации интродуцентов применяется методика, изложенная в работе [29]. Акклиматизационное число «А» рассчитывается по формуле

$$A = P \cdot B1 + Gr \cdot B2 + Zm \cdot B3,$$

где P — оценка роста;

Gr — оценка генеративного развития;

Zm — оценка зимостойкости;

B1, B2, B3 — коэффициенты весомости признаков: B1 = 2, B2 = 5, B3 = 13.

В ходе подсчета «акклиматизационного числа» рост интродуцента оценивали по длине прироста годичного побега, характер генеративного развития — по шкале интенсивности цветения и плодоношения В.Г. Каппера [22] и качеству семян; зимостойкость — по шкале ГБС АН [28]. По полученным результатам, адаптивная способность форзиции в г. Архангельске характеризуется как «хорошая», что обеспечивается ростом побегов и цветением, однако качество семян низкое (табл. 4).

На основании комплексных исследований нами составлена сводная таблица, характеризующая видовые особенности форзиции европейской (табл. 5). Особенности ритма сезонного развития показали сокращение периода вегетации при сохранении сроков цветения, что характерно для многих интродуцентов на северных территориях [11, 15, 26, 36]. Внешний вид кустарника, линейные размеры цветков и плодов соответствуют биологическим особенностям вида.

Указанные характеристики инорайонного кустарника *Forsythia europaea* Vahl позволяют использовать его в озеленении г. Архангельска в качестве дендрораритета, т. е. как единичный экземпляр древесного вида в данной местности. Такие показатели, как высота растения, ежегодный прирост побегов, санитарное состояние, биометрические характеристики плодов, особенности ритмов сезонного развития и декоративность находятся в пределах биологической и экологической характеристик вида. При этом ограничивающим фактором для всех древесных интродуцентов в пределах г. Архангельска является тепловой режим. У данного вида обмерзает не более 50 % длины однолетних побегов, значительное обмерзание может происходить в годы с экстремально низкими температурами воздуха.

Т а б л и ц а 5
**Адаптационные реакции
 дендроинтродуцента**
Adaptation responses of dendro-introducer

Параметр	Характеристика
Фенотипические особенности: высота растения, м диаметр стволиков, см	1,7 3–4
Ежегодный прирост побегов, м	0,27 ± 0,050
Санитарное состояние	Хорошее
Биометрическая характеристика плодов, мм: длина ширина толщина	5,0 ± 0,01 3,0 ± 0,01 1,0 ± 0,01
Ритм сезонного развития	Период вегетации сокращен, срок цве- тения сохраняется
Репродуктивные свойства (качество семян), %	0
Степень зимостойкости по шкале ГБС АН обмерзает не более 50 % длины однолетних побегов	II
Индекс морозоустойчивости по шкале ГБС АН значительно обмерзает	12,3
Декоративность, балл высокая	35
Интегральная оценка перспек- тивности интродукции II группа	13
Акклиматизационное число по шкале Н.А. Кохно адаптивная способность хорошая	66

Вопрос подбора ассортимента изучается учеными в течение длительного времени [30–36]. Считаем, что ассортимент можно подобрать с применением дендрораритетов — особей, отличающихся необычными для вида показателями (размером, возрастом) или пород, уникальных и редких для данной местности.

Выводы

1. Форзиция европейская — уникальный дендроинтродуцент в озеленении г. Архангельска.

2. Фенологическими исследованиями установлено, что цветение данного вида в условиях г. Архангельска происходит в соответствии с биологическими особенностями до распускания листьев. Удержание листвы на ветвях

вплоть до установления отрицательных температур значительно снижает устойчивость вида к зимним условиям. Другие стадии развития соответствуют климатическим особенностям региона. Плоды образуются в небольшом количестве, семена не вызревают.

3. Принимая во внимание существующие рекомендации по районированию пород, согласно которым форзиция европейская не применяется в основном ассортименте древесных растений в данном климатическом поясе, при ее посадке следует учитывать микроклиматические характеристики места произрастания. Солнечная сторона и ограждение от господствующих в регионе северных и северо-западных ветров расширяют возможности для его культивирования.

4. Санитарное состояние согласно примененным методикам оценивается как хорошее. Зимостойкость составляет II балла (обмерзают однолетние побеги). Индекс морозоустойчивости — 12,3, что соответствует характеристике «значительно обмерзает» в ее нижнем пределе, означающем обмерзание без потери декоративных качеств. Декоративность составляет 35 баллов (высокая степень).

5. Исследование уникального для озеленения г. Архангельска дендроинтродуцента *Forsythia europaea* Vahl следует продолжить, в целях выявления возможности его размножения в культуре путем зеленого черенкования.

Список литературы

- [1] Демидов А.С. Хранят в тепле оранжереи... К 65-летию Главного ботанического сада // Цветоводство, 2010. № 5. С. 14–15.
- [2] Дроздов И.И., Дроздов Ю.И. Лесная интродукция. М.: МГУЛ, 2003. 135 с.
- [3] Мелехов И.С. Интродукция хвойных в лесном хозяйстве // Лесоведение, 1984. № 6. С. 72–78.
- [4] Демидова Н.А., Дуркина Т.М., Гоголева Л.Г., Васильева Н.Н. Результаты интродукционного испытания представителей рода *Betula* L. европейской флоры в коллекции дендрологического сада имени В.Н. Нилова // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова, 2022. № 1(66). С. 83–90. DOI 10.34655/bgsha.2022.66.1.011
- [5] Демидова Н.А., Дуркина Т.М., Гоголева Л.Г., Васильева Н.Н. Представители семейства сосновые (*Pinaceae* Lindl.) североамериканской флоры в коллекции дендрологического сада ФБУ «СЕВНИИЛХ» // ИзВУЗ Лесной журнал, 2021. № 4(382). С. 36–54. DOI 10.37482/0536-1036-2021-4-36-54
- [6] Воронцова К.А., Шавнин С.А., Сродных Т.Б. Особенности роста и развития *Forsythia Ovata* Nakai (форзиция яйцевидная) и ее использование в озеленении // Леса России и хозяйство в них, 2020. № 1(72). С. 64–71.

- [7] Колесников П.Г., Матвеева Р.Н., Братилова Н.П., Буторова О.Ф. Интродукция хвойных видов в дендрарии СибГУ имени академика М.Ф. Решетнёва // Хвойные бореальной зоны, 2023. Т. 41. № 6. С. 455–458. DOI 10.53374/1993-0135-2023-6-455-458
- [8] Карбасникова Е.Б., Зальвская О.С., Чухина О.В. Содержание тяжелых металлов в почве и древесной растительности в условиях городской агломерации // ИзВУЗ Лесной журнал, 2019. № 5(371). С. 216–223. DOI 10.17238/issn0536-1036.2019.5.216
- [9] Якушина Э.И. Древесные растения различного географического происхождения в озеленении г. Москвы // Интродукция древесных растений. М.: Лесная пром-сть, 1980. 158 с.
- [10] Зальвская О.С., Бабич Н.А. Импульсно-томографная диагностика состояния древесных пород в городских условиях // Хвойные бореальной зоны, 2023. Т. 41. № 1. С. 33–37. DOI 10.53374/1993-0135-2023-1-33-37
- [11] Сунгурова Н.Р., Солтани Г.А., Стрзадаускене С.Р. Особенности фенологии древесных видов на северном и южном пределе их ареалов в условиях интродукционного стресса // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 2. С. 49–58. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-2-49-58
- [12] Смирнов А.А. Интродукция и натурализация хвойных на Сахалине // ИзВУЗ Лесной журнал, 2013. № 5. С. 12–16.
- [13] Колесников А.И. Декоративная дендрология. М.: Лесная пром-сть, 1974. 704 с.
- [14] Лапин П.И., Калущий К.К., Калущая О.Н. Интродукция лесных пород. М.: Лесная пром-сть, 1979. 224 с.
- [15] Зальвская О.С., Бабич Н.А., Хамитов Р.С. Таксономическая структура видов дендрофлоры в урбаносистемах Архангельской области // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 2. С. 67–75. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-2-67-75
- [16] Сапелин А.Ю. Редкие виды древесных растений, встречающиеся в озеленении г. Москвы // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 2. С. 73–80. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-2-73-80
- [17] Лапин П.И. Интродукция древесных растений в средней полосе Европейской части СССР (научные основы, методы и результаты): дис. ... д-ра биол. наук. Л.: [б. и.], 1974. 134 с.
- [18] Булыгин Н.Е. Фенологические наблюдения над древесными растениями. Л.: Изд-во ЛТА, 1979. 96 с.
- [19] Малаховец П.М., Тисова В.А. Фенологические наблюдения за сезонным развитием деревьев и кустарников. Архангельск: Изд-во АГТУ, 1999. 48 с.
- [20] Молчанов А.А., Смирнов В.В. Методика определения прироста древесных растений. М.: Наука, 1967. 27 с.
- [21] Зальвская О.С., Бабич Н.А. Оценка декоративности насаждений // ИзВУЗ Лесной журнал, 2020. № 6(378). С. 98–110. DOI 10.37482/0536-1036-2020-6-98-110
- [22] Каппер В.Г. Об организации ежегодных систематических наблюдений над плодоношением древесных пород // Труды по лесному опытному делу, 1930. Вып. 8. С. 130–139.
- [23] ГОСТ 13056.1–97 – 13056.11–97. Семена деревьев и кустарников. Правила отбора образцов и методы определения посевных качеств семян. Введ. 1999–01–01. М.: Изд-во стандартов, 1998. 195 с.
- [24] Жизнь растений. В 6 т. Т. 5. Ч. 2. Цветковые растения / под ред. А.Л. Тахтаджяна. М.: Просвещение, 1981. С. 371, 373, 374.
- [25] Entry for Forsythia Vahl. Names in current use for extant plant genera. Electronic version 1.0. International Association for Plant Taxonomy. URL: <https://web.archive.org/web/20090506235812/http://www.bgbm.org/scripts/asp/IAPT/ncugentry.asp?name=Forsythia> (дата обращения 10.08.2025).
- [26] Нилов В.Н. Об интродукционных исследованиях дендрологического сада АИЛИЛХ // Вопросы интродукции хозяйственно ценных древесных пород на Европейском Севере. Архангельск: Изд-во АИЛИЛХ, 1989. С. 3–13.
- [27] Орлов Ф.Б. Интродукция древесной растительности на Севере // Лесное хозяйство, 1953. № 12. С. 39–42.
- [28] Лапин П.И., Сиднева С.В. Оценка перспективности интродукции древесных растений по данным визуальных наблюдений // Опыт интродукции древесных растений. М.: Наука, 1973. С. 7–67.
- [29] Кохно Н.А. К методике оценки успешности интродукции лиственных древесных растений // Теория и методы интродукции растений и зеленого строительства. Киев: Наукова думка, 1980. С. 129–135 с.
- [30] Орлов Ф.Б. Дендрарий Архангельского лесотехнического института // Лесное хозяйство, 1952. № 7. С. 91.
- [31] Нилов В.Н. Рекомендации по ассортименту древесных растений для озеленения городов и поселков Севера. Архангельск: Изд-во АИЛИЛХ. 1981. 19 с.
- [32] Малаховец П.М., Тисова В.А. Декоративные деревья и кустарники на Севере. Архангельск: Изд-во СОЛТИ, 2002. 128 с.
- [33] Зальвская О.С., Карбасникова Е.Б., Бабич Н.А. Аккумуляция свинца в урбаносистеме (на примере Архангельской агломерации) // Хвойные бореальной зоны, 2021. Т. 39. № 3. С. 191–196.
- [34] Kutakova N.A., Morozkova I.A., Vasiljeva N.N., Bashkina I.E., Aleksandrova Yu.V. Phenolic compounds in barberry and wild rose fruits // Russian Forestry J., 2019, no. 5(371), pp. 115–124. DOI 10.17238/issn0536-1036.2019.5.115
- [35] Хамитов Р.С., Антонов А.М., Пастухова Н.О., Попкова И.А., Боровикова А.А. Семеношение хвойных в условиях интродукции в г. Архангельске // Естественные и технические науки, 2023. № 5(180). С. 182–187.
- [36] Бабич Н.А., Карбасникова Е.Б., Андропова М.М., Зальвская О.С., Александрова Ю.В., Гаевский Г.П. Ступенчатая интродукция видов дендрофлоры в северо-восточную часть Русской равнины (обзор) // ИзВУЗ Лесной журнал, 2021. № 3(381). С. 73–85. DOI 10.37482/0536-1036-2021-3-73-85

Сведения об авторах

Залывская Ольга Сергеевна  — д-р с.-х. наук, профессор, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», o.zalyvskaya@narfu.ru

Бабич Николай Алексеевич — доктор с.-х. наук, профессор, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», n.babich@narfu.ru

Поступила в редакцию 13.11.2025.

Одобрено после рецензирования 05.12.2025.

Принята к публикации 18.02.2026.

EUROPEAN FORSYTHIA AS UNIQUE NONDISTRICT SHRUBBERY IN ARKHANGELSK LANDSCAPE

O.S. Zalyvskaya , **N.A. Babich**

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

o.zalyvskaya@narfu.ru

The article provides a comprehensive assessment of the dendro-introducer *Forsythia europaea* Vahl state on the territory of the Arkhangelsk agglomeration. The assortment selection in the northern cities remains relevant. Of scientific interest is the landscaping of both territories of limited use and special purposes, as well as public places such as parks, squares, boulevards, landscaping of streets. Between 2002 and 2023 an inventory of plantings in the city of Arkhangelsk was carried out, as a result of which the species *Forsythia europaea* Vahl, which is unusual for this climatic region, was identified. The article provides a comprehensive assessment of the *Forsythia europaea* on the territory of the Arkhangelsk agglomeration. The purpose of this work is to study the unique dendro-introducer *Forsythia europaea* Vahl growing in Arkhangelsk. As a result, data were obtained regarding the characteristics of its life activity such as winter hardiness, frost resistance, sanitary condition, decorativeness, seasonal development and growth. It was revealed that the non-district shrub goes through all the phenological phases characteristic of this species. The annual growth is $0,27 \pm 0,050$ m, shoot growth continues from June to August. The bush's preparedness for winter is satisfactory — by the beginning of September the shoots become lignified, the green color of the leaves remains until the leaves fall (late October). Flowering continues for more than 10 days until the leaves bloom. Fruiting is less intense than flowering, which is a common feature during the introduction of woody plants to the North. Flowering continues for more than 10 days before the leaves bloom. Fruiting is inferior in intensity to flowering, which is a common feature when introduced to the North. For the studied introduced species, an integral assessment for introduction and calculation of the acclimatization number were carried out according to generally accepted methods. Taking into account the recommendations on the zoning of rocks, we believe that the study of the dendro-introducer *Forsythia europaea* Vahl, which is unique for the landscaping of the city of Arkhangelsk, should be continued.

Keywords: *Forsythia europaea*, biodiversity, species composition, introductions of woody flora

Suggested citation: Zalyvskaya O.S., Babich N.A. *Forzitsiya yevropeyskaya — unikal'nyy inorayonnyy kustarnik v ozelenenii g. Arkhangel'ska* [European forsythia as unique nondistrict shrubbery in Arkhangelsk landscape]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2026, vol. 30, no. 2, pp. 76–88.

DOI: 10.17816/2542-1468-2026-2-76-88

References

- [1] Demidov A.S. *Khranyat v teplu oranzherei... K 65-letiyu Glavnogo botanicheskogo sada* [Greenhouses are kept warm... For the 65th anniversary of the Main Botanical Garden]. *Tsvetovodstvo* [Floriculture], 2010, no. 5, pp. 14–15.
- [2] Drozdov I.I., Drozdov Yu.I. *Lesnaya introduktsiya* [Forest Introduction]. Moscow: MGUL, 2003, 135 p.
- [3] Melekhov I.S. *Introduktsiya khvoynykh v lesnom khozyaystve* [Introduction of Conifers in Forestry]. *Lesovedenie*, 1984, no. 6, pp. 72–78.
- [4] Demidova N.A., Durkina T.M., Gogoleva L.G., Vasil'eva N.N. *Rezul'taty introduktsionnogo ispytaniya predstaviteley roda *Vetula* L. Evropeyskoy flory v kollektzii dendrologicheskogo sada im. V.N. Nilova* [Results of Introduction Testing

- of Representatives of the Genus *Betula* L. of the European Flora in the Collection of the V.N. Nilov Arboretum]. *Vestnik Buryatskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii im. V.R. Filippova* [Bulletin of the Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov], 2022, no. 1(66), pp. 83–90. DOI 10.34655/bgsha.2022.66.1.011
- [5] Demidova N.A., Durkina T.M., Gogoleva L.G., Vasil'eva N.N. *Predstaviteli semeystva sosnovye (Pinaceae Lindl.) severoamerikanskoy flory v kollektzii dendrologicheskogo sada FBU «SEVNILKKh»* [Representatives of the pine family (Pinaceae Lindl.) of the North American flora in the collection of the arboretum of the Federal Budgetary Institution «Severnaya Research Institute of Forestry»]. *Russian Forestry J.*, 2021, no. 4 (382), pp. 36–54. DOI 10.37482/0536-1036-2021-4-36-54
- [6] Vorontsova K.A., Shavnin S.A., Srodnykh T.B. *Osobennosti rosta i razvitiya Forsythia Ovata Nakai (forzitsiya yaytsevidnaya) i ee ispol'zovanie v ozelenenii* [Features of the growth and development of *Forsythia Ovata Nakai* (*forsythia ovata*) and its use in landscaping]. *Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh* [Forests of Russia and their management], 2020, no. 1 (72), pp. 64–71.
- [7] Kolesnikov P.G., Matveeva R.N., Bratilova N.P., Butorova O.F. *Introduktsiya khvoynykh vidov v dendrarii SIBGU im. M.F. Reshetneva* [Introduction of coniferous species in the arboretum of the M.F. Reshetnev Siberian State University]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the boreal zone], 2023, v. 41, no. 6, pp. 455–458. DOI 10.53374/1993-0135-2023-6-455-458
- [8] Karbasnikova E.B., Zalyvskaya O.S., Chukhina O.V. *Soderzhanie tyazhelykh metallov v pochve i drevesnoy rastitel'nosti v usloviyakh gorodskoy aglomeratsii* [Heavy Metal Content in Soil and Woody Vegetation in Urban Agglomeration Conditions]. *Russian Forestry J.*, 2019, no. 5(371), pp. 216–223. DOI 10.17238/issn0536-1036.2019.5.216
- [9] Yakushina E.I. *Drevesnye rasteniya razlichnogo geograficheskogo proiskhozhdeniya v ozelenenii g. Moskvy* [Woody Plants of Different Geographical Origins in Moscow Landscaping]. *Introduktsiya drevesnykh rasteniy* [Introduction of Woody Plants]. Moscow: Lesnaya prom-st' [Forestry], 1980, 158 p.
- [10] Zalyvskaya O.S., Babich N.A. *Impul'sno-tomografnaya diagnostika sostoyaniya drevesnykh porod v gorodskikh usloviyakh* [Pulse Tomographic Diagnostics of Tree Species Condition in Urban Conditions]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the Boreal Zone], 2023, v. 41, no. 1, pp. 33–37. DOI 10.53374/1993-0135-2023-1-33-37
- [11] Sungurova N.R., Soltani G.A., Strazdauskene S.R. *Osobennosti fenologii drevesnykh vidov na sevenom i uznom predele ih arealov v usloviyakh introduktsionnogo stressa* [Tree species phenology at northern and southern borders of their habitat under conditions of introduction stress]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 2, pp. 49–58. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-2-49-58
- [12] Smirnov A.A. *Introduktsiya i naturalizatsiya khvoynykh na Sakhaline* [Introduction and naturalization of conifers on Sakhalin]. *Russian Forestry J.*, 2013, no. 5, pp. 12–16.
- [13] Kolesnikov A.I. *Dekorativnaya dendrologiya* [Ornamental Dendrology]. Moscow: Lesnaya Promyshlennost' [Forestry], 1974, 704 p.
- [14] Lapin P.I., Kalutskiy K.K., Kalutskaya O.N. *Introduktsiya lesnykh porod* [Introduction of Forest Species]. Moscow: Lesnaya Promyshlennost', 1979, 224 p.
- [15] Zalyvskaya O.S., Babich N.A., Khamitov R.S. *Taksonomicheskaya struktura vidov dendroflory v urbanosistemakh Arkhangel'skoy oblasti* [Taxonomic structure of dendroflora species in Arkhangelsk region urban systems]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 2, pp. 67–75. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-2-67-75
- [16] Sapelin A.Yu. *Redkie vidy drevesnykh rasteniy, vstrechayushchiesya v ozelenenii g. Moskvy* [Rare species of woody plants in Moscow landscaping]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 2, pp. 73–80. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-2-73-80
- [17] Lapin P.I. *Introduktsiya drevesnykh rasteniy v sredney polose Evropeyskoy chasti SSSR (Nauchnye osnovy, metody i rezul'taty): dis. ... d-ra biol. nauk.* [Introduction of woody plants in the central zone of the European part of the USSR (Scientific foundations, methods, and results)]. Dis. Dr. Sci. (Biol.). Leningrad: [b. i.], 1974, 134 p.
- [18] Bulygin N.E. *Fenologicheskie nablyudeniya nad drevesnymi rasteniyami* [Phenological observations of woody plants]. Leningrad: LTA, 1979, 96 p.
- [19] Malakhovets P.M., Tisova V.A. *Fenologicheskie nablyudeniya za sezonnyim razvitiem derev'ev i kustarnikov* [Phenological observations of the seasonal development of trees and shrubs]. Arkhangelsk: Arkhangelsk State Technical University Publishing House, 1999, 48 p.
- [20] Molchanov A.A., Smirnov V.V. *Metodika opredeleniya prirosta drevesnykh rasteniy* [Methodology for determining the growth of woody plants]. Moscow: Nauka, 1967, 27 p.
- [21] Zalyvskaya O.S., Babich N.A. *Otsenka dekorativnosti nasazhdeniy* [Evaluation of the ornamental value of plantings]. *Russian Forestry J.*, 2020, no. 6 (378), pp. 98–110. DOI 10.37482/0536-1036-2020-6-98-110
- [22] Kapper V.G. *Ob organizatsii ezhegodnykh sistemicheskikh nablyudeniy nad plodonosheniem drevesnykh porod* [On the organization of annual systematic observations of the fruiting of tree species]. *Trudy po lesnomu opytному delu* [Proceedings on experimental forestry], 1930, iss. 8, pp. 130–139.
- [23] GOST 13056.1–97 – 13056.11–97 *Semena derev'ev i kustarnikov. Pravila otbora obraztsov i metody opredeleniya posevnykh kachestv semyan* [Seeds of trees and shrubs. Rules for sampling and methods for determining the sowing qualities of seeds. Introduced. 1999–01–01]. Moscow: Publishing House of Standards, 1998, 195 p.
- [24] *Zhizn' rasteniy. V 6-ti t. T. 5. Ch. 2. Tsvetkovyye rasteniya* [Life of Plants, in 6 v., v. 5, part 2. Flowering Plants]. Ed. A.L. Takhtadzhyan. Moscow: Prosveshchenie, 1981, pp. 371, 373, 374.
- [25] Entry for *Forsythia* Vahl. Names in current use for extant plant genera. Electronic version 1.0. International Association for Plant Taxonomy. Available at: <https://web.archive.org/web/20090506235812/http://www.bgbm.org/scripts/asp/IAPT/ncugentry.asp?name=Forsythia> (accessed 10.08.2025).

- [26] Nilov V.N. *Ob introduktsionnykh issledovaniyakh dendrologicheskogo sada AILiLKh* [On introduction studies of the arboretum of the AILiLH]. *Voprosy introduktsii khozyaystvenno tsennykh drevesnykh porod na Evropeyskom Severe* [Issues of introduction of economically valuable tree species in the European North]. Arkhangel'sk: AILiLH, 1989, pp. 3–13.
- [27] Orlov F.B. *Introduktsiya drevesnoy rastitel'nosti na Severe* [Introduction of woody vegetation in the North]. *Lesnoe khozyaystvo* [Forestry], 1953, no. 12, pp. 39–42.
- [28] Lapin P.I., Sidneva S.V. *Otsenka perspektivnosti introduktsii drevesnykh rasteniy po dannym vizual'nykh nablyudeniy* [Evaluation of the prospects for the introduction of woody plants based on visual observations]. *Opyt introduktsii drevesnykh rasteniy* [Experience in the introduction of woody plants]. Moscow: Nauka, 1973, pp. 7–67.
- [29] Kokhno N.A. *K metodike otsenki uspeshnosti introduktsii listvennykh drevesnykh rasteniy* [On the Methodology for Evaluating the Success of Introducing Deciduous Woody Plants]. *Teoriya i metody introduktsii rasteniy i zelenogo stroitel'stva* [Theory and Methods of Plant Introduction and Green Construction]. Kyiv: Naukova Dumka, 1980, pp. 129–135.
- [30] Orlov F.B. *Dendrariy Arkhangel'skogo lesotekhnicheskogo instituta* [Arboretum of the Arkhangel'sk Forestry Institute]. *Lesnoe khozyaystvo* [Forestry], 1952, no. 7, p. 91.
- [31] Nilov V.N. *Rekomendatsii po assortimentu drevesnykh rasteniy dlya ozeleneniya gorodov i poselkov Severa* [Recommendations for the Assortment of Woody Plants for Landscaping Cities and Towns in the North]. Arkhangel'sk, 1981, 19 p.
- [32] Malakhovets P.M., Tisova V.A. *Dekorativnye derev'ya i kustarniki na Severe* [Ornamental trees and shrubs in the North]. Arkhangel'sk: SOLTI, 2002, 128 p.
- [33] Zalyvskaya O.S., Karbasnikova E.B., Babich N.A. *Akkumulyatsiya svintsy v urbanosisteme (na primere Arkhangel'skoy aglomeratsii)* [Lead accumulation in the urban system (on the example of the Arkhangel'sk agglomeration)]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the boreal zone], 2021, v. 39, no. 3, pp. 191–196.
- [34] Kutakova N.A., Morozkova I.A., Vasiljeva N.N., Bashkina I.E., Aleksandrova Yu.V. Phenolic compounds in barberry and wild rose fruits. *Russian Forestry J.*, 2019, no. 5(371), pp. 115–124. DOI 10.17238/issn0536-1036.2019.5.115
- [35] Khamitov R.S., Antonov A.M., Pastukhova N.O., Popkova I.A., Borovikova A.A. *Semenoshenie khvoynykh v usloviyakh introduktsii v g. Arkhangel'ske* [Seed production of conifers under conditions of introduction in Arkhangel'sk]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Natural and technical sciences], 2023, no. 5(180), pp. 182–187.
- [36] Babich N.A., Karbasnikova E.B., Andronova M.M., Zalyvskaya O.S., Aleksandrova Yu.V., Gaevskiy G.P. *Stupenchataya introduktsiya vidov dendroflory v severo-vostochnuyu chast' Russkoy ravniny (obzor)* [Stepwise introduction of dendroflora species into the North-Eastern part of the Russian Plain (review)]. *Russian Forestry J.*, 2021, no. 3(381), pp. 73–85. DOI 10.37482/0536-1036-2021-3-73-85

Authors' information

Zalyvskaya Olga Sergeevna  — Dr. Sci. (Agriculture), Professor of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, o.zalyvskaya@narfu.ru

Babich Nikolay Alekseevich — Dr. Sci. (Agriculture), Professor of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, n.babich@narfu.ru

Received 13.11.2025.

Approved after review 05.12.2025.

Accepted for publication 18.02.2026.

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

ПЛАНИРОВКА И СОСТОЯНИЕ СКВЕРОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ГОРОДА ЕКАТЕРИНБУРГА

Т.Б. Сродных[✉], П.С. Протазанова

ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (УГЛТУ), Россия, 620100,
г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, д. 37

tata.srodnykh@mail.ru

Представлены результаты комплексного исследования пяти скверов, расположенных в центральной исторической части города Екатеринбурга. Предложен вариант типологии или классификации скверов по периодам их создания. Актуальность работы обусловлена интенсивными процессами урбанизации, уплотнением городской застройки и необходимостью сохранения и рационального использования существующих озелененных пространств. В работе использованы методы натурального обследования, подеревной инвентаризации и анализа планировки с привлечением архивных данных. Установлено, что формирование скверов проходило преимущественно в два периода: 1930–1950-е гг. («исторические») и вторая половина XX в. Видовой состав насаждений скверов включает 21 вид деревьев и кустарников с доминированием липы мелколистной и яблони ягодной. Возраст деревьев составляет в среднем 50–80 лет, санитарное состояние оценивается как удовлетворительное, но ослабленное (2,4...2,9 балла). Выявлены различия в плотности посадок деревьев (от 99 до 272 шт./га) и планировке. Для «исторических» скверов характерна регулярная планировка (осевая композиция), для более поздних временных периодов — пейзажная. Функции скверов дифференцированы (декоративная, транзитная, рекреационная, мемориальная). Предложенная типология позволяет систематизировать озелененные пространства и обосновать подходы к их сохранению с учетом историко-культурной значимости.

Ключевые слова: сквер, планировка, насаждения, санитарное состояние, функциональное назначение

Ссылка для цитирования: Сродных Т.Б., Протазанова П.С. Планировка и состояние скверов центральной части города Екатеринбурга // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2026. Т. 30. № 2. С. 89–101. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-2-89-101

Екатеринбург — крупный мегаполис, четвертый по численности населения город России (1 548 187 чел.). В 2023 г. отметил свое 300-летие. Город динамично развивается, расширяется, занимая все новые территории, сокращая площади расположенных по периметру лесных массивов и лесопарков. Эти неизбежные изменения продиктованы процессом урбанизации, подталкивающим нас к более бережному и внимательному отношению к существующим в городе скверам и паркам. Город компактно застроен, особенно в центральной части. Поэтому обследование и изучение расположенных здесь городских объектов приобрело широкую актуальность. Всего в Екатеринбурге насчитывается 105 скверов [1], значительная часть которых была сформирована в XX столетии. В рамках данного исследования рассматриваются пять скверов, расположенных в центральной части города [2].

Цель работы

Цель работы — изучение планировки и состояния насаждений скверов центральной части города Екатеринбурга и попытка их классификации.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являются: скверы Центрального планировочного района Екатеринбурга: сквер у здания Оперного театра, сквер на площади Кирова, сквер Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), сквер «Площадь Обороны», сквер имени Александра Канделя.

Проведены визуальный осмотр и детальная подеревная инвентаризация на пяти объектах. В ходе работы были определены высота деревьев и диаметр их стволов на высоте 1,3 м от поверхности земли, а также дана оценка санитарного состояния насаждений [3, 4]. Анализ планировки скверов проведен с использованием классификации А.Д. Жирнова [5]. Видовой

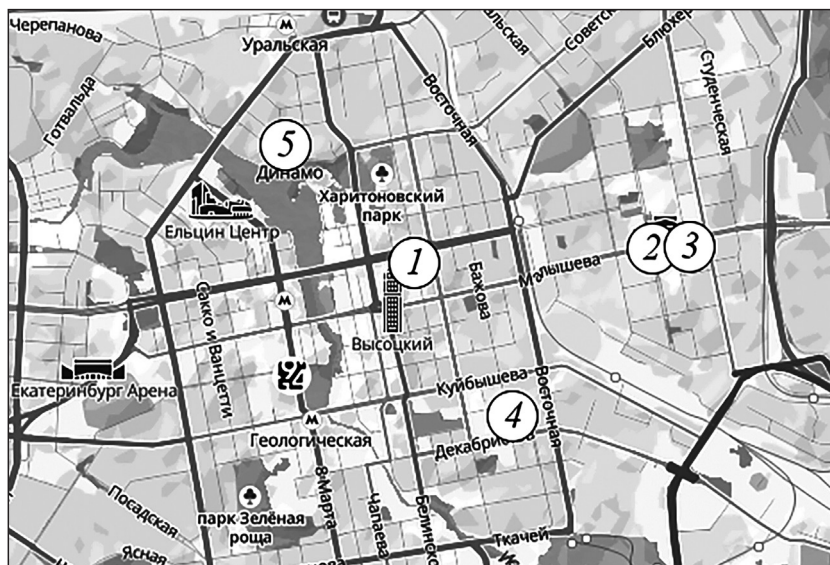


Рис. 1. Расположение скверов центральной части города Екатеринбурга: 1 — сквер у здания Оперного театра; 2 — сквер на площади Кирова; 3 — сквер Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ); 4 — сквер «Площадь Оборонны»; 5 — сквер имени Александра Канделя

Fig. 1. Location of public gardens in the central part of Yekaterinburg: 1 — public garden near the Opera House; 2 — public garden on Kirov Square; 3 — public garden of the Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU); 4 — Oborony Square; 5 — Alexander Kandel Square

состав установлен с помощью определителя [6] и других источников [7] (рис. 1).

История создания сквера у здания Оперного театра начинается с формирования Дровяной площади, которая в XIX в. имела торговое значение. В первой половине XIX в. интенсивно заселялись новые кварталы города. Площадь имела название «Щелковская». Здесь находилось здание Евангелической лютеранской церкви святых Петра и Павла, сооруженной из камня в 1873 г., и первого деревянного цирка в городе, построенного спустя 10 лет после появления церкви. В цирке давались не только представления, но и ставились драматические спектакли, проводились киносеансы.

До настоящего времени оба здания не сохранились — цирк сгорел в 1910 г., а церковь сначала закрыли, а затем разрушили. За это время Дровяная площадь поменяла свое значение с торгового на культурное и стала называться Театральной площадью. На месте сгоревшего цирка был установлен памятник Максиму Горькому, а на месте разрушенной церкви построено здание театра оперы и балета [8].

Тогда, собственно, и был создан сквер у здания Оперного театра, на Театральной площади в 1930-х годах. Планировка сквера принадлежит архитектору Н.А. Бойно-Родзевич [9] (рис. 2).

В 2018–2019 гг. была проведена реконструкция сквера у здания Оперного театра Екатеринбурга в рамках муниципальной программы «Формирование комфортной городской среды» [11]. Сквер выполняет несколько функций: рекреационную, декоративную, санитарно-защитную и транзитную. Состав насаждений сквера и основные характеристики их представлены в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что среди древесных пород в данном сквере наиболее часто встречаются липа мелколистная (23,1%), клен ясенелистный (19,6%) и яблоня сибирская (13,0%) [12]. Санитарное состояние деревьев сложно назвать хорошим — средний возраст посадок в сквере составляет 60...80 лет, поэтому многие рано стареющие виды, например яблоня ягодная, имеют санитарное состояние ниже 3 баллов. За старыми деревьями проводятся мероприятия по уходу. Некоторые из крупных старых экземпляров лиственницы сибирской и липы мелколистной являются украшением сквера. В период реконструкции 2019 г. была удалена часть погибающих и сухостойных деревьев и высажено большое количество декоративных кустарников и сосны обыкновенной, доля которых составляет почти 10% (см. табл. 1). Спустя два года большинство посадок сосны погибло.

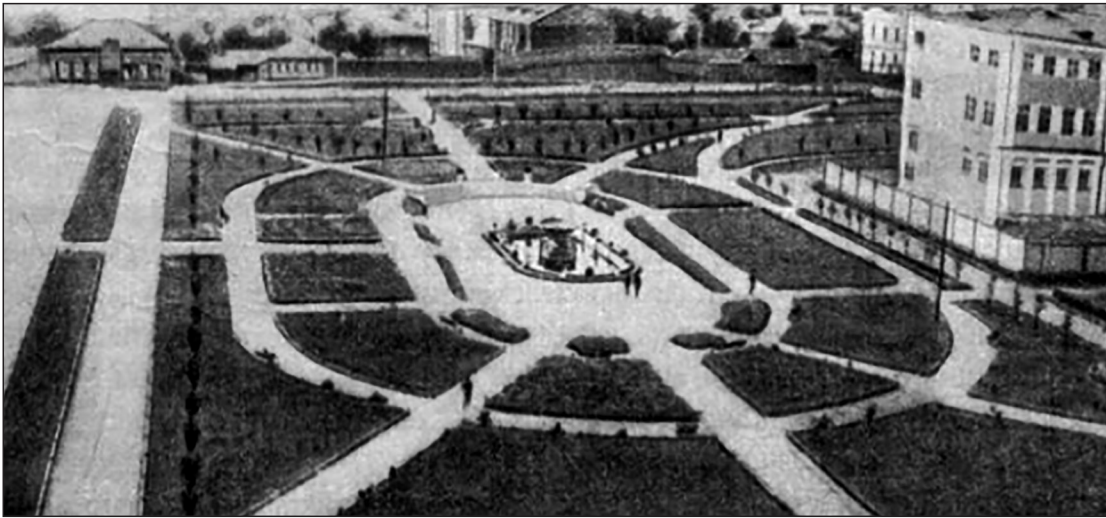


Рис. 2. Планировка сквера возле здания Оперного театра Екатеринбурга в советское время [10]
Fig. 2. Layout of the public garden near the Yekaterinburg Opera House during the Soviet era [10]

Основное назначение сквера — декоративное и рекреационное, а также транзитное.

История создания сквера на площади Кирова ведет отсчет с 1916 г. от начала строительства Уральского государственного горного университета, прерванного революционными событиями. В 1930-е годы здание почти полностью разобрали и в 1940 г. взорвали. Однако еще в 1929 г. был объявлен конкурс на проект Уральского политехнического института (УПИ), ставший впоследствии основой современного района Втузгородок. Главный учебный корпус был завершён к 1939 г., а в 1947 г. на большом пустыре перед УПИ был установлен памятник С.М. Кирову, от которого к остановке трамвая на ул. Ленина вела единственная дорожка [13].

По проекту архитектора Г. Шауфлера, была проведена масштабная реконструкция пустыря: разбит большой сквер с ценными породами деревьев, в частности дубом, липой и серебристой елью, высажены цветники с декоративными кустарниками, травами и цветами. Рядом с площадью построили два больших жилых дома. Однако не все задуманное было реализовано. Согласно проекту, в сквере планировалось установление фонтана из каслинского чугуна [14].

Из табл. 2 следует, что ассортимент видов древесных растений в сквере довольно разнообразен и представлен 14 наименованиями. Более половины из них составляет липа мелколистная — 73,9 %, с большим отрывом от нее представлены береза повислая — 11,8 %, вяз гладкий — 6,2 % и ель обыкновенная — 5,8 %. Менее 5 % приходится на такие декоративные виды, как груша уссурийская, лиственница сибирская, яблоня ягодная, рябина обыкновенная.

Т а б л и ц а 1
Характеристика насаждений сквера у здания Оперного театра
Planting characteristics of the public garden near the Opera House

Вид	Количество, шт.	Доля в насаждении, %	Санитарное состояние, средний балл
Липа мелколистная (<i>Tilia cordata</i> Mill.)	73	23,1	2,5
Клен ясенелистный (<i>Acer negundo</i> L.)	62	19,6	3
Яблоня сибирская (<i>Malus sibirica</i> L.)	41	13,0	3,2
Сосна кедровая сибирская (<i>Pinus Sibirica</i> Du Tour)	37	11,7	2
Сосна обыкновенная (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	30	9,5	3,3
Береза пушистая (<i>Betula pubescens</i> Ehrh)	22	7,0	2,7
Лиственница сибирская (<i>Larix sibirica</i> Ledeb.)	16	5,1	2,3
Остальные	35	11	3,0
Всего:	316	100,0	2,7

В небольшом количестве есть дуб черешчатый, клен татарский и некоторые другие.

Санитарное состояние растений в сквере удовлетворительное — за растениями ведется уход, регулярно проводится формованная стрижка кустарников.

Т а б л и ц а 2
Характеристика насаждений в сквере
на площади Кирова

Planting characteristics of the public garden
on Kirov Square

Вид	Количество, шт.	Доля в насаждении, %	Санитарное состояние, средний балл
Липа мелколистная (<i>Tilia cordata</i> Mill.)	583	73,9	2,7
Береза повислая (<i>Betula pendula</i> Roth)	93	11,8	2,7
Вяз гладкий (<i>Ulmus laevis</i> Pall.)	49	6,2	3,1
Ель обыкновенная (<i>Picea abies</i> L.)	46	5,8	2,6
Остальные виды	242	20,1	2,9
Всего:	789	100,0	2,8

Т а б л и ц а 3
Характеристика насаждений в сквере
Уральского федерального университета
имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина (УрФУ)

Characteristics of the plantings in the public garden
of the Ural Federal University named after
the first President of Russia B.N. Yeltsin

Вид	Количество, шт.	Доля в насаждении, %	Санитарное состояние, средний балл
Яблоня ягодная (<i>Malus baccata</i> (L.) Borkh.)	136	34,4	2,9
Липа мелколистная (<i>Tilia cordata</i> Mill.)	71	18,2	2,8
Береза повислая (<i>Betula pendula</i> Roth)	93	11,8	2,7
Клен татарский (<i>Acer tataricum</i> L.)	42	10,6	3,0
Вяз гладкий (<i>Ulmus laevis</i> Pall.)	26	6,6	2,8
Ива ломкая (<i>Salix fragilis</i> L.)	20	5,8	2,6
Остальные	100	25,3	2,9
Всего:	395	100,0	2,9

Основное функциональное назначение площади Кирова — декоративное и транзитное.

Площадь является единым ансамблем со сквером Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ) и прилегающими учебными корпусами, и жилыми домами.

Начало формирования площади, названной в 1934 г. в честь С.М. Кирова, уходит в 1916 г., когда был сооружен основной корпус на то время Екатеринбургского горного института. Изначальный проект площади и сквера не сохранился. В период с 1928 по 1939 г. был разработан и реализован новый сквер по проекту С.Е. Чернышова вместе со строительством корпусов УПИ [15]. В тот период был установлен памятник С.М. Кирову, разбиты клумбы и высажены различные древесные растения, включая лиственницу, дуб, березу, клен ясенелистный и боярышник [16].

Из табл. 3 следует, что подавляющее большинство древесных видов представлено яблоней ягодной — 34,4 %, есть липа мелколистная — 18,2 % и береза повислая — 11,8 %, на долю клена татарского приходится 10,6 %, еще меньше растений вяза гладкого и ивы ломкой — соответственно 6,6 и 5,8 %. Единично встречаются тополь бальзамический и ель обыкновенная.

Санитарное состояние насаждений в сквере УрФУ также имеет удовлетворительную оценку. Худшее состояние (4 балла) имеют ель обыкновенная и тополь бальзамический.

Основными функциями сквера являются рекреационная и транзитная. Это место отдыха студентов и сотрудников университета. Кроме того, сквер имеет декоративное назначение, поскольку представляет собой часть общего ландшафтно-архитектурного ансамбля.

Сквер «Площадь Обороны» расположен в пределах одноименной площади в Октябрьском районе города Екатеринбурга. Ее ограничивают улицы Луначарского — с запада, Тверитина — с юга, с севера расположены администрация Октябрьского района и центральная городская клиническая больница № 1, с востока — Центральное Погребальное Бюро и Градо-Екатеринбургская Симеоновская церковь-школа.

Название площади Обороны в Екатеринбурге неоднократно изменялось, как и ее облик. В 1885 г. здесь был открыт ночлежный дом на 600 мест, а в 1898 г. началось строительство церкви Святого Симеона Верхотурского. В 1906 г. появились новые строения, включая пожарную часть и арестный дом.

В 1919 г. площадь была переименована в честь Максима Горького. Во время Великой Отечественной войны здесь формировались военные части, а также был сборный пункт

для призываемых на фронт граждан. В 1940-е годы в честь воинов, воевавших и трудившихся в тылу, площадь получила свое нынешнее название [17].

В послевоенные годы площадь облагородили, высадили новые деревья и, по сути, сформировали сквер. В 2005 г. в пределах сквера была установлена монументальная скульптура «Седой Урал», созданная скульптором Г. Геворкяном, символизирующая значение Урала в деле победы над немецкими захватчиками. В День Победы в сквере проводятся митинги и встречи с ветеранами Великой Отечественной Войны, что свидетельствует о мемориальной функции сквера [18].

Из табл. 4 следует, что ассортимент сквера не отличается большим разнообразием — в его составе всего восемь видов. Больше половины насаждений сквера представлены яблоней ягодной — 59,4 %, довольно много посадок ясеня пенсильванского — 18,2 % и значительно меньше липы мелколистной — всего 13,5 %. В небольшом количестве распространены хвойные виды — ель обыкновенная, лиственница сибирская и сосна обыкновенная, единично — ива ломкая ф. шаровидная и черемуха обыкновенная.

Санитарное состояние в среднем удовлетворительное. Деревьев в хорошем состоянии практически нет, поскольку преобладают посадки, созданные в середине XX в.

Функционально площадь Обороны в первую очередь несет мемориальное назначение, что демонстрирует тесную связь места с событиями Великой Отечественной войны. Площадь, расположенная на пересечении улиц Тверитина и Луначарского, выполняет не только мемориально-декоративную функцию (оформление монумента), но и служит важным транзитным узлом, через который пролегают пешеходные маршруты.

Сквер имени Александра Канделя расположен в Железнодорожном районе города Екатеринбурга и ограничен улицами Николая Никонова — северная сторона, Красный переулок — северо-западная сторона, южная сторона расположена на набережной у городского пруда, восточная сторона ограничена улицей Дзержинского. Сквер соседствует с Дворцом игровых видов спорта «Уралочка», киноконцертным театром (ККТ) «Космос» и многофункциональным спортивным комплексом «Динамо».

Сквер имени Александра Канделя разбит на месте бывшего частного сектора, существовавшего здесь в начале XX в. и был частично снесен после постройки ККТ «Космос». В 1980-х годах территорию облагородили, проложив

Т а б л и ц а 4

Характеристика насаждений в сквере на площади Обороны

Characteristics of the plantings in the public garden on Oborony Square

Вид	Количество, шт.	Доля в насаждении, %	Санитарное состояние, средний балл
Яблоня ягодная (<i>Malus baccata</i> (L.) Borkh.)	180	59,4	2,9
Ясень пенсильванский (<i>Fraxinus pennsylvanica</i> Marsh.)	55	18,2	3,0
Липа мелколиственная (<i>Tilia cordata</i> MILL.)	41	13,5	2,5
Остальные виды	27	8,9	2,6
Всего:	303	100,0	2,8

Т а б л и ц а 5

Состав насаждений в сквере имени Александра Канделя

Composition of the plantings in the Alexander Kandel Public Garden

Вид	Количество, шт.	Доля в насаждении, %	Санитарное состояние, средний балл
Яблоня ягодная (<i>Malus baccata</i> (L.) Borkh.)	90	26,1	2,1
Тополь бальзамический (<i>Populus balsamifera</i> L.)	73	21,2	3,0
Клен ясенелистный (<i>Acer negundo</i> L.)	62	18,0	3,0
Яблоня Недзвецкого (<i>Malus niedzwetzkyana</i> Dieck)	59	17,1	2,1
Лиственница Сибирская (<i>Larix sibirica</i> Ledeb.)	21	6,1	2,7
Береза повислая (<i>Betula pendula</i> Roth)	22	6,4	2,0
Остальные	18	5,1	2,0
Всего:	345	100	2,4

аллеи из посадок сирени. В 1996 г. к 300-летию российского флота здесь был установлен памятник. В 2018 г. скверу присвоили имя Александра Канделя — выдающегося спортсмена, баскетболиста, лидера баскетбольной команды «Уралмаш», чемпиона Европы. На территории

Т а б л и ц а 6

Обобщенные данные по насаждениям скверов центральной части Екатеринбурга
Summarized data on plantings in public gardens in central Yekaterinburg

Наименование	Преобладающие виды деревьев	Санитарное состояние, средний балл	Плотность посадки деревьев, шт./га
Сквер у здания Оперного театра	Липа мелколистная, клен ясенелистный, яблоня ягодная	2,7	210
Сквер на площади Кирова	Липа мелколистная, береза повислая, вяз гладкий, ель обыкновенная	2,8	272
Сквер УрФУ	Яблоня ягодная, липа мелколистная, береза повислая, клен татарский, вяз гладкий, ива ломкая	2,9	99
Сквер «Площадь Обороны»	Яблоня ягодная, ясень пенсильванский, липа мелколистная	2,8	126
Сквер имени Александра Кандела	Яблоня ягодная, тополь бальзамический, яблоня Недзвецкого	2,4	102

сквера высадили аллеи яблони ягодной, с сохранением экземпляров старых древесных растений, в основном тополя бальзамического [19].

Из табл. 5 следует, что среди древесных пород в сквере наиболее часто встречаются яблоня ягодная (26,1 %), тополь бальзамический (21,2 %), клен ясенелистный (18,0 %) и яблоня Недзвецкого (17,1 %). Доля хвойных, представленных лиственницей сибирской, составляет 6,1 %. В аллеях и рядовых посадках задействованы преимущественно яблоня и лиственница сибирская. Единично встречаются ель обыкновенная и черемуха обыкновенная.

Хорошее состояние отмечается у более молодых посадок, созданных в период формирования сквера, в частности яблони ягодной и яблони Недзвецкого, лиственницы сибирской и березы повислой. Старые деревья тополя бальзамического и клена ясенелистного имеют худшее санитарное состояние — 3 балла.

Основная функция сквера — транзит и рекреация, однако имеет место и мемориальная функция, поскольку в сквере расположен памятник, посвященный 300-летию российского флота [20]. Декоративность насаждениям придают старые крупные деревья с красивыми кронами и декоративные кустарники.

Нами обобщены полученные результаты по составу и санитарному состоянию насаждений всех рассматриваемых скверов центрального городского района (табл. 6).

Из табл. 6 следует, что в изученных скверах часто встречаются шесть видов: липа мелколистная (747 шт.), яблоня ягодная (586 шт.), береза повислая (125 шт.), ясень пенсильванский (112 шт.), тополь бальзамический (107 шт.), клен ясенелистный (80 шт.) и вяз гладкий

(75 шт.). В целом состав насаждений всех пяти скверов довольно разнообразен: 21 вид из 10 семейств. Только два вида преобладают — они лидируют в четырех скверах из пяти: яблоня ягодная и липа мелколистная. О широком распространении этих видов в Екатеринбурге свидетельствуют и другие исследования [21, 22]. Неприхотливость и стабильность в городских посадках липы мелколистной также подтверждают многие специалисты [23–25]. Возраст деревьев изучаемых видов, широко применяемых в озеленении Екатеринбурга, в пределах исследованных скверов является значительным и варьирует в диапазоне от 50 до 80 лет, что обусловлено периодом их высадки в середине XX в. Вследствие указанного фактора санитарное состояние насаждений данных видов оценивается преимущественно низким баллом (3), что соответствует удовлетворительной, но сильно ослабленной категории. Для таких деревьев характерна значительная изреженность кроны и наличие сухих ветвей в объеме от 25 до 50 % [3, 4]. Исключение составляет сквер имени Александра Кандела. Он был создан во второй половине XX в. и посадки яблони ягодной имеют возраст 30...40 лет, их санитарное состояние хорошее — 2 балла, а средний балл по насаждениям сквера — 2,4.

В сквере у здания Оперного театра и в сквере на площади Кирова отмечается повышенная плотность посадки — 210 шт./га и 272 шт./га. В советское время большое значение уделялось санитарно-гигиенической функции городских насаждений, и такая высокая плотность посадки, видимо, соответствовала тем нормативам. Есть мнение, что количество высаживаемых деревьев зависит от многих факторов, прежде

всего от назначения сквера, а оба указанных сквера предназначены для проведения праздничных мероприятий [26]. Однако в сквере УрФУ низкие показатели по плотности, что, видимо, связано с удалением части перестойных деревьев. Здесь также наиболее неблагоприятный балл санитарного состояния — 2,9, в сквере на площади Обороны и в сквере имени Александра Канделя и плотность посадки значительно ниже и соответствует современным нормам плотности посадки в скверах [27].

Что касается планировки, то, в частности, сквер у здания Оперного театра имеет сложную структуру — основные элементы расположены по лучевой схеме вокруг центральной оси. Главным центром композиции является здание Оперного театра, второстепенным центром композиции служит фонтан, вокруг которого расположен амфитеатр. Композиция сложная: осевая + лучевая + кольцевая (рис. 3).

Сквер на площади Кирова и сквер УрФУ имеют единую планировочную концепцию и выполнены в регулярном стиле [28]. Сквер УрФУ отличается наличием осевой композиционной структуры с лучевой планировкой. Главными центрами композиции являются здание УрФУ, памятник С.М. Кирову и круглый цветник, расположенные на главной композиционной оси. Планировка сложная — осевая + лучевая, симметричная (рис. 4).

Сквер «Площадь Обороны» является пейзажным с элементами регулярного стиля и отличается лучевой планировочной структурой. Основная ось сквера — широкая диагональная

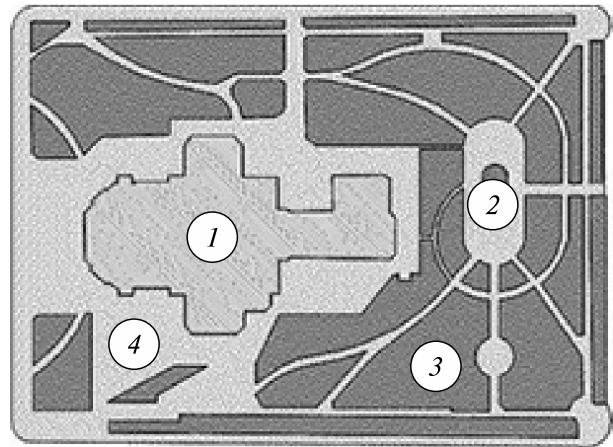


Рис. 3. Планировочная структура сквера у здания Оперного театра, г. Екатеринбург: 1 — здание театра; 2 — фонтан; 3 — дорожно-тропиночная сеть и площадки; 4 — озеленение

Fig. 3. Planning structure of the public garden near the Opera House, Yekaterinburg: 1 — Theatre building; 2 — Fountain; 3 — Road and path network and areas; 4 — Landscaping

дорожка, т. е. главный транзит, она подводит посетителей к центральной площадке с центром композиции — памятником «Седой Урал».

Основа планировки — лучевая схема. Центральная часть закольцована дорожками второго и третьего порядка. Планировка сквера лучевая + кольцевая, не симметричная, но равновесная (рис. 5).

Сквер имени Александра Канделя производит впечатление пейзажного, хотя несколько четких прямолинейных аллей демонстрируют

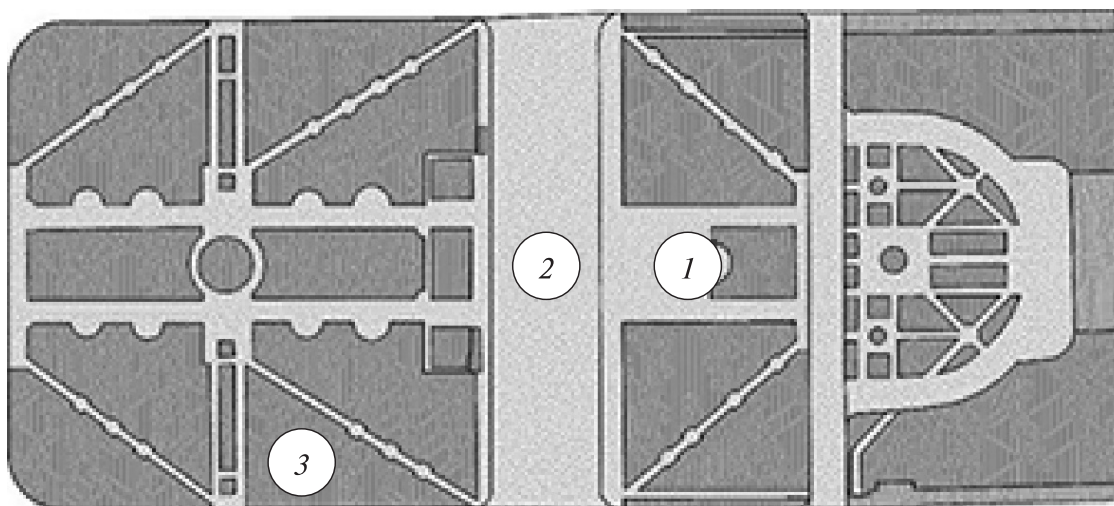


Рис. 4. Планировочная структура сквера УрФУ и сквера на площади Кирова, г. Екатеринбург: 1 — памятник; 2 — дорожно-тропиночная сеть и площадки; 3 — озеленение

Fig. 4. Planning structure of the UrFU public garden and the public garden on Kirov Square, Yekaterinburg: 1 — monument; 2 — road, path, and areas; 3 — landscaping

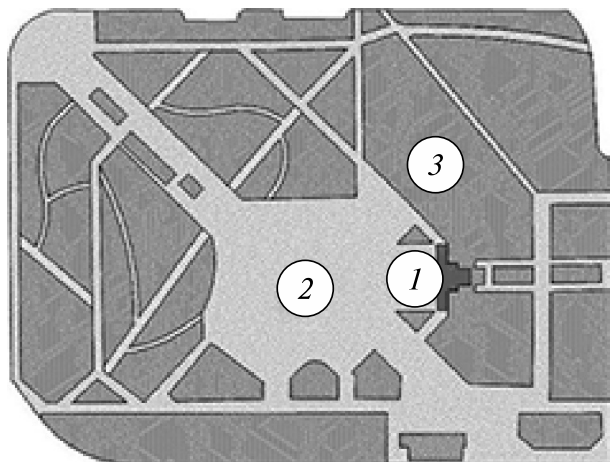


Рис. 5. Планировочная структура сквера «Площадь Обороны», г. Екатеринбург: 1 — памятник; 2 — дорожно-тропиночная сеть и площадки; 3 — озеленение

Fig. 5. Planning structure of the «Ploschad Oborony» public garden, Yekaterinburg: 1 — monument; 2 — roads and paths and playgrounds; 3 — landscaping

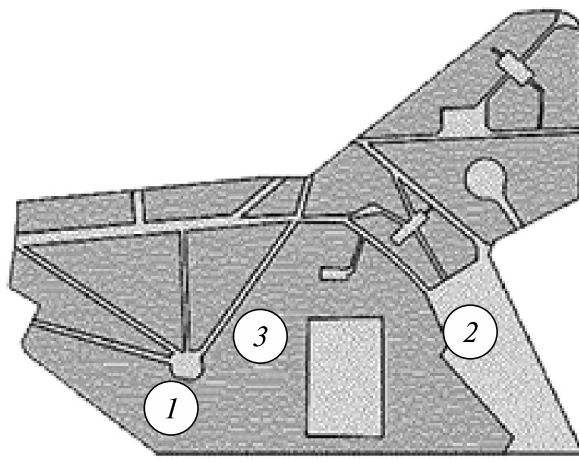


Рис. 6. Планировочная структура сквера имени Александра Канделя, г. Екатеринбург: 1 — памятник; 2 — дорожно-тропиночная сеть и площадки; 3 — озеленение

Fig. 6. Planning structure of the Alexander Kandel public garden, Yekaterinburg: 1 — monument; 2 — roads and paths and playgrounds; 3 — landscaping

Т а б л и ц а 7

Общие данные по скверам и анализ их планировки
General data on the public gardens and their planning structure

Наименование	Годы создания	Площадь, га	Функциональное назначение	Планировка
«Исторические» скверы				
Сквер у здания Оперного театра	1930–1960	3,0	Декоративное рекреационное, транзитное, проведение праздничных мероприятий	Сложная осевая + лучевая + кольцевая
Сквер на площади Кирова	1930–1946	2,9	Декоративное, транзитное, проведение праздничных мероприятий, фестивальная территория	Сложная осевая + лучевая
Сквер УрФУ	1930–1946	2,9		
«Новые» скверы				
Сквер «Площадь Обороны»	1960–1980	2,4	Мемориальное, декоративное, транзитное, проведение праздничных мероприятий	Сложная лучевая + кольцевая
Сквер имени Александра Канделя	1990-е	3,4	Транзитное, рекреационное, декоративное, мемориальное	Сложная осевая + звездчатая

планировку регулярного типа. Он имеет следующую композиционную структуру: осевая + звездчатая. Основной осью служит транзитная дорожка (от станции метро «Динамо» и дворца «Уралочка» к ККТ «Космос»), от которой проходят второстепенные дорожки — аллеи к главному композиционному центру — мемориальному памятнику 300-летия российского флота. Центрами композиции второго порядка явля-

ются спортивные и детские площадки, связанные транзитными дорожками. Таким образом, планировка сквера — осевая + звездчатая, асимметричная, не совсем упорядоченная (рис. 6).

Данные по скверам и анализ их планировки систематизированы и обобщены (табл. 7).

Как следует из табл. 7 определенной связи функционального назначения и планировки скверов не выявлено.

Основные усредненные характеристики двух типов скверов центральной части Екатеринбурга

The main average characteristics of two types of public garden in the central part of Yekaterinburg

Преобладающие виды деревьев	Санитарное состояние, балл	Плотность посадки деревьев, шт./га	Планировка
«Исторические» скверы — середина XX в.			
Яблоня ягодная, липа мелколистная	2,8	194	Сложная — осевая с элементами лучевой и кольцевой
«Новые» скверы — вторая половина XX в.			
Яблоня ягодная, тополь бальзамический, ясень пенсильванский	2,6	114	Сложная — лучевая, звездчатая, кольцевая

В ходе исследования было изучено пять скверов, расположенных в центральной исторической части Екатеринбурга. Предпринята попытка их типологической классификации. К первой группе отнесены три объекта: сквер у здания Оперного театра, сквер на площади Кирова и сквер УрФУ. Данные скверы объединяет общий период создания, приходящийся на 1930–1950-е годы, что соответствует эпохе первых пятилеток и активного градостроительного развития Свердловска в социалистический период. Вторую группу составили скверы, сформированные во второй половине XX в. (табл. 8).

По данным табл. 8, преобладающий состав видов в скверах начала XX в. незначительно отличается от состава скверов второй половины XX в. Яблоня ягодная и липа мелколистная активно используются в озеленении Екатеринбурга с начала XX в. Тополь бальзамический, всегда занимал ведущее положение в озеленении города, но в скверах около исторических объектов, какими являются Оперный театр и здание УрФУ, тополя высаживали не часто, предпочитая более благородную липу. А с середины XX в. в озеленение активно внедряется ясень пенсильванский. Санитарное состояние деревьев в обеих группах скверов почти не отличается и характеризуется, как удовлетворительное, но ослабленное с незначительно более высоким баллом в «новых» скверах в связи с их реконструкцией и посадкой молодых растений. В целом возраст деревьев во всех скверах высок и варьирует от 60 до 80 лет.

Плотность посадки деревьев значительно отличается. Так, в «исторических» скверах она на 70 % выше, чем в «новых». Это несмотря на частичное удаление старовозрастных деревьев в «исторических» скверах. Основная причина заключается в понижении современных нормативов по плотности посадки деревьев.

Планировка в скверах обеих групп довольно разнообразна и зависит от расположения сквера, размещения зданий и сооружений на его территории и его приоритетной функции. Большое значение имеет, конечно, и способ реконструкции ландшафтных объектов. Вопросы реконструкции городских объектов стоят очень остро не одно десятилетие и не только в Российской Федерации [29–31]. Собственно, все пять изученных нами скверов подвергались реконструкции. Скверы, сформировавшиеся в основном к концу XX в. прошли долгий период становления. По сути, это была перманентная реконструкция, что отразилось на их планировке. Так, планировка сквера имени Александра Канделя разрозненная, собранная из отдельных фрагментов. Планировка сквера «Площадь Обороны» более цельная, поскольку ее основа — площадь — осталась центром композиции и лишь усилила его с созданием героического монумента. Следует отметить, что планировка и композиция «исторических» скверов более цельная, чаще обоснована осевым построением, более четкая и продуманная. После реконструкции сквера у здания Оперного театра в 2019 г. изменились некоторые акценты, однако главная доминанта и общая планировка изменились мало. Центрами композиций этих скверов служат крупные элементы — здания и монументы. И приоритетная функция в них — декоративная, поскольку они оформляют подходы к историческим зданиям культурно-просветительского характера, а также транзитная, осуществляющая хорошо спланированные и оформленные входы и выходы на территорию и через территорию скверов. Эти скверы можно классифицировать, как скверы «исторические», созданные в середине XX в.

Сквер имени Александра Канделя и сквер «Площадь Обороны» были созданы в более поздние периоды, центрами композиций в

них являются не очень крупные скульптурные монументы, имеются дорожки пейзажной стилистики. Оба сквера помимо транзитной и рекреационной функций, выполняют важную функцию — мемориальную. В сквере «Площадь Обороны» она является приоритетной. Здесь даже центральная ось сквера представляет исторический маршрут с информационными стендами, где размещены сведения о разных периодах истории города и непосредственно Октябрьского района. Их можно классифицировать как скверы второй половины XX в.

Выводы

Проведенное исследование пяти скверов, расположенных в центральной исторической части города Екатеринбурга, позволяет сделать следующие выводы.

1. Установлено, что формирование общегородских озелененных пространств в центре города происходило преимущественно в два основных периода: в 1930–1950-е годы, в эпоху активного градостроительного развития города Свердловска, и во второй половине XX в. К первой группе («исторические» скверы) отнесены сквер на площади Кирова, сквер УрФУ и сквер у здания Оперного театра; ко второй — сквер имени Александра Канделя и сквер «Площадь Обороны».

2. Возрастная структура насаждений характеризуется преобладанием деревьев в возрасте от 50 до 80 лет, что обусловлено периодом их массовой высадки при создании скверов. Санитарное состояние деревьев оценивается в среднем 2,7...2,8 балла, что соответствует категории «удовлетворительное, но ослабленное». Для большинства растений характерны изреженность кроны и наличие сухих ветвей (от 25 до 50 %). Исключение составляет сквер имени Александра Канделя, где благодаря более позднему созданию и омоложению старых посадок средний балл санитарного состояния выше — 2,4.

3. Выявлены существенные различия в плотности посадки деревьев: в «исторических» скверах она составляет в среднем 194 шт./га, что на 70 % выше, чем в скверах второй половины XX в. (114 шт./га). Данное обстоятельство объясняется как изменением нормативных требований к озеленению, так и частичным удалением перестойных деревьев при реконструкциях.

4. Планировочная структура скверов отличается разнообразием и сложностью. Для «исторических» скверов характерна четкая осевая компоновка с элементами лучевой и кольце-

вой планировки, ориентированная на крупные архитектурные доминанты (здания театра, университета, монументы). Скверы второй половины XX в. имеют более фрагментированную, пейзажную планировку (лучевая, звездчатая, кольцевая), где центрами композиции выступают мемориальные объекты меньшего масштаба.

5. Функциональное назначение скверов дифференцировано: «исторические» скверы выполняют преимущественно декоративную и транзитную функции, являясь неотъемлемой частью архитектурного ансамбля. Скверы второй половины XX в. наряду с рекреационной несут выраженную мемориальную функцию, что подтверждается наличием памятников и тематических экспозиций.

6. Все обследованные скверы подвергались реконструкционным мероприятиям, что оказало влияние на их современный облик. Наиболее целостной и продуманной планировкой отличаются «исторические» скверы, тогда как планировка более поздних объектов носит фрагментарный характер, отражая этапы их постепенного формирования.

Список литературы

- [1] Жолдошов А.Т., Воронцова К.А., Сродных Т.Б. Анализ обеспеченности районов Екатеринбурга скверами // Научное творчество молодежи лесному комплексу России: Материалы XVII Всерос. (национальной) науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Екатеринбург, 05–17 апреля 2021 г., Ульяновск, 24 декабря. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2021. С. 264–267.
- [2] Самоцветы Урала: очерки и рассказы. Свердловск: Свердловское областное издательство, 1937. 176 с.
- [3] Регламент на работы по инвентаризации и паспортизации объектов озелененных территорий 1-й категории г. Москвы. М.: ГУП «Мосзеленхоз», 2007. 54 с.
- [4] Об утверждении Правил санитарной безопасности в лесах: Постановление Правительства Российской Федерации от 09.12.2020 г. № 2047. URL: <http://government.ru/docs/all/131407/> (дата обращения 05.01.2024).
- [5] Жирнов А.Д. Искусство паркостроения. Львов: Вища школа, 1977. 208 с.
- [6] Мамаев С.А. Определитель деревьев и кустарников Урала. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2000. 259 с.
- [7] Семкина Л.А., Епанчинцева О.В. Ассортимент древесных растений для озеленения г. Екатеринбурга. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2023. 155 с.
- [8] Свердловская площадь. URL: https://tatlin.ru/articles/sverdlovskaya_ploshhad_parizhskoj_kommuny (дата обращения 22.12.2023).
- [9] Смирнов Л.Н. Петербургский след в архитектуре конструктивизма Екатеринбурга. Екатеринбург: ПервоГрад, 2021. 148 с.

- [10] Шипарева Ю.М., Сродных Т.Б. Анализ состояния сквера у Оперного театра в г. Екатеринбурге // *Ландшафтная архитектура: традиции и перспективы 2022*: Матер. I Всерос. науч.-практ. конф. Екатеринбург, 15–16 декабря 2022 г. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2022. С. 208–215.
- [11] Постановление об утверждении Муниципальной программы «Формирование современной городской среды в муниципальном образовании “город Екатеринбург” на 2018–2027 годы». URL: <https://docs.cntd.ru/document/543539183> (дата обращения 11.01.2024).
- [12] Шипарева Ю.М. Скверы города Екатеринбурга — анализ, состояние // *Научное творчество молодежи — лесному комплексу России*: Матер. XIV Всерос. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов и конкурса по программе «Умник». Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2018. С. 627–630.
- [13] Площадь им. Кирова. URL: <https://ekb7.ru/microploshchad-kirova> (дата обращения 11.01.2024).
- [14] Екатеринбург: энциклопедия: в 2 т. / под ред. В.В. Маслакова. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2023. 694 с.
- [15] Проект Чернышева. URL: <https://globalcity.info/article/22/04/2020/23380> (дата обращения 22.12.2023).
- [16] Наш Урал. URL: <https://nashural.ru/dostoprimechatelnosti-urala/sverdlovskaya-oblast/ekaterinburg/ugtu-upi-urfu-i-prospekt-lenina-v-ekaterinburge-dostoprimechatelnosti-istoriya-fotografii/> (дата обращения 22.12.2023).
- [17] Площадь Обороны в Екатеринбурге: история, описание, достопримечательности. URL: <https://naprice.ru/napravlenija-otdyha/11773-ploshhad-oborony-v-ekaterinburge-istorija-opisanie-dostoprimechatelnosti-2> (дата обращения 19.12.2023).
- [18] Информационный портал Екатеринбурга. URL: <https://www.ekburg.ru/news/2/48774-noveyshaya-istoriya-sedoy-ural-na-ploshchadi-oborony-rovno-devyat-let-nazad/> (дата обращения 22.12.2023).
- [19] Сквер Канделя. URL: <https://xn--80acgfbsl1azdqr.xn--p1ai/news/74590-skver-v-tsentre-ekaterinburga-poluchil-novoe-imya> (дата обращения 10.01.2024).
- [20] Памятник «300 лет российскому флоту». URL: https://izgotovleniepamyatnikov.ru/mogila/ekb_flot/ (дата обращения 10.01.2024).
- [21] Сродных Т.Б., Денеко В.Н. Ассортимент древесно-кустарниковых видов в озеленении г. Екатеринбург // *Леса Урала и хозяйство в них*, 2004. Вып. 25. С. 151–159.
- [22] Никитина Е.С., Рожкова Е.А., Сродных Т.Б. Анализ состояния аллеиных посадок в скверах и на бульварах Екатеринбурга // *Научное творчество молодежи — лесному комплексу России*: Материалы XIX Всерос. (национальной) науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Екатеринбург, 03–13 апреля 2023 г. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2023. С. 235–237.
- [23] Агафонова А.Л., Аткина Л.И., Агафонова Г.В. Санитарное состояние посадок липы мелколистной на центральных улицах г. Екатеринбурга // *Леса России и хозяйство в них*, 2008. № 1(30). С. 75–80.
- [24] Голубева В.И., Антонова И.С. Использование представителей рода *Tilia* в озеленении Санкт-Петербурга // *Урбоэкосистемы: проблемы и перспективы развития*: Материалы V Междунар. науч.-практ. конф., Ишим, 25–26 марта 2010 г. Ишим: Изд-во Ишимского государственного педагогического университета им. П.П. Ершова, 2010. С. 64–66.
- [25] Сродных Т.Б., Карпова Е.А., Демехина А.С. Состояние насаждений на пр. Ленина в г. Екатеринбурге // *Урбоэкосистемы: проблемы и перспективы развития*: Материалы V Междунар. науч.-практ. конф., Ишим, 25–26 марта 2010 г. Ишим: Изд-во Ишимского государственного педагогического университета им. П.П. Ершова, 2010. С. 107–108.
- [26] Гостев В.Ф., Юскевич Н.Н. Проектирование садов и парков. М.: Стройиздат, 1991. 340 с.
- [27] Теодоронский В.С., Боговая И.О. Объекты ландшафтной архитектуры. М.: МГУЛ, 2003. 300 с.
- [28] Протазанова П.С., Антуфьев, В.Ф. Фролов Т.И. Проект благоустройства и озеленения территории сквера УГТУ — УПИ в г. Екатеринбург // *Актуальные научные исследования в современном мире*, 2021. № 11–4(79). С. 41–44.
- [29] Архитектурно-ландшафтная реконструкция как средство оптимизации городской среды. URL: <https://www.dissercat.com/content/arkhitekturno-landshaftnaya-rekonstruktsiya-kak-sredstvo-optimizatsii-gorodskoi-sredy> (дата обращения 01.10.2025).
- [30] Guerin J.-C. Les arbres a Paris // *Rev. For. Fran.*, 1989, pp. 28–44.
- [31] Mallet M., Bourgerie C.L. Arboriculture urbaine. Institut pour le developpement forestier Collection mission du paysfge. Paris, 1994, 301 p.

Сведения об авторах

Сродных Татьяна Борисовна [✉] — д-р с.-х. наук, доцент, профессор кафедры Ландшафтного строительства, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», tata.srodnikh@mail.ru

Протазанова Полина Сергеевна — аспирант, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», SeleznevaPolina97@mail.ru

Поступила в редакцию 19.03.2025.

Одобрено после рецензирования 03.12.2025.

Принята к публикации 18.02.2026.

PLANNING AND CONDITION OF PUBLIC GARDENS IN CENTRAL PART OF YEKATERINBURG

T.B. Srodnykh[✉], P.S. Protazanova

Ural State Forestry University, 37, Sibirsky tract st., 620100, Ekaterinburg, Russia

tata.srodnykh@mail.ru

This paper presents the results of a comprehensive study of five public gardens located in the central historical part of Yekaterinburg: Alexander Kandel Public Garden, the Public Garden near the Opera House, Ploshchad Oborony Public Garden, Kirov Square Public Garden, and the Public Garden of the Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin. The relevance of this study is driven by intensive urbanization processes, increasing density of urban development, and the need to preserve and rationally utilize existing green spaces. The research employed methods of field survey, tree-by-tree inventory, and planning analysis, supplemented by archival data. It was found that the formation of these public gardens occurred during two periods: the 1930s–1950s («historical» gardens) and the second half of the 20th century. The species composition includes 21 species, dominated by small-leaved linden (*Tilia cordata* Mill.) and Siberian crab apple (*Malus baccata* (L.) Borkh.). The age of the trees ranges from 50 to 80 years, and their sanitary condition is assessed as satisfactory but weakened (2,4...2,9 points). Differences were revealed in planting density (99...272 trees/ha) and layout: historical gardens are characterized by axial composition, while later ones feature landscape-style planning. The functions of the gardens are differentiated (decorative, transit, recreational, memorial). The proposed typology enables the systematization of green spaces and substantiates approaches to their preservation, taking into account their historical and cultural significance.

Keywords: square, layout, plantings, sanitary condition, functional purpose


Suggested citation: Srodnykh T.B., Protazanova P.S. *Planirovka i sostoyanie skverov tsentral'noy chasti goroda Ekaterinburga* [Planning and condition of public gardens in central part of Yekaterinburg]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2026, vol. 30, no. 2, pp. 89–101. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-2-89-101

References

- [1] Zholdoshev A.T., Vorontsova K.A., Srodnykh T.B. *Analiz obespechennosti rayonov Ekaterinburga skverami* [Analysis of the provision of public gardens in Yekaterinburg districts]. *Nauchnoe tvorchestvo molodezhi lesnomu kompleksu Rossii: materialy XVII Vserossiyskoy (natsional'noy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov* [Scientific creativity of young people for the forestry complex of Russia: Proceedings of the XVII All-Russian (National) Scientific and Technical Conference of Students and Postgraduates], Yekaterinburg, April 5–17, 2021, Ulyanovsk, December 24. Yekaterinburg: USLTU, 2021, pp. 264–267.
- [2] *Samotsvety Urala: ocherki i rasskazy* [Gems of the Urals: essays and stories]. Sverdlovsk: Sverdlovsk Regional Publishing House, 1937, 176 p.
- [3] *Reglament na raboty po inventarizatsii i pasportizatsii ob'ektov ozelenennykh territoriy 1-y kategorii g. Moskvy* [Regulations for work on inventory and certification of green areas of the 1st category in Moscow]. Moscow: State Unitary Enterprise «Moszelenkhoz»; Federal State Unitary Enterprise «Institute of Organizational Technologies in Housing and Public Utilities», 2007, 54 p.
- [4] *Ob utverzhdenii Pravil sanitarnoy bezopasnosti v lesakh: Postanovlenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 09.12.2020 g. № 2047* [On approval of the Sanitary Safety Rules in Forests: Resolution of the Government of the Russian Federation of 09.12.2020 No. 2047]. Available at: <http://government.ru/docs/all/131407/> (accessed 05.01.2024).
- [5] Zhirnov A.D. *Iskusstvo parkostroeniya* [The Art of Park Construction]. Lviv: Higher School. Publishing House at Lviv University, 1977, 208 p.
- [6] Mamaev S.A. *Opredelitel' derev'ev i kustarnikov Urala* [Identifier of Trees and Shrubs of the Urals]. Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2000, 259 p.
- [7] Semkina L.A., Epanchintseva O.V. *Assortiment drevesnykh rasteniy dlya ozeleneniya g. Ekaterinburga* [Assortment of woody plants for landscaping Yekaterinburg]. Yekaterinburg: USLTU, 2023, 155 p.
- [8] *Sverdlovskaya ploshchad'* [Sverdlovskaya Square]. Available at: https://tatlin.ru/articles/sverdlovskaya_ploshchad_parizhskoj_kommuny (accessed 22.12.2023).
- [9] Smirnov L.N. *Peterburgskiy sled v arkhitekture konstruktivizma Ekaterinburga* [The St. Petersburg Trace in the Constructivist Architecture of Yekaterinburg]. Yekaterinburg: PervoGrad, 2021, 148 p.
- [10] Shipareva Yu.M., Srodnykh T.B. *Analiz sostoyaniya skvera u opernogo teatra v g. Ekaterinburge* [Analysis of the State of the Public Garden near the Opera House in Yekaterinburg]. *Landshaftnaya arkhitektura: traditsii i perspektivy–2022: mater. I Vseros. nauch.-prakt. konf Ekaterinburg, 15–16 dekabrya 2022 g.* [Landscape Architecture: Traditions and Prospects–2022: Proc. I All-Russian Scientific and Practical Conf.]. Yekaterinburg, December 15–16, 2022. Yekaterinburg: USLTU, 2022, pp. 208–215.
- [11] *Postanovlenie ob utverzhdenii Munitsipal'noy programmy «Formirovanie sovremennoy gorodskoy sredy v munitsipal'nom obrazovanii "gorod Ekaterinburg" na 2018–2027 gody»* [Resolution on approval of the Municipal Program «Formation of a modern urban environment in the municipality of the city of Yekaterinburg for 2018–2027»]. Available at: <https://docs.entd.ru/document/543539183> (accessed 11.01.2024).

- [12] Shipareva Yu.M. *Skvery goroda Ekaterinburga — analiz, sostoyanie* [Public gardens of the city of Yekaterinburg — analysis, state]. Nauchnoe tvorchestvo molodezhi — lesnomu kompleksu Rossii: mater. XIV Vseros. nauch.-tekh. konf. studentov i aspirantov i konkursa po programme «Umnik» [Scientific creativity of youth – to the forest complex of Russia: materials of the XIV All-Russian scientific and technical. conf. of students and postgraduates and the competition under the «Umnik» program]. Yekaterinburg: USLTU, 2018, pp. 627–630.
- [13] *Ploshchad' im. Kirova* [Kirov Square]. Available at: <https://ekb7.ru/micro-ploshchad-kirova> (accessed 11.01.2024).
- [14] *Ekaterinburg: entsiklopediya: v 2 t.* [Yekaterinburg: Encyclopedia: in 2 vol.]. Ed. V.V. Maslakov. Ekaterinburg: Ural University Publishing House, 2023, 694 p.
- [15] *Proekt Chernysheva* [Chernyshev's Project]. Available at: <https://globalcity.info/article/22/04/2020/23380> (accessed 22.12.2023).
- [16] *Nash Ural* [Our Urals]. Available at: <https://nashural.ru/dostoprimechatelnosti-urala/sverdlovskaya-oblast/ekaterinburg/ugtu-upi-urfu-i-prospekt-lenina-v-ekaterinburge-dostoprimechatelnosti-istoriya-fotografii/> (accessed 22.12.2023).
- [17] *Ploshchad' Oborony v Ekaterinburge: istoriya, opisanie, dostoprimechatel'nosti* [Defense Square in Yekaterinburg: history, description, attractions]. Available at: <https://naprice.ru/napravleniya-otdyha/11773-ploshhad-oborony-v-ekaterinburge-istoriya-opisanie-dostoprimechatelnosti-2> (accessed 19.12.2023).
- [18] *Informatsionnyy portal Ekaterinburga* [Yekaterinburg Information Portal]. Available at: <https://www.ekburg.ru/news/2/48774-noveyshaya-istoriya-sedoy-ural-na-ploshchadi-oborony-poyavilsya-rovno-devyat-let-nazad/> (accessed 22.12.2023).
- [19] *Skver Kandelya* [Kandelya Square]. Available at: <https://xn--80acgfbsl1azdq.xn--p1ai/news/74590-skver-v-tsentre-ekaterinburga-poluchil-novoe-imyа> (accessed 10.01.2024).
- [20] *Pamyatnik «300 let rossiyskomu flotu»* [Monument «300 Years of the Russian Navy»]. Available at: https://izgotovleniepamyatnikov.ru/mogila/ekb_flot/ (accessed 10.01.2024).
- [21] Srodnykh T.B., Deneko V.N. *Assortiment drevesno-kustarnikovykh vidov v ozelenenii g. Ekaterinburga* [Assortment of tree and shrub species in landscaping of the city of Yekaterinburg]. *Lesа Urala i khozyaystvo v nikh* [Ural Forests and Management in Them], 2004, iss. 25, pp. 151–159.
- [22] Nikitina E.S., Rozhkova E.A., Srodnykh T.B. *Analiz sostoyaniya alleynykh posadok v skverakh i na bul'varakh Ekaterinburga* [Analysis of the condition of alley plantings in squares and boulevards of Yekaterinburg]. Nauchnoe tvorchestvo molodezhi — lesnomu kompleksu Rossii: Mater. XIX Vserossiyskoy (natsional'noy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov [Scientific creativity of youth – to the forest complex of Russia: Proc. XIX All-Russian (National) Scientific and Technical Conference of Students and Postgraduates], Yekaterinburg, April 3–13, 2023. Yekaterinburg: USLTU, 2023, pp. 235–237.
- [23] Agafonova A.L., Atkina L.I., Agafonova G.V. *Sanitarnoe sostoyanie posadok lipy melkolistnoy na tsentral'nykh ulitsakh g. Ekaterinburga* [Sanitary condition of small-leaved linden plantings on the central streets of Yekaterinburg]. *Lesа Rossii i khozyaystvo v nikh* [Forests of Russia and their management], 2008, no. 1(30), pp. 75–80.
- [24] Golubeva V.I., Antonova I.S. *Ispol'zovanie predstaviteley roda Tilia v ozelenenii Sankt-Peterburga* [Using Representatives of the Genus Tilia in Landscaping St. Petersburg]. *Urboekosistemy: problemy i perspektivy razvitiya: mater. V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Urban Ecosystems: Problems and Development Prospects: Proc. of the V International Scientific and Practical Conference], Ishim, March 25–26, 2010. Ishim: Ishim State Pedagogical University named after P.P. Ershov, 2010, pp. 64–66.
- [25] Srodnykh T.B., Karpova E.A., Demekhina A.S. *Sostoyanie nasazhdeniy na pr. Lenina v g. Ekaterinburge* [State of Plantings on Lenin Avenue in Yekaterinburg]. *Urboekosistemy: problemy i perspektivy razvitiya: Mater. V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Urban Ecosystems: Problems and Development Prospects: Proc. of the V International Scientific and Practical Conference], Ishim, March 25–26, 2010. Ishim: Ishim State Pedagogical University named after P.P. Ershov, 2010, pp. 107–108.
- [26] Gostev V.F., Yuskevich N.N. *Proektirovaniye sadov i parkov* [Design of gardens and parks]. Moscow: Stroyizdat, 1991, 340 p.
- [27] Teodoronskiy V.S., Bogovaya I.O. *Ob'ekty landshaftnoy arkhitektury* [Objects of landscape architecture]. Moscow: MGUL, 2003, 300 p.
- [28] Protazanova P.S., Antuf'ev, V.F. Frolov T.I. *Proekt blagoustroystva i ozeleneniya territorii skvera UGTU-UPI v g. Ekaterinburg* [Project for improvement and landscaping of the USTU-UPI public garden in Yekaterinburg]. *Aktual'nye nauchnye issledovaniya v sovremennoy mire* [Current scientific research in the modern world], 2021, no. 11–4(79), pp. 41–44.
- [29] *Arkhitekurno-landshaftnaya rekonstruktsiya kak sredstvo optimizatsii gorodskoy sredy* [Architectural and landscape reconstruction as a means of optimizing the urban environment]. Available at: <https://www.disserscat.com/content/arkhitekurno-landshaftnaya-rekonstruktsiya-kak-sredstvo-optimizatsii-gorodskoi-sredy> (accessed 01.10.2025).
- [30] Guerin J.-C. *Les arbres a Paris // Rev. For. Fran.*, 1989, pp. 28–44.
- [31] Mallet M., Bourgerie C.L. *Arboriculture urbaine*. Institut pour le developpement forestier Collection mission du paysfge. Paris, 1994, 301 p.

Authors' information

Srodnykh Tat'yana Borisovna  — Dr. Sci. (Agriculture), Associate Professor, Professor of the Department of Landscape Construction of the Ural State Forestry University, tata.srodnykh@mail.ru
Protazanova Polina Sergeevna — pg. of the Ural State Forestry and Technical University, SeleznevaPolina97@mail.ru

Received 19.03.2025.

Approved after review 03.12.2025.

Accepted for publication 18.02.2026.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗВЛЕЧЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ КОРЫ СОСНЫ

К.В. Валеев✉, Р.Г. Сафин

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (КНИТУ), Россия, 420015, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68

kirval116@mail.ru

Представлено описание процесса извлечения биологически активных веществ из коры сосны. Приведена принципиальная схема экспериментальной установки для извлечения биологически активных веществ. Описана методика проведения экспериментальных исследований процесса извлечения биологически активных веществ. Получены зависимости концентрации биологически активных веществ (хвойного воска, антоцианидинового красителя, пектиновых веществ) из коры сосны от вида и концентрации экстрагента, гидромодуля, температуры и времени. Достигнуто выделение максимальных количеств хвойного воска, антоцианидинового красителя и пектина при определенных условиях.

Ключевые слова: экстракция, кора, сосна, пектин, антоцианидиновый краситель, хвойный воск

Ссылка для цитирования: Валеев К.В., Сафин Р.Г. Исследование процесса извлечения биологически активных веществ из коры сосны // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2026. Т. 30. № 2. С. 102–112. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-2-102-112

Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) является одной из ключевых лесообразующих пород в Российской Федерации и занимает значительное место в экосистемах и экономике многих регионов, включая Республику Татарстан [1]. Республика Татарстан расположена в зоне смешанных лесов, где хвойные насаждения, представленные в основном сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), занимают около 22 % общей лесоплощади. Основные массивы сосновых боров сосредоточены в Предкамье (Приволжский, Сабинский, Балтасинский районы) и Западном Предкамье. Они имеют важное почвозащитное и водоохранное значение, особенно вдоль берегов крупных рек, таких как Волга и Кама [2–4]. Сосна в Татарстане произрастает в различных типах леса – от сухих лишайниковых боров до влажных сложных боров, что определяет некоторые вариации в скорости роста и качестве древесины [5].

Лесопромышленный комплекс Татарстана занимает один из значимых секторов экономики. Ключевые предприятия, в частности АО «Татлеспром» и входящие в его структуру лесхозы, осуществляют заготовку и переработку древесины. Традиционная переработка сосны включает в себя следующие производственные процессы [6]:

– выпуск обрезных и необрезных досок, бруса, используемых в строительстве и мебельном производстве;

– производство ДСП, ДВП и OSB-плиты из древесной стружки и опилок.

Кроме того, в производственной цепочке получают низкосортную древесину и отходы, часть которых направляется на целлюлозные заводы, а часть отходов и коры используется как топливо.

Переработка сосны в Татарстане сталкивается с проблемой использования биомассы. Кора, снимаемая при окорке древесины, используется в основном как низкокалорийное топливо, компост или мульча [7]. Ее потенциал в качестве источника химических веществ реализуется крайне слабо [8]. Содержание коры в дереве сосны изменяется в зависимости от возраста дерева, условий произрастания и части ствола, в среднем составляя 12...15 % общей массы стволовой древесины. Образование большого количества коры на лесопромышленных предприятиях создает существенные экологические проблемы, связанные с ее медленным разложением и риском возгорания [9]. При ежегодном объеме заготовок древесины в Татарстане в несколько миллионов кубометров образуются тысячи тонн коры, которые могут стать сырьем для биохимической переработки [10].

Кора сосны представляет собой уникальный комплекс биологически активных веществ (БАВ) и технически ценных веществ, среди

которых особый интерес представляют пектиновые вещества, хвойный воск и антоцианидиновые пигменты. Извлечение данных компонентов из коры позволило бы не только решить проблему утилизации отходов, но и создать новые высокомаржинальные продукты с широкой областью применения в пищевой, фармацевтической, косметической, химической и сельскохозяйственной промышленности [11–17].

Одним из наиболее важных компонентов являются пектины. Это сложные гетерополисахариды, основу которых составляет полигалактуроновая кислота. В коре сосны пектиновые вещества входят в состав клеточных стенок преимущественно в форме нерастворимого протопектина. Содержание пектиновых веществ в коре сосны может достигать 10...20 % массы абсолютно сухой коры. Их особенность заключается в высоком содержании нейтральных сахаров — галактозы и арабинозы, а также во взаимосвязи с фенольными соединениями, что придает пектинам выраженные антиоксидантные свойства. В пищевой промышленности пектины используются как гелеобразователи, загустители и стабилизаторы (для желе, джемов, молочных продуктов), в фармацевтике — для производства энтеросорбентов, способных связывать тяжелые металлы и радионуклиды, а также в системах контролируемой доставки лекарств, в косметологии — для гелей и кремов как увлажняющие и структурообразующие компоненты, в сельском хозяйстве — в качестве стимуляторов роста овощей и при обработке семян перед посевом [12, 18–20].

Хвойный воск представляет собой сложную смесь липофильных соединений, включающую в себя эфиры высших жирных кислот и высших спиртов, свободные жирные кислоты (олеиновую, линолевою, пальмитиновую), спирты и стерины. Это ключевой компонент суберина — биополимера, обеспечивающего барьерные функции коры. Содержание воска в коре составляет 5...10 %. В его составе идентифицируют смоляные кислоты (например, абиетиновую). Хвойный воск нашел широкое применение в лакокрасочной промышленности — при производстве олиф, алкидных смол и защитных покрытий, в химической промышленности — для получения пластификаторов, поверхностно-активных веществ и смазочных материалов, в косметике — для губных помад, кремов и мазей как загуститель и влагосберегающий агент [21, 22].

Важным компонентом сосновой коры является антоцианидиновый краситель, представляющий собой пигмент из класса флавоноидов,

придающий растениям красную, фиолетовую или синюю окраску. В коре сосны они находятся преимущественно в виде бесцветных предшественников — конденсированных танинов, которые при кислотном гидролизе расщепляются с образованием окрашенных антоцианидинов. В сельском хозяйстве хвойный воск добавляют в рационы поросят, телят и цыплят для увеличения привесов, и лучшего использования питательных веществ. Содержание антоцианидинов в коре сосны весьма велико и может достигать 15 % массы коры. Эти соединения являются мощными природными антиоксидантами, превосходящими по активности витамины С и Е. В пищевой промышленности антоцианидины используются как натуральные красители и антиоксиданты для напитков, кондитерских изделий и йогуртов, в косметике — для антивозрастных кремов и лосьонов в целях защиты кожи от окислительного стресса, в текстильной промышленности — для экологичного окрашивания таких натуральных тканей, как шелк, шерсть, в медицине предполагается использование их противовоспалительных, кардиопротекторных и противоопухолевых свойств [23].

По имеющимся данным, в настоящее время увеличилась потребность в БАВ на пищевом и косметическом рынках. Мировой рынок пектина оценивается в 1,5 млрд дол. США в 2024 г. и продолжает расти со среднегодовым темпом роста около 6–7 %. Мировой объем рынка натуральных восков пользуется повышенным спросом как альтернатива синтетическим и нефтехимическим аналогам и оценивается свыше 2 млрд дол., натуральных красителей — оцениваются примерно в 2,5 млрд дол. со среднегодовым темпом роста около 8 % [24, 25].

Для извлечения целевых компонентов из коры сосны применяются следующие методы экстракции:

- традиционный (кислотная, щелочная, ферментативная);
- ультразвуковой;
- СВЧ-экстракция;
- сверхкритическим диоксидом углерода;
- комбинированный, включающий в себя извлечение липофильных, полярных компонентов и пектиновых веществ [26–28].

Ныне разработаны разнообразные способы процессов экстракции. Выявлены зависимости выхода БАВ от концентрации и вида экстрагента, температуры процесса, продолжительности экстракции, гидромодуля и т. д., поэтому выявление рациональных технологических параметров, влияющих на экстрагирование БАВ из коры сосны приобрело актуальность. Процесс извлечения БАВ из коры сосны,



Рис. 1. Исследуемое вторичное сырье — кора сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.)

Fig. 1. The bark of the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) as the studied secondary raw material

произрастающей в Республике Татарстан, исследуется в КНИТУ на кафедре переработки древесных материалов.

Цель работы

Цель работы — определение рациональных режимных параметров процесса экстракции БАВ из сосны, произрастающих в Республике Татарстан.

Материалы и методы

Для проведения процесса экстракции БАВ из коры сосны в Республике Татарстан были собраны образцы коры за период июль — август 2025 года (рис. 1). Образцы хранили в герметичной емкости не более 10 сут.

Согласно плану экспериментов, были проведены лабораторные исследования по определению выхода целевых компонентов — пектина, хвойного воска, антоцианидинового красителя — в зависимости от следующих параметров:

- вида и концентрации применяемого растворителя;
- соотношения сырье / экстрагент (гидромодуля);
- степени измельчения сырьевых частиц.

Параметры процесса экстракции имели следующие значения: температура процесса извлечения БАВ — 40...80 °С; время экстракции — 10...100 мин. Были использованы растворители: *n*-гексан; бензин марок «Калоша» и АИ-95; уайт-спирит; сольвент; этиловый спирт с содержанием водного раствора 4%-й соляной кислоты; 0,5%-й, 1%-й, 1,5%-й и 2%-й водный раствор шавелевокислого аммония. При извле-

чении БАВ гидромодуль составлял 1:4, 1:6, 1:8, 1:10, 1:15, 1:20. В качестве осадителя пектина применяли изопропиловый спирт.

Для определения рациональных параметров процесса экстракции из хвой сосны была разработана установка (рис. 2).

Установка состоит из экстрактора 1, круглодонной колбы (500 мл) 2, проточного холодильника 3, приемника флорентийской склянки 4, аппарата Сокслета с круглодонной колбой (500 мл) 5, резервуара 6, обратного холодильника 7, термостата 8. Регулирование температуры в термостате осуществляется с помощью терморпары 10 и терморегулятора (ОВЕН ТРМ 1-Н.У.Р.) 9. Для осуществления нагрева жидкости и ее поддержания в термостате использовали ТЭН 11. Отгонку воздуха из установки проводили вакуумным насосом 12. Взвешивание проб экстракта осуществляли на весах (СВЛ-2200Н) 13. Осаждение БАВ проводили в емкостях 14–16, сбор регенерированных экстрагентов — в емкостях 17–19. Выпаривание растворителей происходило в колбонагревателях 20–22. В противоточном холодильнике 23 осуществлялась конденсация растворителей.

Исследование выполняли следующим образом (методика извлечения эфирных масел и результаты их исследований более подробно представлены в работе [29]). В круглодонную колбу 5 помещали исследуемый неполярный органический растворитель. Колба нагревалась, пары растворителя поднимались по пароотводной трубке в обратный холодильник 7, где конденсировались. Чистый растворитель каплями стекал в экстракционный резервуар 6, в котором находилось сырье, помещенное в бумажный картридж. По мере заполнения резервуара происходил контакт горячего растворителя с сырьем и экстракция компонентов. Когда уровень жидкости достигал верхнего изгиба сифонной трубки, срабатывал сифон, и обогащенный экстрагент самотеком переливался обратно в колбу 5. В колбе растворитель испарялся, а нелетучие экстрагированные вещества оставались в ней. Этот цикл повторялся автоматически несколько раз, обеспечивая полное извлечение целевых соединений при минимальном расходе растворителя. После завершения процесса экстракт из колбы 5 отгонялся в емкость для осаждения 16, нагревался с помощью колбонагревателя 22 и упаривался до сиропообразного состояния. После полного выпаривания исследуемого неполярного органического растворителя в колбе 16 оставался сырой воск, представляющий собой смесь восков, смоляных кислот и пигментов. Дополнительная очистка проводилась методом пере-

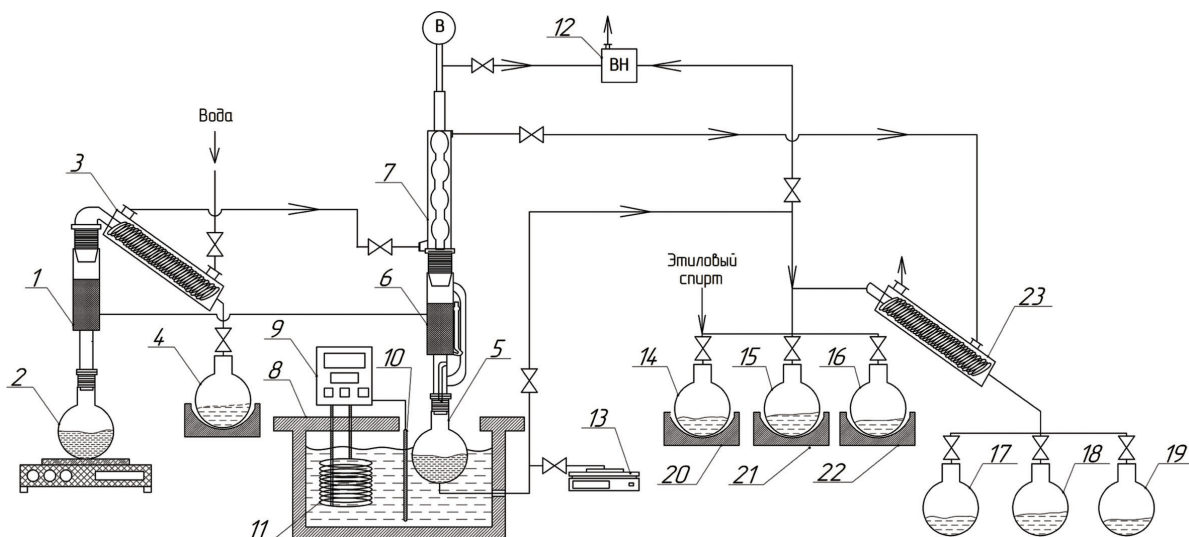


Рис. 2. Схема лабораторной установки для комплексного исследования процесса извлечения биологически активных веществ из хвои и коры сосны обыкновенной

Fig. 2. Diagram of a laboratory setup for a comprehensive study of the process of extracting biologically active substances from the needles and bark of Scots pine

кристаллизации из горячего этанола, где воск кристаллизовался при охлаждении, а примеси оставались в растворе.

Обезжиренное после экстракции хвойного воска сырье оставляли в экстракционном резервуаре 6 и обрабатывали горячим паром для удаления исследуемого неполярного органического растворителя. Для экстракции антоцианиновых красителей из очищенного сырья от экстрагента использовали тот же метод, что и для извлечения хвойного воска, только в качестве экстрагента применяли этиловый спирт с содержанием водного раствора 4%-й соляной кислоты. Экстракцию проводили при умеренном нагреве в термостате 8 в течение 1–2 ч. Экстракт из колбы 5 перегоняли в емкость 15 для выпаривания экстрагента. Для осуществления нагрева использовали колбонагреватель 21. Сбор сконденсированного водного раствора 4%-й соляной кислоты осуществляли в емкости 18. После выпаривания растворителя экстракт представлял собой концентрированный водный раствор красителя. Далее сиропобразную массу лиофилизировали с использованием вакуумного насоса 12 для получения порошкообразного продукта.

Пектиновые вещества получали из дважды обессмоленного сырья путем экстракции водным раствором шавелевокислого аммония, используя описанный выше метод. После завершения процесса извлечения экстракт отгоняли в колбу 14, нагревали с помощью колбонагревателя 20 и упаривали до сиропобразного состояния; туда же добавляли изопропиловый

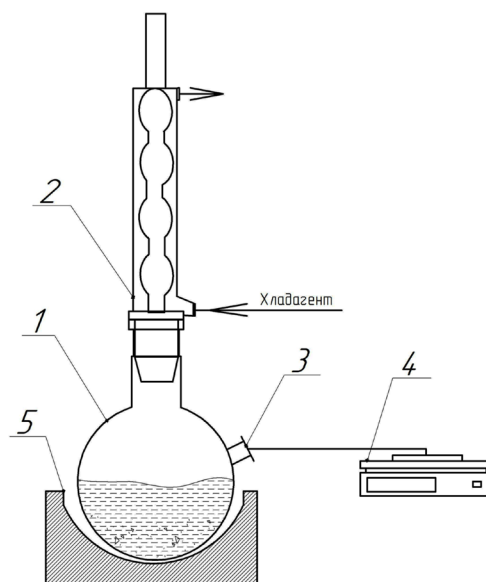


Рис 3. Принципиальная схема лабораторной установки для исследования влияния гидромодуля на процесс извлечения биологически активных веществ из коры сосны: 1 — круглодонная колба (1000 мл); 2 — обратный холодильник; 3 — пробоотборник; 4 — весы CBL-2200H; 5 — колбонагреватель

Fig. 3. Schematic diagram of a laboratory unit for studying the water duty effect on the extraction of biologically active substances from pine bark and needles: 1 — round-bottomed flask (1000 ml); 2 — backflow condenser; 3 — air sampling tube; 4 — CBL-2200H scale; 5 — heating enclosure

спирт в соотношении 1:5. В течение 2 ч пектиновые вещества выпадали в осадок. После отстаивания проводили отгонку жидкости под

вакуумом, а оставшийся осадок высушивали в колбе 14. После полного удаления растворителя образовывался пектин в виде порошка кремового цвета.

На всех этапах (отбор проб сырья, взвешивание экстрактов, взвешивание сухих остатков) использовали аналитические весы (СВЛ-2200Н) 13 с точностью $\pm 0,01$ г, что позволяло рассчитать выходы продуктов, построить кинетические кривые экстракции и определить влажность веществ.

Определение влияния гидромодуля на выход биологически активных веществ проводилось на установке (рис. 3).

Для определения эффективного гидромодуля была проведена серия экспериментов при различных значениях соотношения кора / экстрагент. В колбу 1 загружали порцию измельченного сырья массой 20 ± 1 г, туда же заливали экстрагент. Объем экстрагента изменяли в диапазоне 80...400 г, значение гидромодуля —

1:4...1:20. На колбу 1 установили обратный холодильник 2. Собранную конструкцию поместили на колбонагреватель 5 и начали нагрев. Пары экстрагента поступали в обратный холодильник 2 и конденсировались обратно в колбу 1. Каждые 10 мин проводили отбор проб через пробоотборник 3. Пробы высушивали и взвешивали на весах СВЛ-2200Н 4. Пробы отбирали до тех пор, пока разница между результатами двух взвешиваний была не более 0,1 % массы.

Для обеспечения надежности результатов каждого исследования, эксперименты проводились трижды и рассчитывались среднестатистические значения определяемых параметров.

Исследование проведено с использованием оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием по получению и исследованию наночастиц металлов, оксидов металлов и полимеров «Наноматериалы и нанотехнологии» (ЦКП НМиНТ).

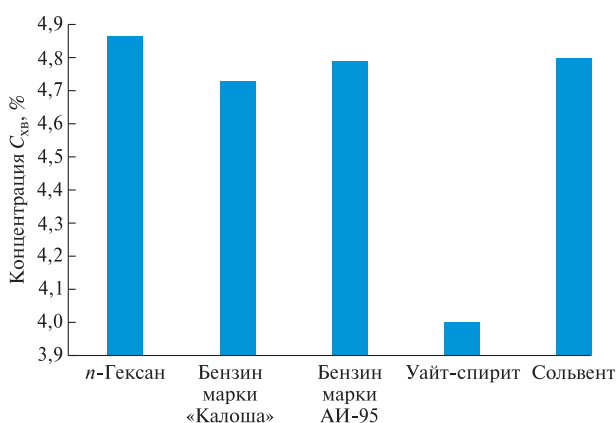


Рис. 4. Зависимость концентрации хвойного воска в экстрактах от вида экстрагента

Fig. 4. Dependence of coniferous wax concentration in extracts on the type of extractant

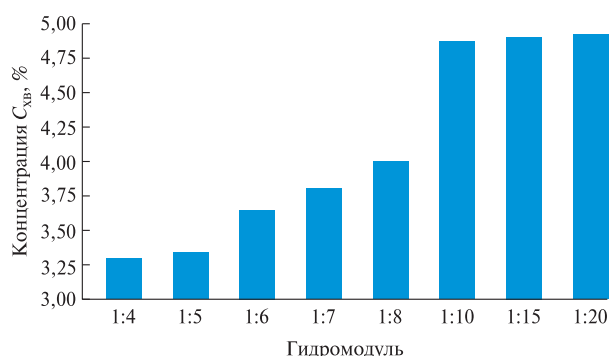


Рис. 5. Зависимость концентрации хвойного воска в экстрактах от гидромодуля

Fig. 5. Dependence of the coniferous wax concentration in extracts on the water duty

Результаты и обсуждение

Как следует из полученных данных (рис. 4) наибольший выход хвойного воска наблюдается при использовании растворителя *n*-гексан — 4,87 % общей массы коры, что объясняется высокой растворяющей способностью экстрагента по отношению к неполярным соединениям, которые составляют основную часть хвойного воска. Сравнительно близкие результаты продемонстрировали бензин марок АИ-95, «Калоша» и сольвент, что подтверждает аналогичные физико-химические свойства данных растворителей.

Использование уайт-спирита дало низкий выход — концентрация воска не превысила 4 %, что можно связать с различиями в составе экстрагента — наличие содержания ароматических углеводородов, снижающих селективность растворения восковых веществ.

Таким образом, оптимальным экстрагентом для извлечения хвойного воска является *n*-гексан, обеспечивающий максимальный выход целевого продукта при минимальных потерях и без необходимости в дополнительных этапах очистки.

Анализ полученных результатов показывает (рис. 5), что увеличение объема экстрагента относительно массы коры способствует росту выхода хвойного воска. При повышении гидромодуля от 1:4 до 1:10 наблюдается значительный рост выхода хвойного воска — с 3,3 до 4,87 % общей массы коры. При дальнейшем увеличении гидромодуля до 1:20 прирост становится минимальным — до 4,92 % общей массы коры.

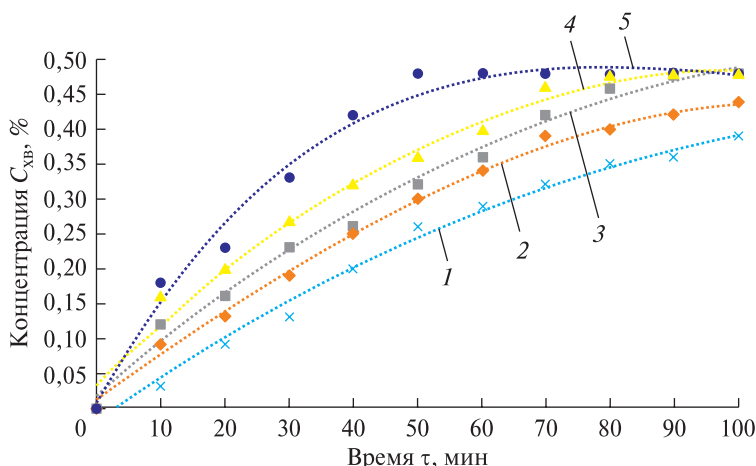


Рис. 6. Кинетическая зависимость концентрации хвойного воска от продолжительности и температуры процесса, °С: 1 — 30; 2 — 40; 3 — 50; 4 — 60; 5 — 70

Fig. 6. Kinetic dependence of the coniferous wax concentration on the duration and temperature of the process °С: 1 — 30; 2 — 40; 3 — 50; 4 — 60; 5 — 70

Из рис. 6 видно, что с ростом температуры скорость извлечение хвойного воска существенно увеличивается, что обусловлено возрастанием коэффициентов диффузии и растворимости целевых веществ. При температуре 30 °С выход хвойного воска минимален и увеличивается крайне медленно, что указывает на низкую эффективность процесса при комнатных условиях. Наоборот, при температуре 60...70 °С экстракция протекает значительно быстрее: в первые 40...60 мин достигается максимальная концентрация воска.

На начальной стадии процесса наблюдается быстрый рост выхода хвойного воска, что связано с извлечением легкодоступных соединений из поверхностных слоев коры. Затем процесс замедляется по мере исчерпания доступных резервов и необходимости диффузии из более глубоких тканей.

Повышение температуры свыше 70 °С может привести к разрушению отдельных термолabileльных компонентов, поэтому оптимальный температурный диапазон экстракции ограничивается диапазоном 60...70 °С.

После извлечения хвойного воска из коры сосны из обессмоленной коры был извлечен антоцианидиновый краситель (рис. 7).

Характер зависимости, представленной на рис. 7 аналогичен процессу выделения хвойного воска (см. рис. 4). Максимальный выход красителя из сосновой коры составил не более 0,6 %, что объясняется небольшим содержанием антоцианидинов и более плотной структурой клеточных стенок, препятствующей

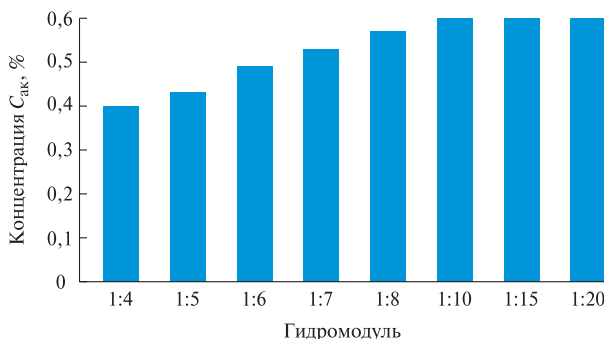


Рис. 7. Зависимость концентрации антоцианидинового красителя в экстрактах от гидромодуля

Fig. 7. Dependence of the concentration of anthocyanidin dye in extracts on the water duty

их высвобождению. Оптимальный гидромодуль — 1:10, обеспечивает высокий выход при рациональном расходовании экстрагента.

Как видно из рис. 8, нагревание оказывает ключевое влияние на скорость выхода и полноту извлечения веществ. При температуре 40 °С (минимальной) процесс протекает медленно, и даже спустя 100 мин. достигаются сравнительно низкие значения выхода — около 0,5 %. При повышении температуры до 60...80 °С наблюдается резкое ускорение экстракции, максимальная концентрация красителя достигается на интервале 40...50 мин. Однако антоцианидины нестабильны и подвержены быстрому разрушению при нагревании более чем до 65...70 °С [30]. Оптимальной температурой экстракции является 60 °С при продолжительности 70 мин.

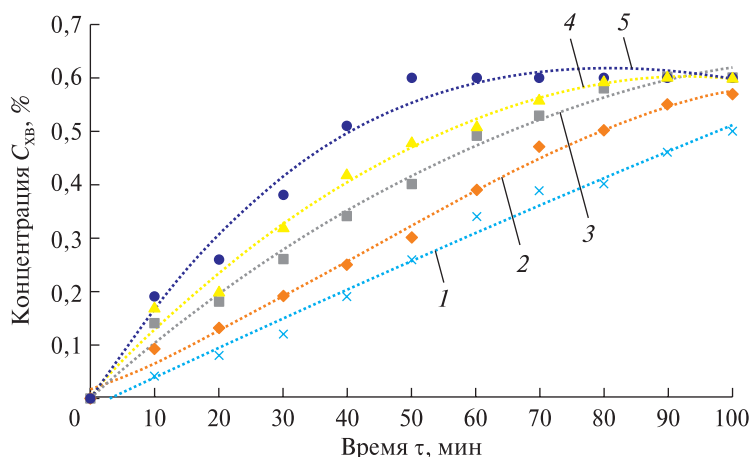


Рис. 8. Зависимость концентрации антоцианидинового красителя из коры сосны от температуры и продолжительности нагревания, °C: 1 — 40; 2 — 50; 3 — 60; 4 — 70; 5 — 80

Fig. 8. Dependence of the anthocyanidin dye concentration from pine bark on temperature and heating duration, °C: 1 — 40; 2 — 50; 3 — 60; 4 — 70; 5 — 80

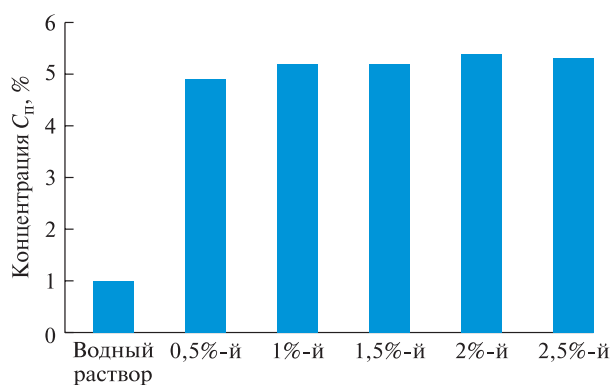


Рис. 9. Зависимость выхода пектиновых веществ в экстрактах от концентрации (0,5...2,5 %) экстрагента щавелевокислого аммония

Fig. 9. Dependence of the pectin substances yield in extracts on the concentration (0.5...2.5%) of the ammonium oxalate extractant

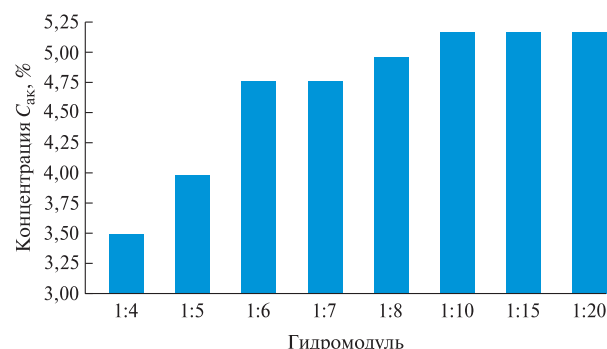


Рис. 10. Зависимость выхода пектиновых веществ в экстрактах от гидромодуля

Fig. 10. Dependence of the pectin substances yield in extracts on the water duty

Дальнейшее повышение температуры активизирует окислительные ферменты, вызывающие разрушение антоцианов.

Как следует из рис. 9, наиболее низкий выход наблюдается при использовании чистой воды, при этом концентрация пектина в экстрагенте составляет лишь 1 %. Существенное увеличение выхода достигается при применении водных растворов щавелевокислого аммония, причем повышение его концентрации от 0,5 до 2 % приводит к росту выхода пектина в несколько раз — до 5,4 %. Данная закономерность объясняется способностью ионов аммония и щавелевой кислоты разрушать межмолекулярные связи и облегчать высвобождение пектиновых соединений из клеточных структур. В то же время чрезмерное увеличение концентрации экстрагента, более 1,5 %, не приводит к значительному повышению выхода пектиновых веществ, что свидетельствует о достижении предельной эффективности метода. К тому же с увеличением концентрации среда становится агрессивной, что приводит к деградации пектиновых веществ.

Из рис. 10 видно, что при увеличении гидромодуля от 1:4 до 1:10 наблюдается устойчивый рост выхода пектиновых веществ с 3,5 до 5,2 % общей массы коры. При дальнейшем увеличении гидромодуля до 1:20 процесс выходит на стадию насыщения и значения выхода практически не изменяются. При недостаточном объеме растворителя часть пектиновых соединений остается в структуре коры и не переходит в раствор. Оптимальное значение гидромодуля 1:10 позволяет обеспечить высокий выход пектина при рациональном расходе экстрагента.

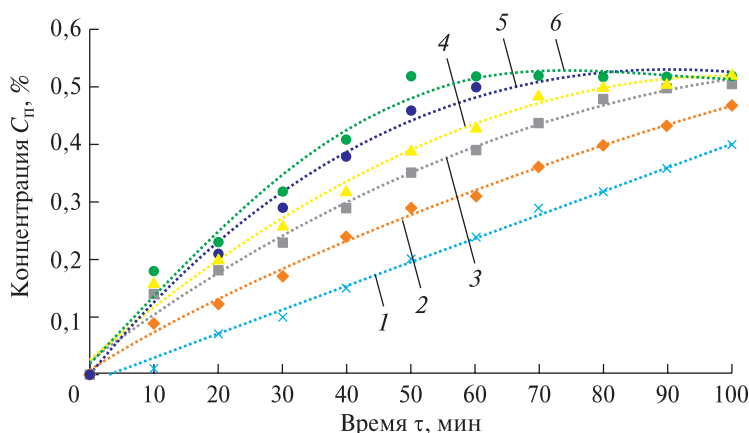


Рис. 11. Кинетическая зависимость выхода пектиновых веществ из коры сосны от температуры и продолжительности нагревания, °C: 1 — 50; 2 — 60; 3 — 70; 4 — 80; 5 — 90; 6 — 100

Fig. 11. Kinetic dependence of the pectin substance yield in pine bark extracts at temperatures, °C: 1 — 50; 2 — 60; 3 — 70; 4 — 80; 5 — 90; 6 — 100

При температурах от 50 до 60 °C выход пектиновых веществ увеличивается медленно и не достигает больших значений через 100 мин. (рис. 11). Однако при температурах 80...90 °C наблюдается резкое ускорение кинетики, и уже к 50-й минуте выход пектина максимальный. При температуре 100 °C достигается наибольшая концентрация пектиновых веществ, однако это ведет к частичной деградации термочувствительных соединений.

Полученные результаты подтверждают целесообразность проведения экстракции пектиновых веществ при температуре 90 °C в течение 60 мин. как оптимальной для достижения их максимального выхода при минимальном разрушении молекулярной структуры.

Выводы

Извлечение биологически активных веществ из коры сосны возможно при следующих рациональных параметрах процесса:

– для хвойного воска: оптимальный температурный диапазон 60...70 °C., продолжительность экстрагирования 45...55 мин., экстрагент — *n*-гексан, гидромодуль процесса 1:10;

– для антоцианидинового красителя: температура экстракции 80 °C; продолжительность экстрагирования 50 мин, экстрагент — этиловый спирт с водным раствором 4%-й соляной кислоты, гидромодуль 1:10;

– для пектиновых веществ: температура экстракции 90 °C, продолжительность экстрагирования 60 мин, экстрагент — 1%-й водный раствор щавелевокислого аммония, гидромодуль 1:10.

При указанных параметрах максимальное извлечение хвойного воска составило 0,9 %, антоцианидинового красителя — 0,6 %, пектиновых веществ — 0,52 % общей массы сырья.

Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ. (Соглашение №10/2025-ПД-КНИТУ от 22.12.2025).

Список литературы

- [1] Ученые КФУ выяснили, что сосновый лес в Татарстане погибает из-за серых чапель. URL: <https://media.kpfu.ru/news/uchenye-kfu-vuyasnili-chto-sosnovyy-les-v-tatarstane-pogibaet-iz-za-serykh-capel> (дата обращения 19.06.2023).
- [2] Газизуллин А.Х., Мубаракзянова Г.А., Бурганов Ф.Г. Осинники Республики Татарстан, их хозяйственное значение, современное состояние и проблемы повышения их экономического и экологического потенциала // Леса, лесной сектор и экология Республики Татарстан: сб. науч. статей КГСХА. Казань: Школа, 2005. Вып. 1. С. 169–177.
- [3] Салахов Н.В., Архипова Н.С. Растительный мир республики Татарстан. Казань: К(П)ФУ, 2013. 74 с.
- [4] Газизуллин А.Х., Мубаракзянова Г.А., Пуряев А.С. Проблема оздоровления осинников Республики Татарстан и пути ее решения // Леса, лесной сектор и экология Республики Татарстан: сб. науч. статей КГСХА. Казань: Школа, 2006. Вып. 2. С. 71–73.

- [5] Царев А.П., Погиба С.П., Тренин В.В. Селекция и репродукция лесных древесных пород. М.: Логос, 2003. 520 с
- [6] Сафин Р.Р., Сафин Р.Г. Анализ современного состояния лесопромышленного комплекса и перспективы его развития на базе кафедр лесотехнического профиля КГТУ // Вестник Казанского технологического университета, 2010. № 4. С. 120–130.
- [7] Стратегия развития лесного хозяйства Республики Татарстан до 2030 года. URL: https://minleshoz.tatarstan.ru/rus/file/pub/pub_3047130.pdf (дата обращения 14.12.2021).
- [8] Кислицына С.Н., Шитова И.Ю. Способы переработки отходов деревообрабатывающей промышленности. Пенза: ПГУАС, 2016. 140 с.
- [9] Тюлькова Ю.А. Переработка коры сосны с получением дубильных экстрактов: дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2013. 132 с.
- [10] Лесная промышленность: виды отрасли и крупные производства. URL: <https://forestcomplex.ru/forestry/lyesnaya-promishlyennost-veedi-otraslee/> (дата обращения 20.06.2025).
- [11] Ковбаса Н.П. Подсочка леса. Минск: БГТУ, 2011. 104 с.
- [12] Гитун Т.В. Лечение бронхиальной астмы. Новейшие медицинские методики. М.: Рипол-классик, 2008. 64 с.
- [13] Тутьгин Г.С., Гаевский Н.П., Петрик В.В. Технология производства недревесной продукции леса. Архангельск: Изд-во Архангел. гос. техн.ун-та, 2000. 267 с.
- [14] Солдатов С.Ю., Дубровин Г.А., Смирнов Д.А. Сравнительный Анализ физико-химических показателей эфирного масла сосны обыкновенной, полученного разными методами // Бюллетень науки и практики – Bulletin of science and practice, 2016. № 8. С. 49–57.
- [15] 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; Оpubл. 20.02.2004. Бюл. № 5. 5 с.
- [16] Пашетцкий 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.
- [17] 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).
- [18] Никитин А.М. Художественные краски и материалы. Справочник. М.: Инфра-Инженерия, 2016. 412 с.
- [19] Кундик Т.М., Зайцева О.А. Лекарственные растения флоры Брянской области. Брянск: Изд-во БГАУ, 2014. 103 с.
- [20] Терехин А.А., Вандышев В.В. Технология возделывания лекарственных растений. М.: Изд-во РУДН, 2008. 201 с.
- [21] Левданский В.А., Королькова И.В., Левданский А.В., Кузнецов Б.Н. Выделение и изучение проантоцианидинов коры сосны *Pinus sylvestris* L. // Химия растительного сырья, 2020. № 4. С. 227–233.
- [22] Дейнеко И.П., Пранович А.В., Рубанова В.Ф., Белов Л.П. Изучение химического состава хвойного воска // Химия растительного сырья, 2005. № 1. С. 13–18.
- [23] Чеснокова Н.Ю., Приходько Ю.В., Каленик Т.К. Антоцианы в пищевых технологиях и биотехнологиях. Владивосток: Изд-во ДВФУ, 2021. 146 с.
- [24] Порошковый рынок пектина. URL: <https://www.marketresearchintellect.com/ru/product/global-powdered-pectin-market/> (дата обращения 14.10.2025).
- [25] Обзор рынка. URL: <https://www.futuremarketreport.com/ru/industry-report/pectin-market> (дата обращения 14.10.2025).
- [26] Патент № 563154 Российская Федерация, МПК А 23 L 1/04. Способ получения пектина из растительного сырья: № 1385548: заявл. 08.01.1974.: опубл. 30.06.1977 / Н.А. Ярцева, Г.В. Пермьяков; заявитель Институт леса и древесины им. В.М. Сукачева. 2 с.
- [27] Экстрактивная переработка хвои ели сибирской в ценные химические продукты. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekstraktivnaya-pererabotka-kory-eli-sibirskoy-v-tsennye-himicheskie-produkty> (дата обращения 28.04.2025).
- [28] Патент № 2008116537 Российская Федерация, МПК В 27 К 9/00 (2006.01). Способ переработки хвои деревьев хвойных пород: № 2008116537/04; заявл. 29.04.2009; опубл. 27.09.2010 / Г.П. Григорюк, И.И. Слестников, Е.Б. Старостина, В.Г. Продаевич, Д.В. Левин; заявитель и патентообладатель: Григорюк Г.П. 2 с.
- [29] 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.
- [30] Пектин. Технология производства. URL: http://bfctech.ru/static/doc/0000/0000/0221/221064_ebni7u83sg.pdf (дата обращения 02.02.2024).

Сведения об авторах

Валеев Кирилл Валерьевич [✉] — канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (КНИТУ), kirval116@mail.ru

Сафин Рушан Гареевич — д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (КНИТУ), safin@kstu.ru

Поступила в редакцию 27.01.2026.

Одобрено после рецензирования 02.03.2026.

Принята к публикации 11.03.2026.

STUDY OF EXTRACTING PROCESS OF BIOLOGICALLY ACTIVE SUBSTANCES FROM PINE BARK

K.V. Valeev✉, R.G. Safin

Kazan National Research Technological University (KNRTU), 68, K. Marksa st., 420015, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

kirval116@mail.ru

The article presents a description of the extracting process of biologically active substances from pine bark. It also provides a schematic diagram of an experimental setup for extracting biologically active substances. It describes the methodology for conducting experimental studies on the extraction of biologically active substances. The authors present the dependence of the concentration of biologically active substances (coniferous wax, anthocyanidin dye, and pectin substances) from the type and concentration of the extractant, water duty, temperature, and time. The article also demonstrates the extraction of maximum amounts of coniferous wax, anthocyanidin dye and pectin under specific conditions.

Keywords: extraction, bark, pine, pectin, anthocyanidin dye, coniferous wax

Suggested citation: Valeev K.V., Safin R.G. *Issledovaniye protsessa izvlecheniya biologicheskii aktivnykh veshchestv iz kory sosny* [Study of extracting process of biologically active substances from pine bark]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2026, vol. 30, no. 2, pp. 102–112. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-2-102-112

References

- [1] *Uchenyye KFU vyyasnili, chto osnovnyy les v Tatarstane pogibayet iz-za serykh tsapel'* [Scientists of the CFU found out that the pine forest in Tatarstan is dying because of gray 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] Gazizullin A.K.H., Mubarakzyanova G.A., Burganov F.G. *Osinniki Respubliki Tatarstan, ikh khozyaystvennoye znachenie, sovremennoye sostoyaniye i problemy povysheniya ikh ekonomicheskogo i ekologicheskogo potentsiala* [Aspen trees of the Republic of Tatarstan, their economic value, current state and problems of increasing their economic and ecological potential]. *Les, lesnoy sektor i ekologiya Respubliki Tatarstan: sb. nauch. statey KGSKHA* [Forests, forest sector and ecology of the Republic of Tatarstan: coll. scientific. articles of the KGSKHA]. Kazan: School, 2005, iss. 1, pp. 169–177.
- [3] Salakhov N.V., Arkhipova N.S. *Rastitel'nyy mir respubliki Tatarstan* [Plant world of the Republic of Tatarstan]. Kazan: K(P)FU, 2013, 74 p.
- [4] Gazizullin A.K.H., Mubarakzyanova G.A., Puryayev A.S. *Problema ozdorovleniya osinnikov Respubliki Tatarstan i puti yeye resheniya* [The problem of improvement of aspen trees of the Republic of Tatarstan and ways of its solution]. *Les, lesnoy sektor i ekologiya Respubliki Tatarstan: sb. nauch. statey KGSKHA* [Forests, forest sector and ecology of the Republic of Tatarstan: coll. scientific. articles of the KGSKHA]. Kazan: School, 2006, iss. 2, pp. 71–73.
- [5] Tsarev A.P., Pogiba S.P., Trenin V.V. *Seleksiya i reproduksiya lesnykh drevesnykh porod* [Selection and reproduction of forest tree breeds]. Moscow: Logos, 2003, 520 p.
- [6] Safin R.R., Safin R.G. *Analiz sovremennogo sostoyaniya lesopromyshlennogo kompleksa i perspektivy yego razvitiya na baze kafedr lesotekhnicheskogo profilya KGTU* [Analysis of the current state of the forest-industrial complex and prospects of its development on the basis of the Department of Forestry of the KSTU]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University], 2010, no. 4, pp. 120–130.
- [7] *Strategiya razvitiya lesnogo khozyaystva Respubliki Tatarstan do 2030 goda* [Strategy of development of forestry of the Republic of Tatarstan until 2030]. Available at: https://minleshoz.tatarstan.ru/rus/file/pub/pub_3047130.pdf (accessed 14.12.2021).
- [8] Kislitsyna S.N., Shitova I.YU. *Sposoby pererabotki otkhodov derevoobratyvyayushchey promyshlennosti* [Methods of recycling woodworking waste]. Penza: PGUAS, 2016, 140 p.
- [9] Tyul'kova YU.A. *Pererabotka kory sosny s polucheniym dubil'nykh ekstraktov* [Processing of pine bark with the production of tannin extracts]. Dis. Cand. Sci. (Tech.). Krasnoyarsk, 2013, 132 p.
- [10] *Lesnaya promyshlennost': vidy otrasli i krupnyye proizvodstva* [Forest industry: types of industries and major productions]. Available at: <https://forestcomplex.ru/forestry/lyesnaya-promishlyennost-veedi-otraslee/> (accessed 20.06.2025).
- [11] Kovbasa N.P. *Podsochka lesa* [Undercut of the forest]. Minsk: BSTU, 2011, 104 p.
- [12] Gitun T.V. *Lecheniye bronkhial'noy astmy. Noveyshiye meditsinskiye metodiki* [Treatment of bronchial asthma. Latest medical techniques]. Moscow: RIPOL classics, 2008, 64 p.
- [13] 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 [Arkhangel'sk State Technological University], 2000, 267 p.

- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] *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).
- [18] Nikitin A.M. *Khudozhestvennyye kraski i materialy* [Artistic paints and materials. Reference]. Moscow: Infra-Engineering, 2016, 412 p.
- [19] Kundik T.M., Zaytseva O.A. *Lekarstvennyye rasteniya flory Bryanskoy oblasti* [Medicinal plants of the flora of the Bryansk region]. Bryansk: Bryansk State Agrarian University, 2014, 103 p.
- [20] Terekhin A.A., Vandysh V.V. *Tekhnologiya vozdeyvaniya lekarstvennykh rasteniy* [Technology of cultivation of medicinal plants]. Moscow: RUDN, 2008, 201 p.
- [21] Levdanskiy V.A., Korol'kova I.V., Levdanskiy A.V., Kuznetsov B.N. *Vydeleniye i izucheniye proantotsianidinov kory sosny Pinus sylvestris L.* [Isolation and study of proanthocyanidins of pine bark Pinus sylvestris L.]. Khimiya rastitel'nogo syr'ya [Chemistry of plant raw materials], 2020, no. 4, pp. 227–233.
- [22] Deyneko I.P., Pranovich A.V., Rubanova V.F., Belov L.P. *Izucheniye khimicheskogo sostava khvoynogo voska* [Study of the chemical composition of pine wax]. Khimiya rastitel'nogo syr'ya [Chemistry of plant raw materials], 2005, no. 1, pp. 13–18.
- [23] Chesnokova N.YU., Prikhod'ko YU.V., Kalenik T.K. *Antotsiany v pishchevykh tekhnologiyakh i biotekhnologiyakh* [Anthocyanins in food technology and biotechnology]. Vladivostok: Publishing house of the Far Eastern Federal University, 2021, 146 p.
- [24] *Poroshkovyy rynek pektina* [Powder Pectin Market]. Available at: <https://www.marketresearchintellect.com/en/product/global-powdered-pectin-market/> (accessed 14.10.2025).
- [25] *Obzor rynka* [Market Overview]. Available at: <https://www.futuremarketreport.com/en/industry-report/pectin-market> (accessed 14.10.2025).
- [26] *Pat. 1985548 Rossiyskaya Federatsiya MPK A 23 L 1/04. Sposob polucheniya pektina iz rastitel'nogo syr'ya* [Pat. 1985548 Russian Federation MPC A 23 L 1/04. Method of obtaining pectin from plant raw materials]. Applicant and patent holder: Yartseva N.A. no. 1985548/13; application. 08.01.1974; publ. 30.06.1977.
- [27] *Ekstraktivnaya pererabotka khvoi yeli sibirskoy v tsennyye khimicheskkiye produkty* [Extractive processing of Siberian spruce conifers into valuable chemical products]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/extractive-processing-kory-eli-sibirskoy-v-tsennyye-himicheskkiye-produkty> (accessed 28.04.2025).
- [28] *Pat. 2008116537 Rossiyskaya Federatsiya MPK B 27 K 9/00. Sposob pererabotki khvoi derev'yev khvoynykh porod* [Pat. 2008116537 Russian Federation MPC B 27 K 9/00. Method of processing of coniferous trees]. Applicant and patent holder: Grigoryuk G.P. No 2008116537/04; application. 04/29/2009; publ. 27.09.2010.
- [29] Safin R.G., Valeev K.V., Timerbaev N.F., Petrov V.I., Gil'fanov K.Kh. *Issledovanie protsesssa ekstrakttsii 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
- [30] *Pektin. Tekhnologiya proizvodstva* [Pectin. Production technology]. Available at: <http://bfctech.ru/static/doc/0000/0000/0221/221064.e6ni7u83sg.pdf> (accessed 02.02.2024).

This work was supported by a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan to higher education institutions, research organizations, and other organizations to support human resource development plans, including encouraging their research and teaching staff to earn Ph.D. and conduct scientific research. (Agreement No. 10/2025-PD-KNITU dated December 22, 2025).

Authors' information

Valeev Kirill Valer'yevich ✉ — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Kazan National Research Technological University, kirval116@mail.ru

Safin Rushan Gareyevich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Kazan National Research Technological University, safin@kstu.ru

Received 27.01.2026.

Approved after review 02.03.2026.

Accepted for publication 11.03.2026.

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

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЗАГОТОВКИ ДРЕВЕСНОГО СЫРЬЯ КОМПЛЕКСОМ МАШИН «ХАРВЕСТЕР + ФОРВАРДЕР»

С.А. Голякевич

Белорусский государственный технологический университет (БГТУ), Республика Беларусь, 220006, г. Минск, ул. Свердлова, д. 13а

gsa@belstu.by

Изложено математическое описание аналитической модели взаимодействия многооперационных лесозаготовительных машин при реализации ими типовых технологических процессов заготовки древесины. Дана оценка доступности деревьев для харвестера с одной технологической стоянки с учетом размеров рабочей зоны манипулятора, наличия или отсутствия технологических коридоров, координат мест раскряжевки и др. Приведены материалы исследований по трем типовым вариантам расположения лесоматериалов после работы харвестера: 1) вдоль технологического коридора; 2) поперек коридора с оставлением порубочных остатков на нем; 3) поперек коридора и расположением порубочных остатков рядом с ним. Определен характер взаимосвязи технологического процесса работы харвестера и формирования будущих условий работы форвардера. Отмечена важность учета концентрации лесоматериалов на лесосеке, количества групп их сортировки, размеров, удаленности и направления их укладки относительно технологического коридора.

Ключевые слова: харвестер, форвардер, операция, методика, эффективность, комплекс машин, технология, эксплуатация, условия, сортировка, погрузка, валка, раскряжевка

Ссылка для цитирования: Голякевич С. А. Математическая модель технологических процессов заготовки древесного сырья комплексом машин «харвестер + форвардер» // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2026. Т. 30. № 2. С. 113–126. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-2-113-126

Создание машин, обеспечивающих заданный уровень эксплуатационной эффективности в целевых природно-производственных условиях на стадии проектирования, требует первичной оценки их эксплуатационных потребительских качеств. Наиболее доступный способ такой оценки — использование данных эксплуатации современных машин с близкими параметрами. Однако такой подход не позволяет дать оценку не только принципиально новым машинам, но и ныне функционирующим при существенном изменении их технических параметров.

Выбор параметров машин можно проводить на основе отдельного или совместного анализов их эксплуатационных характеристик: маневренности, устойчивости, опорной и профильной проходимости и т. д. Выявление совокупности наиболее значимых из них, определяется конструкцией и назначением конкретной машины, условиями и технологией ее применения. Связь технических параметров машин и их эксплуатационных характеристик с такими

эксплуатационными потребительскими качествами, как производительность, экономичность, надежность и другими устанавливается только с помощью комплексного математического моделирования работы машин в целевых условиях и по заданным технологиям.

Значительное влияние на эффективность отдельных машин и их комплексов оказывают природно-производственные условия эксплуатации. При этом условия эксплуатации второй машины и последующих машин комплекса во многом формируются предыдущими и очень зависят от реализуемого ими технологического процесса. При реализации такой модели важно, чтобы анализ машины проводился не по каждой из них в отдельности, а как по единому комплексу, учитывая совместное влияние на эффективность технологического процесса. Такой анализ следует выполнять либо для всего потенциального диапазона условий, либо, что более рационально, для предварительно обоснованных типовых условий. В этом случае обособленные данные о рельефе местности [1], грунтовых особенностях [2–5] и таксационных характеристиках древостоев [6–9] должны рассматриваться с учетом их вариативности и вза-

имосвязи с последующим выделением типовых эксплуатационных групп [10].

Имитационное моделирование и компьютерная симуляция технологических процессов работы харвестеров и форвардеров [11–15] и разработка программных средств для их реализации выполнялись учеными и ранее [16]. Однако они рассматривали работу машин по отдельности без взаимовлияния, и, как правило, по определенному технологическому процессу. Вопросы взаимосвязи машин в едином комплексе и разнообразие реализуемых ими технологий не рассматривались.

Предварительные исследования показывают, что модели, учитывающие совместную работу машин в заданном диапазоне типовых условий, варианты технологических процессов, способов, приемов и режимов выполнения операций с установлением показателей эксплуатационно-потребительских качеств и с учетом ограниченности реализации эксплуатационных свойств машин, до настоящего времени ни в отечественных, ни в зарубежных источниках не предлагались.

Цель работы

Цель работы — создание комплексной математической модели «условия работы — технология — комплекс многооперационных лесозаготовительных машин».

Материалы и методы

В рамках данной статьи предлагается часть комплексной модели, которая математически описывает технологические процессы совместного применения харвестеров и форвардеров и устанавливает влияние совершаемых ими операций на продолжительность и совокупные энергозатраты всего технологического процесса получения древесного сырья.

Моделирование технологического цикла харвестера. На практике форма лесосек весьма разнообразна, однако для целей оценки эффективности эксплуатации лесозаготовительных комплексов в типовых условиях достаточно сравнения работы машин на лесосеках с идеализированными границами. Геометрические параметры лесосек:

- длина $a_{л}$ и ширина $b_{л}$ лесосеки, м;
- расстояние $l_{под}$ от места въезда на лесосеку до погрузочного пункта, находящегося вне лесосеки, м;
- коэффициент $k_{сх}$, равный отношению длины между въездом на лесосеку и ближайшей из ее боковых границ к общей протяженности границы со стороны въезда на лесосеку.

При разработке лесосеки от ее длинного края $a_{л}$ количество пазок на ней $n_{паз}$ определяется выражением

$$n_{паз} = \frac{a_{л}}{2l_{раб}^X},$$

где $l_{раб}^X$ — длина рабочего вылета манипулятора харвестера, м.

Рабочий вылет манипулятора $l_{раб}^X$ определяется его кинематическим вылетом, ограниченными эксплуатационными качествами: грузоподъемностью, допускаемой нагруженностью конструкции, устойчивостью харвестера против опрокидывания, возможностью подтягивания ствола с заданного вылета, а также энергетическими возможностями харвестера и др.

В работах [17–19] приближено определяется лишь средний вылет манипулятора (без учета вариантов реализуемого технологического процесса) и с его помощью устанавливаются показатели производительности харвестера. В работах [21, 21] сделана попытка определения координат «центров тяжести» полупазок. Расстояние до него принято за основу расчета времени наведения манипулятора и далее применяется для расчета производительности харвестера по уже известным методикам. В этих подходах для оценки временных затрат на наведение рабочего органа машины на дерево используются параметры среднего рабочего вылета манипулятора и движения от него до края полупазки. Полученные при этом данные о производительности и энергозатратах харвестеров слабо коррелируют с реальными результатами, достигнутыми при реализации реальных технологических процессов.

В 2021–2023 гг. под руководством автора были собраны данные об условиях эксплуатации и производительности работы харвестеров и форвардеров в большинстве лесохозяйственных учреждений страны. На основе их анализа для каждой модели машин, эксплуатируемых на предприятиях Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь, были выявлены операторы с наилучшей производительностью. Анализ их работы позволил установить, что они в целом используют схожую схему перемещения рабочего органа манипулятором на каждой технологической стоянке: от транспортного положения — к первому дереву, находящемуся в зоне будущего места раскряжевки, после спиливания дерева вместе с ним — к месту обрезки сучьев и раскряжевки, а после выполнения данных операций — к следующему, ближайшему дереву и так далее для одной полупазки. Затем рабочий орган машины перемещается к ближайшему дереву другой полупазки и цикл

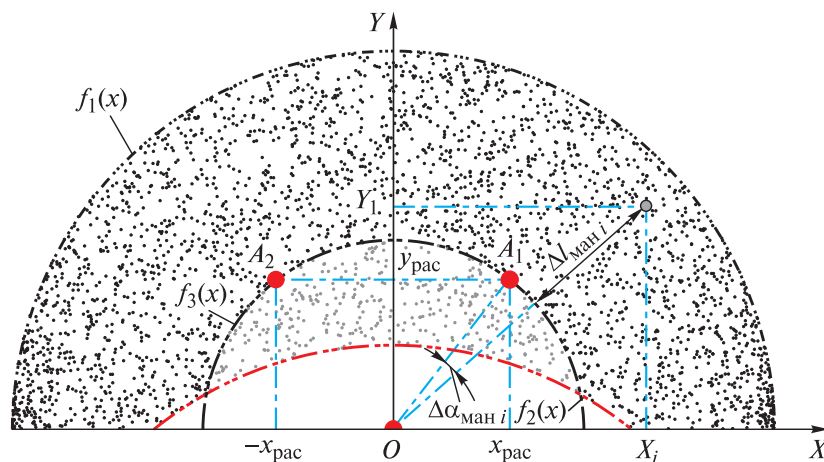


Рис. 1. Схема участка лесосеки, обрабатываемого харвестером с одной технологической стоянки
Fig. 1. Diagram of a logging site processed by a harvester from one technological stop

повторяется. Это означает, что манипулятор совершает циклические рабочие и холостые перемещения рабочего органа машины от пней деревьев к местам раскряжевки и обратно, т. е. от периферии к месту раскряжевки. Учет данных технологических особенностей в предлагаемой аналитической модели является отличием этой модели от ранее предлагаемых.

Перемещение харвестера по лесосекам может происходить как по уже сформированным технологическим коридорам, так и при их непосредственном прорубании в процессе работы. Для обоих случаев в модели приняты следующие допущения:

- траектории передвижения харвестера криволинейны, но равноудалены от криволинейных границ соседних пазек;

- по окончании разработки каждой пазеки харвестер перемещается на следующую путем переезда по кратчайшей возможной траектории без возвращения по пройденному пути.

Минимальный общий путь $l_{дв}^X$, проходимый харвестером для освоения всей лесосеки, определяется выражением

$$l_{дв}^X = \frac{a_l}{2l_{раб}^X} (b_l - 2l_{раб}^X) + a_l;$$

общее количество технологических стоянок $n_{т.с}^X$ — выражением

$$n_{т.с}^X = \frac{l_{дв}^X}{l_{пер}^X},$$

где $l_{пер}^X$ — расстояние между технологическими стоянками харвестера.

Участки лесосеки, обрабатываемые харвестером на каждой технологической стоянке (рис. 1) математически ограничиваются осью абсцисс, функцией рабочего вылета манипулятора $f_1(x)$ и функцией, ограничивающей участок, который разработан харвестером с предыдущей технологической стоянки $f_2(x)$. Данные функции описываются выражениями:

$$f_1(x) = \sqrt{(l_{раб}^X)^2 - x^2};$$

$$f_2(x) = \sqrt{(l_{раб}^X)^2 - x^2} - l_{пер}^X,$$

где x — координата по оси OX положения точки подвеса рабочего органа манипулятора в системе координат OXY (см. рис. 1) и начале координат O , находящимся на вертикальной оси поворота манипулятора, м.

Однако эти функции не учитывают ограничений рабочей зоны харвестера по условию его устойчивости. Для учета устойчивости харвестера и более точного описания границ рабочей зоны можно воспользоваться математической моделью работы многооперационной лесозаготовительной машины, разработанной автором, либо результатами оценки устойчивости харвестеров из других работ, к примеру, из работы [22].

Варианты технологических процессов, в которых операторы проводят заготовку деревьев «позади» оси абсцисс, не рассматриваются в связи с имеющимися материалами исследований о пониженной производительности таких технологий и о повышении утомляемости операторов при реализации работ машинами с бесповоротными кабинами [23].

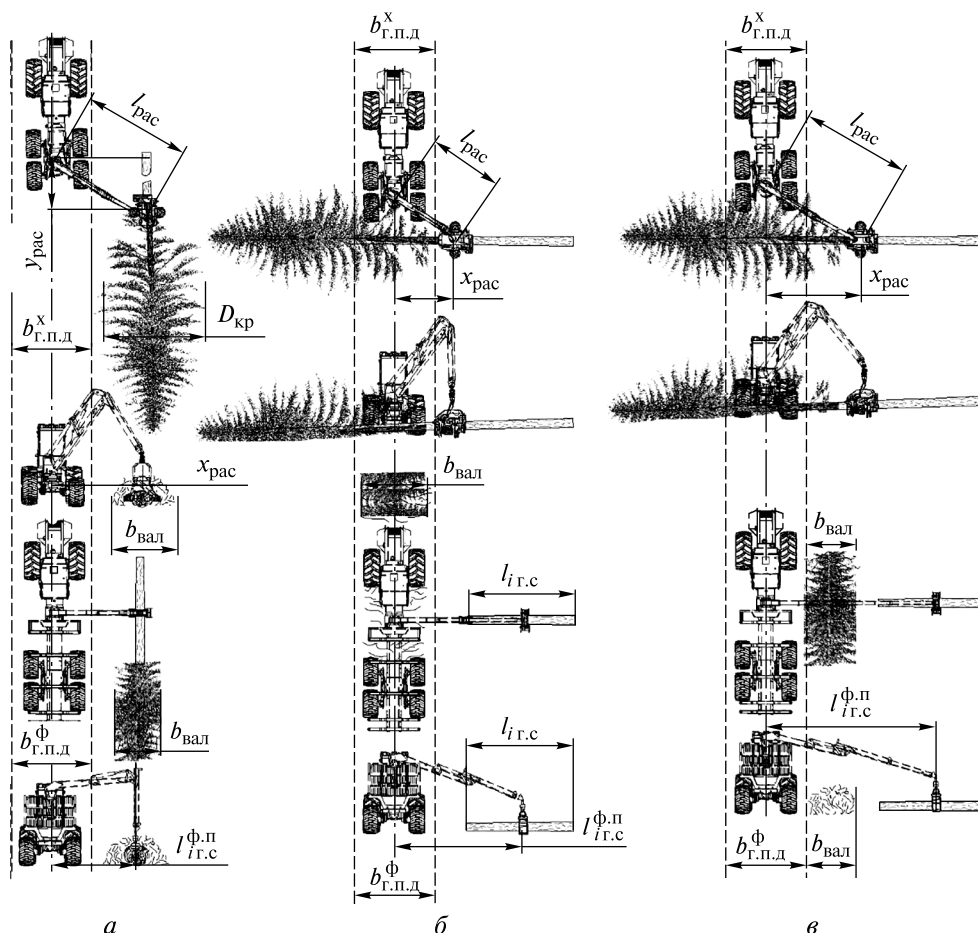


Рис. 2. Типовые схемы размещения лесоматериалов и порубочных остатков на лесосеке относительно мест технологических стоянок харвестера и форвардера: *а* — валка деревьев вдоль волока с образованием куч порубочных остатков; *б* — валка деревьев поперек волока с оставлением порубочных остатков на волоке; *в* — валка деревьев поперек волока с образованием валов порубочных остатков вдоль волока

Fig. 2. Typical layouts for timber and logging residue placement in a logging area relative to harvester and forwarder stops: *a* — felling trees along a skidding track, creating piles of logging residue; *б* — felling trees across a skidding track, leaving logging residue on the skidding track; *в* — felling trees across a skidding track, creating piles of logging residue along the skidding track

В исследованиях отечественных и зарубежных ученых вопросы определения площадей участков, разрабатываемых манипуляторными лесозаготовительными машинами с одной технологической стоянки, рассматривались неоднократно [17–22]. Однако комплексное аналитическое моделирование таких процессов ранее не проводилось.

Площадь $S_{обр}$, которая разрабатывается харвестером с одной технологической стоянки, определяется выражением

$$S_{обр} = \int_{-l_{раб}}^{l_{раб}} f_1(x) - f_2(x) dx - \int_{-\frac{b_{кор}}{2}}^{\frac{b_{кор}}{2}} f_1(x) - f_2(x) dx,$$

где $b_{кор}$ — ширина ранее проложенного технологического коридора при его наличии, м.

Координаты положения мест обрезки сучьев и раскряжевки стволов на круглые лесоматериалы определяются точками A_1 и A_2 пересечения функции $f_3(x)$ вылета манипулятора

$$f_3(x) = \sqrt{l_{рас}^2 - x^2},$$

на котором выполняется раскряжевка с функциями боковых границ, а за ними осуществляется пакетирование сортиментов справа и слева от продольной оси соответственно

$$x = x_{рас}; \quad x = -x_{рас},$$

где $l_{рас}$ — вылет манипулятора, на котором проводится раскряжевка, м;

$x_{рас}$ — координата x продольной границы, за которой осуществляется пакетирование лесоматериалов, м.

В ходе исследований для природно-производственных условий и реализуемых технологических процессов было выделено три типовых варианта размещения продольных границ $x_{рас}$ (см. рис. 1). В первом случае (рис. 2, а) валка деревьев осуществляется вдоль продольной оси движения харвестера, что целесообразно в зимнее время или при работе в низкополнотных древостоях. При таком технологическом процессе лесоматериалы и порубочные остатки располагаются вдоль технологического коридора справа и слева от харвестера на минимальном расстоянии $x_{рас}$, м

$$x_{рас} = \begin{cases} \frac{b_{г.п.д}^{\Phi}}{2}, & \text{если } \frac{b_{г.п.д}^{\Phi}}{2} \geq \frac{b_{г.п.д}^X + D_{кр}}{2} \\ \frac{b_{г.п.д}^X + D_{кр}}{2}, & \text{если } \frac{b_{г.п.д}^{\Phi}}{2} < \frac{b_{г.п.д}^X + D_{кр}}{2} \end{cases},$$

где $b_{г.п.д}^{\Phi}$ — габаритная полоса движения форвардера на заданном участке, связанная с его габаритной шириной $b_{ф}$ (м) зависимостями, изложенными в работе [23], м;
 $b_{г.п.д}^X$ — габаритная полоса движения харвестера на заданном участке, м;
 $D_{кр}$ — диаметр кроны обрабатываемых деревьев, м.

Типовая схема размещения круглых лесоматериалов и порубочных остатков на лесосеке, представленная на рис. 2, б, должна использоваться при необходимости укрепления волока порубочными остатками на грунтах с низкой несущей способностью. При этом валка дерева осуществляется перпендикулярно продольной оси волока, порубочные остатки, получаемые при обрезке сучьев, размещаются на технологическом коридоре, а круглые лесоматериалы — слева и справа от него. В этом случае имеем формулу

$$x_{рас} = \begin{cases} \frac{b_{г.п.д}^X}{2}, & \text{если } \frac{b_{г.п.д}^X}{2} \geq \frac{b_{г.п.д}^{\Phi}}{2} \\ \frac{b_{г.п.д}^{\Phi}}{2}, & \text{если } \frac{b_{г.п.д}^X}{2} < \frac{b_{г.п.д}^{\Phi}}{2} \end{cases}.$$

При необходимости сохранения порубочных остатков для последующего сбора и переработки, целесообразно формировать из них валы по сторонам технологического коридора (см. рис. 2, в). При этом граница $x_{рас}$ определяется зависимостью

$$x_{рас} = \frac{b_{г.п.д}^X}{2} + b_{вал} + l_{х.г},$$

где $l_{х.г}$ — габаритная длина харвестерной головки, м;

$b_{вал}$ — допускаемая ширина вала порубочных остатков, м.

Координата $y_{рас}$ положения места раскряжевки вдоль оси OY определяется выражением

$$y_{рас} = \sqrt{l_{рас}^2 - x_{рас}^2}.$$

Для последующей оценки временных и энергетических затрат на работу харвестера участки лесосек, обрабатываемые харвестером с одной технологической стоянки, важно подразделить на отдельные зоны, в которых харвестер совершает однотипные действия. Так, деревья, растущие на левой полупасеке после валки, перемещаются в точку раскряжевки A_2 (см. рис. 1), а деревья с правой полупасеки — в точку раскряжевки A_1 .

Сам процесс валки следует осуществлять таким образом, чтобы центр давления кроны упавшего дерева находился близко к горизонтальной или вертикальной осям, проходящим через точки A_2 или A_1 соответственно, в зависимости от принятой типовой схемы размещения круглых лесоматериалов (см. рис. 2). Такой подход обеспечит необходимую их ориентацию после обрезки сучьев и уменьшит необходимое количество корректирующих движений манипулятора.

Деревья, находящиеся за границей функции уровня раскряжевки $f_3(x)$, перемещаются в точки раскряжевки A_1 и A_2 путем уменьшения вылета манипулятора, а деревья, находящиеся до границы $f_3(x)$, — путем его увеличения.

Величина $\Delta l_{ман i}$, на которую должен быть сокращен или увеличен вылет манипулятора после валки i -го дерева, определяется выражением

$$\Delta l_{ман i} = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2} - l_{рас},$$

где X_i и Y_i — координаты положения i -го дерева относительно оси поворота манипулятора, м.

В обоих случаях с подтаскиванием деревьев последовательно или параллельно осуществляется поворот манипулятора в направлении места раскряжевки на требуемый угол $\Delta\alpha_{ман i}$

$$\Delta\alpha_{ман i} = \arctg\left(\frac{y_{рас}}{x_{рас}}\right).$$

Расположение деревьев на отдельных лесосеках весьма разнообразно. Так, могут наблюдаться локальные сгущения деревьев, куртины и прогалины. Однако ученые лесоводы [24] сходятся во мнении, что при больших объемах выборки лесосек, вне зависимости от способа лесовосстановления (искусственного или естественного), уже к 20-летнему возрасту распределение деревьев по площади близко к равномерному. При этом количество стволов деревьев $n_{\text{ств}}$ на 1 га площади и на всей лесосеке $n_{\text{ств}}^{\text{л}}$ до и после прохода харвестера определяется соответственно

$$n_{\text{ств}} = \frac{S_{\text{сеч}}(1-i_{\text{руб}})}{\left(\frac{\pi d_{1,3}^2}{4}\right)}; \quad n_{\text{ств}}^{\text{л}} = \frac{S_{\text{сеч}}(1-i_{\text{руб}})a_{\text{л}}b_{\text{л}}}{k\left(\frac{\pi d_{1,3}^2}{4}\right)},$$

где $i_{\text{руб}}$ — интенсивность проводимой рубки, до проведения рубки харвестером $i_{\text{руб}} = 0$;
 $S_{\text{сеч}}$ — сумма площадей сечений на 1 га при полноте равной 1, м² [10];
 k — коэффициент перевода размерности площади, $k = 10\,000$ м²/га.

Для моделирования координат X_i и Y_i расположения каждого i -го дерева (см. рис. 1) рационально применять два основных подхода.

1. Для технологических процессов рубок прочистки в искусственно посаженном лесу.

Деревья в нем располагаются рядами с шириной междурядья $b_{\text{мр}}$ и средним расстоянием между деревьями в ряду $l_{\text{дер}}$

$$l_{\text{дер}} = \frac{k}{n_{\text{ств}} b_{\text{мр}}}.$$

2. Для иных видов рубок ухода и главного пользования. Подход основывается на случайном равномерном распределении координат деревьев по площади лесосеки с последующим их приведением к месту одной технологической стоянки харвестера с началом координат в точке O (см. рис. 1).

Вне зависимости от используемого подхода каждая пара координат X_i и Y_i определяет положение i -го дерева относительно точки O , расположенной на вертикальной оси поворота манипулятора.

Для описания таксационных характеристик деревьев использовались данные справочных таблиц [25], отражающих взаимосвязь между породой деревьев, бонитетом условий их произрастания, возрастом, таксационным диаметром ствола $d_{1,3}$ и высотой $H_{\text{ств}}$ ствола, а также расчетные данные о высоте центра давления кроны $H_{\text{ц.д.к}}$.

Моделирование работы форвардера. Работа форвардеров осуществляется на участках лесосек, где харвестеры выполнили свои операции, т. е. харвестеры частично формируют условия последующей эксплуатации форвардеров. Их технологический цикл заключается в циклическом повторении на лесосеке операций погрузки лесоматериалов в пакет на собственную грузовую платформу, операций перемещения к месту их разгрузки на погрузочном пункте, непосредственно разгрузки и возвращения к местам погрузки.

Путь $L_{\text{пер}}^{\Phi}$, проходимый форвардером по лесосеке во время набора очередного пакета лесоматериалов, зависит от запаса древесины Q , грузоподъемности форвардера Q_{Φ} и рабочего вылета манипулятора харвестера $l_{\text{раб}}^X$ работающего перед ним

$$L_{\text{пер}}^{\Phi} = \frac{kQ_{\Phi}}{2l_{\text{раб}}^X Q}.$$

Общий путь $L_{\text{дв}}^{\Phi}$, м проходимый форвардером по лесосеке в порожнем и загруженном состоянии определяется зависимостью

$$L_{\text{дв}}^{\Phi} = \sum_{i_{\text{пас}1}=1}^{n_{\text{пас}1}} \sum_{j_{\text{т.с}}^{\Phi1}=1}^{n_{\text{т.с}}^{\Phi1}} 2(l_{\text{раб}}^X(2i_{\text{пас}1}-1) + L_{\text{пер}}^{\Phi} j_{\text{т.с}}^{\Phi1} + l_{\text{под}}) + \\ + \sum_{i_{\text{пас}2}=1}^{n_{\text{пас}2}} \sum_{j_{\text{т.с}}^{\Phi2}=1}^{n_{\text{т.с}}^{\Phi2}} 2(l_{\text{раб}}^X(2i_{\text{пас}2}-1) + L_{\text{пер}}^{\Phi} j_{\text{т.с}}^{\Phi2} + l_{\text{под}}),$$

где $n_{\text{пас}1}$ и $n_{\text{пас}2}$ — количество пасек, находящихся слева и справа от въезда на лесосеку, соответственно;

$i_{\text{пас}1}$, $i_{\text{пас}2}$ — порядковый номер пасеки слева и справа от въезда на лесосеку соответственно;

$j_{\text{т.с}}^{\Phi1}$, $j_{\text{т.с}}^{\Phi2}$ — порядковый номер технологической стоянки на пасеке $i_{\text{пас}1}$ и $i_{\text{пас}2}$ соответственно;

$n_{\text{т.с}}^{\Phi1}$, $n_{\text{т.с}}^{\Phi2}$ — количество технологических стоянок на пасеках $i_{\text{пас}1}$ и $i_{\text{пас}2}$ соответственно;

$l_{\text{под}}$ — расстояние от погрузочного пункта до места въезда на лесосеку, м.

В качестве допущений в данной зависимости принято, что форвардер движется по прямой траектории без подъемов и спусков и собирает пачки лесоматериалов на пасеке подряд, а при необходимости их добора до полного пакета с другой пасеки перемещается до него по кратчайшему пути, протяженность которого не учитывается. При этом половину обозначенного пути форвардер движется груженым, а половину — в порожнем состоянии.

Вылет манипулятора форвардера $l_{i_{\text{т.с}}^{\Phi\Pi}}$ с которого проводится подъем лесоматериалов

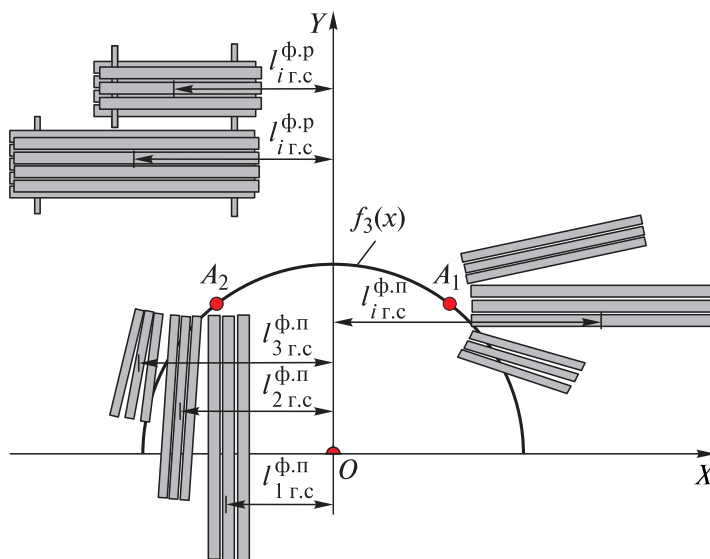


Рис. 3. Схема вариантов расположения сортиментов на лесосеке и на погрузочном пункте
Fig. 3. Layout options for timber placement in a logging area and at the loading point

(рис. 3), помимо прочего зависит от принятой технологической схемы их укладки харвестером (см. рис. 2), количества групп сортировки $n_{i.g.c}$, средних диаметров лесоматериалов в них $d_{i.g.c}$, ширины вала порубочных остатков $b_{вал}$, а для схем, приведенных на рис. 2, б, в — от длины полученных лесоматериалов в соответствующей группе сортировки $l_{i.g.c}$, м.

Для схемы, приведенной на рис. 2, а, применяется выражение

$$l_{i.g.c}^{фП} = x_{рас} + \sum_{i.g.c=1}^{n_{г.с}} d_{i.g.c} \frac{n_{i.g.c} n_{ств}^{г.с}}{2i_{укл}}$$

для схем, приведенных на рис. 2, б, в выражение

$$l_{i.g.c}^{фП} = x_{рас} + \frac{l_{i.g.c}}{2},$$

где $n_{г.с}$ — количество групп сортировки лесоматериалов;

$n_{i.g.c}$ — количество лесоматериалов $i_{г.с}$ -й группы сортировки;

$i_{г.с}$ — порядковый номер группы сортировки лесоматериалов;

$n_{ств}^{г.с}$ — количество стволов деревьев заготавливаемых харвестером с одной технологической стоянки;

$i_{укл}$ — количество мест раскряжевки стволов на технологической стоянке; при односторонней укладке сортиментов $i_{укл} = 1$, при двухсторонней — $i_{укл} = 2$; $l_{i.g.c}$ — длина лесоматериалов в $i_{г.с}$ -й группе сортировки, м;

$d_{i.g.c}$ — средний диаметр лесоматериала в $i_{г.с}$ -й группе сортировки, м.

При этом разгрузка форвардера на погрузочном пункте осуществляется с рабочим вылетом манипулятора $l_{i.g.c}^{фП}$

$$l_{i.g.c}^{фП} = \frac{b_{ф} + l_{i.g.c}}{2} + 1.$$

Для сбора всех лесоматериалов с одной лесосеки при условиях набора полных пакетов и погрузки сортиментов подряд форвардер должен совершить $n_{г.с}^{ф}$ технологических циклов

$$n_{г.с}^{ф} = \frac{b_{л}}{L_{пер}} n_{пас} = \frac{a_{л} b_{л} Q}{10\,000 \cdot Q_{ф}}$$

На каждом из них форвардер должен выполнить $n_{г.с}^{п}$ циклов погрузки пачек каждой из $n_{г.с}$ групп сортировки

$$n_{г.с}^{п} = \begin{cases} \frac{S_{k.g.c}}{S_{раб}^{г.з} \xi_{пд}}, \text{ при } S_{раб}^{г.з} \leq \frac{m_{лм}}{\rho_{лм} l_{лм} \xi_{пд}}; \\ \frac{S_{k.g.c} \rho_{лм} l_{лм}}{m_{лм}}, \text{ при } S_{раб}^{г.з} > \frac{m_{лм}}{\rho_{лм} l_{лм} \xi_{пд}}, \end{cases} \quad (1)$$

где $k_{г.с}$ — номер группы сортировки лесоматериалов, для которой проводится расчет;

$\xi_{пд}$ — коэффициент полндревесности пакета лесоматериалов;

$\rho_{лм}$ — плотность лесоматериалов, кг/м³;

$S_{k_{г.с}}$ — общая площадь сечения лесоматериалов $k_{г.с}$ -й группы сортировки, сконцентрированных на одной технологической стоянке в зоне их захвата, м²;

$S_{раб}^{г.с}$ — рабочая площадь зева грейферного захвата, м²;

$m_{лм}$ — масса лесоматериалов, погружаемых за один прием, кг.

Масса лесоматериалов $m_{лм}$ ограничивается грузоподъемностью манипулятора на заданном вылете, устойчивостью форвардера и грузоподъемностью его грейферного захвата. Нецелая величина $n_{k_{г.с}}^п$, полученная по зависимости (1), означает, что последняя пачка лесоматериалов, погружаемая из данной группы сортировки, будет неполной. Масса неполной пачки равна произведению массы полной пачки на значение дробной части величины $n_{k_{г.с}}^п$.

Сумма площадей сечений $S_{k_{г.с}}$ лесоматериалов $k_{г.с}$ -й группы сортировки с учетом диаметра ствола дерева $d_{1,3}$, среднего сбега ствола $S_{ср}$ с достаточной точностью определяется зависимостью

$$S_{k_{г.с}} = n_{ств}^{г.с} \frac{\pi \left(d_{1,3} - \frac{\left(\sum_{i_{г.с}=1}^{k_{г.с}} \sum_{j_{г.с}=1}^{n_{г.с}} j_{i_{г.с}} l_{i_{г.с}} \right)}{2} - 1,3 \right)^2}{4} S_{ср}$$

где $j_{i_{г.с}}$ — порядковый номер лесоматериала в $i_{г.с}$ -й группе сортировки;

$l_{k_{г.с}}$ — длина лесоматериала в группе сортировки $k_{г.с}$, м;

$S_{ср}$ — средний сбег ствола дерева, рассчитанный по зависимости $S_{ср} = d_{1,3} / (H_{ств} - 1,3)$ [8].

При двухсторонней укладке лесоматериалов харвестером, на каждой стороне, сосредотачивается половина лесоматериалов и соответственно $S_{k_{г.с}}$ уменьшается вдвое.

При этом диаметр каждого лесоматериала $d_{k_{лм}}$ в верхнем отрезе может быть ориентировочно рассчитан по зависимости

$$d_{k_{лм}} = d_{1,3} - S_{ср} \left(\sum_{j_{лм}=1}^{k_{лм}} j_{лм} l_{j_{лм}} - 1,3 \right), \quad (2)$$

где $k_{лм}$ — номер лесоматериала в стволе, для которого проводится расчет;

$j_{лм}$ — порядковый номер лесоматериала в стволе;

$l_{j_{лм}}$ — длина лесоматериала с порядковым номером $j_{лм}$ в стволе, м.

Количество стволов $n_{ств}^{г.с}$, раскряжеванных на одной технологической стоянке харвестера и, соответственно, доступных к загрузке при каждой остановке форвардера, определяется выражением

$$n_{ств}^{г.с} = \frac{S_{обр} n_{ств}}{10\,000}.$$

На этапе разгрузки форвардера доля $\omega_{k_{г.с}}$ лесоматериалов соответствующей группы сортировки, находящихся в нем, определяется зависимостью

$$\omega_{k_{г.с}} = \frac{S_{k_{лм}}}{\sum_{i_{г.с}=1}^{n_{г.с}} S_{i_{г.с}}}.$$

Результаты работы аналитической модели используются впоследствии в блоке моделирования технологических операций [25], где для каждого приема и режима выполнения операций харвестера и форвардера определяются затраты времени и энергии, а также нагрузки, возникающие в конструкциях и силовых приводах машин при их проведении. С некоторыми из математических моделей, реализующих данный блок моделирования технологических операций можно ознакомиться в работах [26–35].

Далее рассчитываются общие энергозатраты и время на выполнение операций каждой из машин комплекса «харвестер + форвардер»:

$$\mathcal{E}_{\Phi} = \left(\mathcal{E}_{xx}^{\Phi} + \mathcal{E}_{рх}^{\Phi} + \mathcal{E}_{пер}^{\Phi} \left(\frac{L_{пер}^{\Phi}}{l_{пер}^x} - 1 \right) + \sum_{k_{г.с}=1}^{n_{г.с}} \mathcal{E}_{k_{г.с}}^п n_{k_{г.с}}^п + \sum_{k_{г.с}=1}^{n_{г.с}} \mathcal{E}_{k_{г.с}}^р n_{k_{г.с}}^р \right) n_{г.с}^{\Phi},$$

где \mathcal{E}_{Φ} — общие энергозатраты на выполнение технологических операций форвардером, Дж;

\mathcal{E}_{xx}^{Φ} — энергозатраты на порожнее передвижение форвардера при среднем расстоянии вывозки $L_{дв}^{\Phi} / 2n_{г.с}^{\Phi}$, Дж;

$\mathcal{E}_{рх}^{\Phi}$ — энергозатраты на грузовое передвижение форвардера при среднем расстоянии вывозки $L_{дв}^{\Phi} / 2n_{г.с}^{\Phi}$, Дж;

$\mathcal{E}_{пер}^{\Phi}$ — энергозатраты на передвижение форвардера при наборе пачки на расстоянии $L_{пер}^{\Phi}$, Дж;

$\mathcal{E}_{k_{г.с}}^п$ — энергозатраты на погрузку манипулятором одной пачки лесоматериалов $k_{г.с}$ -й группы сортировки, удаленной от оси поворота манипулятора на расстоянии $l_{г.с}^п$, Дж;

$\mathcal{E}_{k_{г.с}}^P$ — энергозатраты на разгрузку манипулятором одной пачки лесоматериалов $k_{г.с}$ -й группы сортировки из грузовой платформы форвардера в штабель на расстояние $l_{i_{г.с}}^{ФП}$ от оси поворота манипулятора, Дж;

$$\mathcal{E}_X = \mathcal{E}_{пер}^X n_{тс}^X + \sum_{i=1}^{n_{ств}} \mathcal{E}_i^{нав} + \sum_{i=1}^{n_{ств}} \mathcal{E}_i^{под} + \sum_{i=1}^{n_{ств}} \mathcal{E}_i^B + \sum_{i=1}^{n_{ств}} \mathcal{E}_i^{o.c} + \sum_{i=1}^{n_{ств}} \sum_{j_{лм}=1}^{n_{лм}} \mathcal{E}_{j_{лм}}^{рк}$$

где \mathcal{E}_X — общие энергозатраты на выполнение технологических операций харвестером, Дж;

$\mathcal{E}_{пер}^X$ — энергозатраты на передвижение харвестера между технологическими стоянками при среднем расстоянии между ними $l_{пер}^X$, Дж;

$\mathcal{E}_i^{нав}$, $\mathcal{E}_i^{под}$ — энергозатраты на наведение харвестерной головки манипулятором на i -е дерево и его подтаскивание к месту раскряжевки, на расстояние $\Delta l_{ман i}$ и угол $\Delta \alpha_{ман i}$ от начальных положений, соответствующих координатам растущих деревьев X_i и Y_i и местам раскряжевки $x_{рас}$ и $y_{рас}$, соответственно, Дж;

\mathcal{E}_i^B — энергозатраты на валку i -го дерева с учетом его натяга, создания валочного момента и спиливания, Дж;

$\mathcal{E}_i^{o.c}$ — энергозатраты на обрезку сучьев с i -го дерева в месте раскряжевки с координатами $x_{рас}$ и $y_{рас}$, Дж;

$\mathcal{E}_{j_{лм}}^{рк}$ — энергозатраты на раскряжевку i -го дерева на $n_{лм}$ -е количество лесоматериалов длиной $l_{j_{лм}}$ каждый и диаметром ствола в месте пропила, рассчитанным по зависимости (2), Дж.

Время выполнения операций в технологическом цикле работы форвардера определяется зависимостью

$$T_{Ф} = \left(T_{xx}^{Ф} + T_{рх}^{Ф} + T_{пер}^{Ф} \left(\frac{L_{пер}^{Ф}}{l_{пер}^X} - 1 \right) + \sum_{k_{г.с}=1}^{n_{г.с}} T_{k_{г.с}}^{п} n_{к_{г.с}}^{п} + \sum_{k_{г.с}=1}^{n_{г.с}} T_{k_{г.с}}^{P} n_{к_{г.с}}^{P} \right) n_{г.с}^{Ф} \quad (3)$$

где $T_{Ф}$ — время выполнения технологических операций форвардером, с;

$T_{xx}^{Ф}$ — время передвижения порожнего форвардера на среднем расстоянии вывозки $L_{дв}^{Ф} / 2n_{тц}^{Ф}$, с;

$T_{рх}^{Ф}$ — время передвижения груженого форвардера на среднем расстоянии вывозки $L_{дв}^{Ф} / 2n_{тц}^{Ф}$, с;

$T_{пер}^{Ф}$ — время передвижения форвардера при наборе пачки на расстояние $L_{пер}^{Ф}$, с;

$T_{k_{г.с}}^{п}$ — время погрузки одной пачки лесоматериалов $k_{г.с}$ -й группы сортировки, при начальном вылете манипулятора $l_{i_{г.с}}^{ФП}$, с;

$T_{k_{г.с}}^{P}$ — время разгрузки одной пачки лесоматериалов $k_{г.с}$ -й группы сортировки из грузовой платформы форвардера в штабель при конечном вылете манипулятора $l_{i_{г.с}}^{ФП}$, с.

Время выполнения операций в технологическом цикле работы харвестера определяется зависимостью

$$T_X = T_{пер}^X n_{тс}^X + \sum_{i=1}^{n_{ств}} T_i^{нав} + \sum_{i=1}^{n_{ств}} T_i^{под} + \sum_{i=1}^{n_{ств}} T_i^B + \sum_{i=1}^{n_{ств}} T_i^{o.c} + \sum_{i=1}^{n_{ств}} \sum_{j_{лм}=1}^{n_{лм}} T_{j_{лм}}^{рк}, \quad (4)$$

где T_X — общие энергозатраты на выполнение технологических операций харвестером, Дж;

$T_{пер}^X$ — затраты времени на передвижение харвестера между технологическими стоянками при среднем расстоянии между ними $l_{пер}^X$, Дж;

$T_i^{нав}$, $T_i^{под}$ — затраты времени на наведение харвестерной головки манипулятором на i -е дерево и его подтаскивание к месту раскряжевки, на расстояние $\Delta l_{ман i}$ и угол $\Delta \alpha_{ман i}$ от начальных положений, соответствующих координатам растущих деревьев X_i и Y_i и местам раскряжевки $x_{рас}$ и $y_{рас}$, соответственно, Дж;

T_i^B — затраты времени на валку i -го дерева с учетом его натяга, создания валочного момента и спиливания, Дж;

$T_i^{o.c}$ — затраты времени на обрезку сучьев с i -го дерева в месте раскряжевки с координатами $x_{рас}$ и $y_{рас}$, Дж;

$T_{j_{лм}}^{рк}$ — затраты времени на раскряжевку i -го дерева на $n_{лм}$ -е количество лесоматериалов длиной $l_{j_{лм}}$ каждый и диаметром ствола в месте пропила рассчитанным по зависимости (2), Дж.

Важно учитывать, что операции технологического процесса реализуются харвестером и форвардером параллельно, с некоторым «смещением» по времени, продолжительности которых достаточно для формирования запаса лесоматериалов харвестером и соблюдения безопасного расстояния между машинами. С учетом указанных особенностей организации работы машин из выражений (3) и (4) выбирается максимальная величина.

Выводы

Таким образом, получена математическая модель технологического процесса совместной работы харвестера и форвардера. Она предоставляет данные о положениях харвестеров и форвардеров на лесосеках; координатах их технологических стоянок; путях, проходимых машинами на каждом этапе технологического цикла; положениях рабочих органов, путях их перемещения и задействованных при этом исполнительных механизмах манипуляторов харвестеров и форвардеров. Совместно с авторской математической моделью работы многооперационной лесозаготовительной машины или математическими моделями других авторов, она используется в целях обособленного анализа энергопотребления и производительности технологических операций, схематизации режимов работы машин, создании адаптивных систем управления, а в сочетании с методами конечно-элементного анализа — для оценки прочности и усталостной долговечности их конструкций. Результаты анализа по изложенной модели, также используются в практиках подбора существующих машин в лесозаготовительные комплексы, проектирования конструкций новых отечественных харвестеров и форвардеров, создания типажей многооперационных лесозаготовительных машин.

Список литературы

- [1] Курлович Д.М. Морфометрический ГИС-анализ рельефа Беларуси // Земля Беларуси, 2013. № 4. С. 42–48.
- [2] Соколовский И.В., Юренин А.В. Атлас морфологических признаков лесных почв Беларуси: справочное издание. Минск: Редакция журнала «Лесное и охотничье хозяйство», 2013. 136 с.
- [3] Почвы Республики Беларусь / под ред. В.В. Лапы. Минск: ИВЦ Минфина, 2019. 632 с.
- [4] Соколовский И.В. Почвоведение. Минск: Изд-во БГТУ, 2005. 330 с.
- [5] Мисуно Ю.И. Методика экспериментальных исследований по оценке эксплуатационно-экологической совместимости лесных машин с почвогрунтами // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов, 2021. № 1 (240). С. 132–140.
- [6] Атрошенко О.А. Лесная таксация. Минск: Изд-во БГТУ, 2009. 468 с.
- [7] Севко О.А. Ландшафтная таксация с основами парколесоустройства. Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2012. 107 с.
- [8] Справочник таксатора / под ред. В.С. Мирошникова. Минск: Ураджай, 1980. 360 с.
- [9] Таксационно-лесоустроительный справочник. Минск: Лесное и охотничье хозяйство, 2019. 335 с.
- [10] Машковский В.П. Усредненные ряды распределения диаметров стволов по естественным ступеням толщины с учетом категорий технической годности деревьев и методика их использования для товаризации расчетной лесосеки // Труды БГТУ, 2016. № 1. С. 9–13.
- [11] Суханов Ю.В., Селиверстов А.А., Соколов А.П., Сюнев В.С. Имитационное моделирование работы харвестера: алгоритмы и реализация // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки», 2012. № 8 (129). Т. 2. С. 49–51.
- [12] Рукомойников К.П., Сергеева Т.В., Гилязова Т.А., Царев Е.М., Анисимов П.Н. Имитационное моделирование технологического процесса заготовки древесины на примере лесного харвестера // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 3. С. 69–80. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-69-80
- [13] Долматов С.Н., Бабкина Т.С. Компьютерная симуляция в среде AnyLogic работы мобильной рубительной машины на лесосеке // Системы. Методы. Технологии, 2024. № 2(62). С. 95-102. DOI 10.18324/2077-5415-2024-2-95-102
- [14] Рукомойников К.П., Сергеева Т.В., Гилязова Т.А., Царев Е.М., Анисимов П.Н. Влияние состава древостоя на временной цикл работы харвестера // ИзВУЗ Лесной журнал, 2024. № 3. С. 153–165.
- [15] Заикин А.Н., Сиваков В.В., Зеликов В.А., Чуйков А.С., Новиков А.И., Стасюк В.В. Автоматизированное оперативное управление лесосечными работами: методологический анализ // Лесотехнический журнал, 2024. Т. 14. № 2 (54). С. 204–226.
- [16] Заикин А.Н., Сиваков В.В., Никитин В.В., Брионес А.А. Программное обеспечение в лесном хозяйстве и при лесозаготовках // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 4. С. 172–184. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-4-172-184
- [17] Черник К.Н., Федорченко И.С. Особенности использования машин манипуляторного типа для валки деревьев // Лесозаготовка и комплексное использование древесины: сб. статей Всерос. науч.-практ. конф., Красноярск, 10 марта 2021 г. Красноярск: Изд-во Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2021. С. 271–275.
- [18] Карпачев С.П., Быковский М.А., Лаптев А.В. Методика выбора манипулятора харвестера // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 1. С. 123–129. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-123-129
- [19] Панкратович А.С., Протас П.А. Методы оценки влияния размещения технологических элементов лесосеки на производительность форвардера // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов, 2022. № 2 (258). С. 130–136.
- [20] Татаренко А.П. Совершенствование конструкции лесопромышленных манипуляторов на основе тематического моделирования рабочих процессов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Воронеж, 2000. 20 с.
- [21] Арико С.Е. Обоснование параметров валочно-сучкорезно-раскряжевой машины для рубок промежуточного лесопользования: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Минск, 2012, 225 с.

- [22] Лагереv А.В., Макулина А.В., Лагереv И.А. Влияние конструктивных характеристик манипулятора харвестера на оптимальные размеры рабочей зоны // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2024. № 2. С. 111–123.
- [23] Ovaskainen H. Timber harvester operators' working technique in first thinning and the importance of cognitive abilities on work productivity // *Dissertationes Forestales*, 2009, v. 79, 62 p. DOI:10.14214/df.79
- [24] Коцан В.В. Продуктивность сосняков мшистых искусственного происхождения различной пространственной структуры в лесорастительных условиях Беларуси: автореф. дис. ... канд. с.-х.наук: 06.03.02. Минск, 2016, 22 с.
- [25] Севко О.А., Коцан В.В. Зависимость радиального прироста сосны и ели от изменения пространственной структуры сложного древостоя // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов, 2022. № 2 (258). С. 20–26.
- [26] Голякевич С.А., Гороновский А.Р., Коробкин В.А. Методика прогнозирования эффективности комплексов лесозаготовительных машин // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов, 2024. № 1 (276). С. 125–131. DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-17
- [27] Голякевич С.А., Гороновский А.Р. Математическая модель динамики манипуляторов многооперационных лесозаготовительных машин // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов, 2024. № 1 (276). С. 132–143. DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-18
- [28] Golyakevich S.A., Goronovsky A.R. Evaluation of Loading Dynamics of Fatigue Life for a Forwarder Half-Frame Articulation // *J. of Machinery Manufacture and Reability*, 2017, no. 5, pp. 463–471.
- [29] Богданов Д.С., Попикова А.В., Евсиков И.Д., Попиков С.К., Полумиско А.А. Кинематический и динамический анализ механизма подъема манипулятора сортиментовоза, оснащенного гидромеханическим демпфером, на основе методов Эйлера и Рунге-Кутты // Лесотехнический журнал, 2024. Т. 14. № 2 (54). С. 127–143.
- [30] Budnik P., Shegelman I., Baklagin V. Variability of forwarder truckload parameters in the Pryanha forestry division of the Republic of Karelia (Russia): A computer experiment // *Central European Forestry J.*, 2020, v. 66, no. 1, pp. 12–22. DOI 10.2478/forj-2019-0027
- [31] Рукомойников К.П., Купцова В.О. Обоснование норм расхода топлива многооперационных лесозаготовительных машин на примере харвестера // ИзВУЗ Лесной журнал, 2020. № 3. С. 117–127. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-117-127
- [32] Рукомойников К.П., Купцова В.О., Сергеева Т.В. Математическая модель расхода топлива форвардера «Амкодор-2682» при выполнении лесохозяйственных работ // ИзВУЗ Лесной журнал, 2020. № 6. С. 148–158. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-6-148-158
- [33] Голякевич С.А. Применение систем адаптивного управления для повышения реализации энергетического потенциала харвестерами // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов, 2017. № 2. С. 238–244.
- [34] Клубничкин Е.Е., Клубничкин В.Е., Федотов М.В. Расчет конструкции технологического модуля погрузочно-транспортной машины // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета, 2020. № 164. С. 141–153. DOI 10.21515/1990-4665-164-010
- [35] Герман А.А., Голякевич С.А., Мохов С.П. Текущее состояние и перспективы развития модельного ряда и конструкций лесопромышленных машин Амкодор // Лесозаготовительное производство: проблемы и решения: Материалы II Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 13–15 мая 2020 года. Минск: Изд-во БГТУ, 2021. С. 9–14.

Сведения об авторе

Голякевич Сергей Александрович — канд. техн. наук, доцент, Белорусский государственный технологический университет, gsa@belstu.by

Поступила в редакцию 08.04.2025.

Одобрено после рецензирования 30.10.2025.

Принята к публикации 21.01.2026.

MATH MODEL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF WOOD RAW MATERIAL HARVESTING BY «HARVESTER + FORWARDER» MACHINE COMPLEXES

S.A. Golyakevich

Belarusian State Technological University, 13 a, Sverdlova st., 220006, Minsk, Republic of Belarus

gsa@belstu.by

The article presents a mathematical description of the analytical model of interaction of multi-operational logging machines when they realize typical technological processes of timber harvesting. The model is based on analytical dependencies that determine the position of harvesters and forwarders on the logging sites, the coordinates of their technological stands, the paths traveled by the machines at each stage of the technological cycle, the positions of working bodies, the paths of their movement and the manipulator actuators involved. For the harvester, the accessibility of trees from one technological parking lot was estimated, taking into account the size of the manipulator working area, the presence or absence of technological corridors, the coordinates of bucking places, etc. The study was carried out for three typical harvesting machines. Studies were conducted for three typical variants of timber arrangement after harvester operation: along the technological corridor, across the corridor and leaving felling residues on it, across the corridor and leaving felling residues next to it. Interrelations between the technological process of harvester operation and the formation of future conditions of forwarder operation are analytically obtained. The concentration of timber in the harvesting area, the number of sorting groups, the size, remoteness and direction of their stacking relative to the technological corridor are taken into account.

Keywords: harvester, forwarder, operation, methodology, efficiency, machine complex, technology, operation, conditions, sorting, loading, felling, bucking

Suggested citation: Golyakevich S.A. *Matematicheskaya model' tekhnologicheskikh protsessov zagotovki drevesnogo syr'ya kompleksom mashin «kharvester + forwarder»* [Math model of technological processes of wood raw material harvesting by «harvester + forwarder» machine complexes]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2026, vol. 30, no. 2, pp. 113–126. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-2-113-126

References

- [1] Kurlovich D.M. *Morfometricheskiy GIS-analiz rel'efa Belarusi* [Morphometric GIS Analysis of the Relief of Belarus]. *Zemlya Belarusi* [Land of Belarus], 2013, no. 4, pp. 42–48.
- [2] Sokolovskiy I.V., Yurenya A.V. *Atlas morfologicheskikh priznakov lesnykh pochv Belarusi: spravochnoe izdanie* [Atlas of Morphological Features of Forest Soils of Belarus: Reference Publication]. Minsk: Editorial Board of the Journal «Forestry and Hunting», 2013, 136 p.
- [3] *Pochvy Respubliki Belarus'* [Soils of the Republic of Belarus]. Ed. V.V. Lapa. Minsk: Information and Central Center of the Ministry of Finance, 2019, 632 p.
- [4] Sokolovskiy I.V. *Pochvovedenie* [Soil Science]. Minsk: BSTU, 2005, 330 p.
- [5] Misuno Yu.I. *Metodika eksperimental'nykh issledovaniy po otsenke ekspluatatsionno-ekologicheskoy sovместимости lesnykh mashin s pochvogruntami* [Methodology of experimental studies to assess the operational and environmental compatibility of forestry machines with soils]. *Trudy BGTU. Ser. 1, Lesnoe khoz-vo, prirodopol'zovanie i pererab. vozobnovlyaemykh resursov* [Proceedings of BSTU. Series 1, Forestry, Nature Management and Processing of Renewable Resources], 2021, no. 1 (240), pp. 132–140.
- [6] Atroshchenko O.A. *Lesnaya taksatsiya* [Forest Inventory]. Minsk: BSTU, 2009, 468 p.
- [7] Sevko O.A. *Landshaftnaya taksatsiya s osnovami parkolesoustroystva* [Landscape Inventory with the Basics of Park and Forest Management]. Minsk: Belarusian State Technological University, 2012, 107 p.
- [8] *Spravochnik taksatora* [Taxator's Handbook]. Ed. by V. S. Miroshnikov. Minsk: Urajai, 1980, 360 p.
- [9] *Taksatsionno-lesoustroitel'nyy spravochnik* [Taxation and Forest Management Handbook]. Minsk: Forestry and Hunting, 2019, 335 p.
- [10] Mashkovskiy V.P. *Usrednennyye ryady raspredeleniya diametrov stvolov po estestvennym stupenyam tolshchiny s uchetom kategoriy tekhnicheskoy godnosti derev'ev i metodika ikh ispol'zovaniya dlya tovarizatsii raschetnoy lesoseki* [Averaged Series of Trunk Diameter Distribution by Natural Thickness Grades Taking into Account the Categories of Technical Suitability of Trees and the Methodology of Their Use for the Commodification of the Estimated Cut]. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 1, pp. 9–13.
- [11] Sukhanov Yu.V., Seliverstov A.A., Sokolov A.P., Syuney V.S. *Imitatsionnoe modelirovanie raboty kharvestera: algoritmy i realizatsiya* [Simulation Modeling of Harvester Operation: Algorithms and Implementation]. *Uchenye zapiski*

- Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. «Estestvennye i tekhnicheskie nauki» [Scientific Notes of Petrozavodsk State University. Series: Natural and Technical Sciences], 2012, no. 8 (129), v. 2, pp. 49–51.
- [12] Rukomoynikov K.P., Sergeeva T.V., Gilyazova T.A., Tsarev E.M., Anisimov P.N. *Imitatsionnoe modelirovanie tekhnologicheskogo protsessa zagotovki drevesiny na primere lesnogo kharvestera* [Modeling operation of forest harvester in AnyLogic simulation system]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 3, pp. 69–80. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-69-80
- [13] Dolmatov S.N., Babkina T.S. *Komp'yuternaya simulyatsiya v srede AnyLogic raboty mobil'noy rubitel'noy mashiny na lesoseke* [Computer simulation in the AnyLogic environment of a mobile chipping machine operation in a logging site]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2024, no. 2(62), pp. 95–102. DOI 10.18324/2077-5415-2024-2-95-102
- [14] Rukomoynikov K.P., Sergeeva T.V., Gilyazova T.A., Tsarev E.M., Anisimov P.N. *Vliyanie sostava drevostoya na vremennoy tsikl raboty kharvestera* [Influence of the composition of the forest stand on the time cycle of the harvester]. *Russian Forestry J.*, 2024, no. 3, pp. 153–165.
- [15] Zaikin A.N., Sivakov V.V., Zelikov V.A., Chuykov A.S., Novikov A.I., Stasyuk V.V. *Avtomatizirovannoe operativnoe upravlenie lesosechnymi robotami: metodologicheskii analiz* [Automated operational management of logging operations: a methodological analysis]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Journal], 2024, v. 14, no. 2 (54), pp. 204–226.
- [16] Zaikin A.N., Sivakov V.V., Nikitin V.V., Briones A.A. *Programmnnoe obespechenie v lesnom khozyaystve i pri lesozagotovkakh* [Software in forestry and logging]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 4, pp. 172–184. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-4-172-184
- [17] Chernik K.N., Fedorchenko I.S. *Osobennosti ispol'zovaniya mashin manipulyatornogo tipa dlya valki derev'ev* [Features of using manipulator-type machines for felling trees]. *Lesoekspluatatsiya i kompleksnoe ispol'zovanie drevesiny: sb. statey Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Forest exploitation and integrated use of wood: collection of articles from the All-Russian scientific and practical conference], Krasnoyarsk, March 10, 2021. Krasnoyarsk: Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev, 2021, pp. 271–275.
- [18] Karpachev S.P., Bykovskiy M.A., Laptev A.V. *Metodika vybora manipulyatora kharvestera* [Method of selecting a harvester manipulator]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 1, pp. 123–129.
- [19] Pankratovich A.S., Protas P.A. *Metody otsenki vliyaniya razmeshcheniya tekhnologicheskikh elementov lesoseki na proizvoditel'nost' forvardera* [Methods for assessing the impact of the placement of technological elements of a logging site on forwarder productivity]. *Trudy BGTU. Ser. 1, Lesnoe khoz-vo, prirodopol'zovanie i pererab. vobnovlyaemykh resursov* [Proceedings of BSTU. Series 1, Forestry, Nature Management and Processing of Renewable Resources], 2022, no. 2 (258), pp. 130–136.
- [20] Tatarenko A.P. *Sovershenstvovanie konstruksii lesopromyshlennykh manipulyatorov na osnove matematicheskogo modelirovaniya rabochikh protsessov* [Improving the Design of Forestry Manipulators Based on Mathematical Modeling of Work Processes]. *Abstract Dis. Cand. Sci. (Tech.) 05.21.01. Voronezh*, 2000, 20 p.
- [21] Ariko S.E. *Obosnovanie parametrov valочно-suchkorezno-raskryzhevochnoy mashiny dlya rubok promezhutochnogo lesopol'zovaniya* [Justification of the Parameters of a Felling-Delimiting-Crossing Machine for Intermediate Forest Use]. *Dis. Cand. Sci. (Tech.) 05.21.01. Minsk*, 2012, 225 p.
- [22] Lagerev A.V., Makulina A.V., Lagerev I.A. *Vliyanie konstruktivnykh kharakteristik manipulyatora kharvestera na optimal'nye razmery rabochey zony* [Influence of the Design Characteristics of a Harvester Manipulator on the Optimal Dimensions of the Working Area]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Scientific and Technical Bulletin of Bryansk State University], 2024, no. 2, pp. 111–123.
- [23] Ovaskainen H. *Timber harvester operators' working technique in first thinning and the importance of cognitive abilities on work productivity*. *Dissertationes Forestales*, 2009, v. 79, 62 p. DOI:10.14214/df.79
- [24] Kotsan V.V. *Produktivnost' sosnyakov mshistykh iskusstvennogo proiskhozhdeniya razlichnoy prostranstvennoy struktury v lesorastitel'nykh usloviyakh Belarusi* [Productivity of artificial mossy pine forests of different spatial structure in forest growth conditions of Belarus]. *Abstract Dis. Cand. Sci. (Agric.) 06.03.02. Minsk*, 2016, 22 p.
- [25] Sevko O.A., Kotsan V.V. *Zavisimost' radial'nogo prirosta sosny i eli ot izmeneniya prostranstvennoy struktury slozhnogo drevostoya* [Dependence of radial increment of pine and spruce on changes in the spatial structure of a complex forest stand]. *Trudy BGTU. Ser. 1, Lesnoe khoz-vo, prirodopol'zovanie i pererabotka vobnovlyaemykh resursov* [Proceedings of BSTU. Series 1, Forestry, Nature Management and Processing. Renewable Resources], 2022, no. 2 (258), pp. 20–26.
- [26] Golyakevich S.A., Goronovskiy A.R., Korobkin V.A. *Metodika prognozirovaniya effektivnosti kompleksov lesozagotovitel'nykh mashin* [Methodology for forecasting the efficiency of logging machine complexes]. *Trudy BGTU. Ser. 1, Lesnoe khoz-vo, prirodopol'zovanie i pererabotka vobnovlyaemykh resursov* [Proceedings of BSTU. Series 1, Forestry, Nature Management and Processing of Renewable Resources], 2024, no. 1 (276), pp. 125–131. DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-17
- [27] Golyakevich S.A., Goronovskiy A.R. *Matematicheskaya model' dinamiki manipulyatorov mnogooperatsionnykh lesozagotovitel'nykh mashin* [Mathematical model of the dynamics of manipulators of multi-functional logging machines]. *Trudy BGTU. Ser. 1, Lesnoe khoz-vo, prirodopol'zovanie i pererabotka vobnovlyaemykh resursov* [Proceedings of BSTU. Series 1, Forestry, Nature Management and Processing of Renewable Resources], 2024, no. 1 (276), pp. 132–143. DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-18
- [28] Golyakevich S.A., Goronovsky A.R. *Evaluation of Loading Dynamics of Fatigue Life for a Forwarder Half-Frame Articulation. J. of Machinery Manufacture and Reability*, 2017, no. 5, pp. 463–471.
- [29] Bogdanov D.S., Popikova A.V., Evsikov I.D., Popikov S.K., Polumisko A.A. *Kinematicheskii i dinamicheskii analiz mekhanizma pod'ema manipulyatora sortimentovoza, osnashchennogo gidromekhanicheskim dempferom, na osnove metodov Eylera i Runge-Kutty* [Kinematic and Dynamic Analysis of the Timber Truck Manipulator Lifting Mechanism Equipped with a Hydromechanical Damper Based on the Euler and Runge-Kutta Methods]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Lesotekhnicheskii Zhurnal], 2024, v. 14, no. 2 (54), pp. 127–143.

- [30] Budnik P., Shegelman I., Baklagin V. Variability of forwarder truckload parameters in the Pryazha forestry division of the Republic of Karelia (Russia): A computer experiment. *Central European Forestry J.*, 2020, v. 66, no. 1, pp. 12–22. DOI 10.2478/forj-2019-0027
- [31] Rukomoynikov K.P., Kuptsova V.O. *Obosnovanie norm raskhoda topliva mnogooperatsionnykh lesozagotovitel'nykh mashin na primere kharvestera* [Justification of fuel consumption standards for multi-functional logging machines using the example of a harvester]. *Russian Forestry J.*, 2020, no. 3, pp. 117–127. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-117-127
- [32] Rukomoynikov K.P., Kuptsova V.O., Sergeeva T.V. *Matematicheskaya model' raskhoda topliva forvardera «Amkodor-2682» pri vypolnenii lesokhozyaystvennykh rabot* [Mathematical model of fuel consumption of the Amkodor-2682 forwarder during forestry operations]. *Russian Lesnoy J.*, 2020, no. 6, pp. 148–158. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-6-148-158
- [33] Golyakevich S.A. *Primenenie sistem adaptivnogo upravleniya dlya povysheniya realizatsii energeticheskogo potentsiala kharvesterami* [Application of adaptive control systems to improve the implementation of the energy potential of harvesters]. *Trudy BGTU. Ser. I, Lesnoe khoz-vo, prirodopol'zovanie i pererab. vozobnovlyaemykh resursov* [Proceedings of BSTU. Series I, Forestry, Nature Management and Processing. Renewable Resources], 2017, no. 2, pp. 238–244.
- [34] Klubnichkin E.E., Klubnichkin V.E., Fedotov M.V. *Raschet konstruksii tekhnologicheskogo modulya pogruchno-transportnoy mashiny* [Calculation of the Design of the Technological Module of a Loading and Transport Machine]. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Polythematic Online Electronic Scientific J. of Kuban State Agrarian University], 2020, no. 164, pp. 141–153. DOI 10.21515/1990-4665-164-010
- [35] German A.A., Golyakevich S.A., Mokhov S.P. *Tekushchee sostoyanie i perspektivy razvitiya model'nogo ryada i konstruksiy lesopromyshlennykh mashin Amkodor* [Current State and Prospects for the Development of the Model Range and Designs of Amkodor Forestry Machines]. *Lesozagotovitel'noe proizvodstvo: problemy i resheniya: materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Logging Production: Problems and Solutions: Proceedings of the II International Scientific and Technical Conference], Minsk, May 13–15, 2020. Minsk: Belarusian State Technological University, 2021, pp. 9–14.

Author's information

Golyakevich Sergey Aleksandrovich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Belarusian State Technological University, gsa@belstu.by

Received 08.04.2025.

Approved after review 30.10.2025.

Accepted for publication 21.01.2026.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ УЧЕТА КРУГЛЫХ ЛЕСОМАТЕРИАЛОВ ДЛЯ УДАЛЕННЫХ ЛЕСНЫХ ТЕРМИНАЛОВ

П.Н. Перфильев¹✉, И.В. Григорьев², О.В. Мурашова¹,
Н.О. Задраускайте¹, М.Г. Перфильева¹

¹ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ),
Россия, 163002, г. Архангельск, Набережная Северной Двины, д. 17

²ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет» (АГАТУ), Россия, 677007,
Республика Саха (Якутия), г. Якутск, шоссе Сергеляхское, 3 км, д. 3

p.perfilev@narfu.ru

Рассмотрено современное состояние лесопромышленного комплекса России, определены проблемы освоения расчетной лесосеки в условиях низкой плотности дорожной сети. Показано, что одним из перспективных направлений повышения эффективности лесопользования является внедрение технологий сезонной заготовки и переработки древесины на удаленных лесных терминалах с использованием водного транспорта. Обоснована необходимость точного и оперативного учета круглых лесоматериалов для объективной оценки объемов выполненных работ и сырья на узловых операциях терминалов. Проанализированы существующие методы измерения объема древесины, включая традиционные геометрические способы (поштучный учет по ГОСТ, методы Губера, Смалиана, усеченного конуса, методы верхнего диаметра), а также современные цифровые решения на базе компьютерного зрения, нейронных сетей и аэрофотосъемки (лазерное сканирование, сервисы на основе работы квадрокоптеров). Приведены результаты экспериментального исследования, выполненного на базе предприятий Архангельской области: ООО «Регион-лес» и ЗАО «Лесозавод 25». Установлены расхождения в значениях объема, полученных разными методами, и выявлена тенденция их увеличения с ростом диаметра сортиментов. С использованием F-теста проведена оценка адекватности методов относительно ГОСТ 2708–75. Предложено эмпирическое уравнение регрессии для определения объема бревна по верхнему диаметру, позволяющее повысить точность учета. Определено, что предложенная модель наиболее адекватно описывает результаты, полученные методом концевых сечений (Смалиана) и способом усеченного конуса. Рекомендовано учитывать выявленные особенности при выборе методов учета для автоматизации процессов на удаленных лесных терминалах.

Ключевые слова: учет, удаленный лесной терминал, круглые лесоматериалы, штабель, квадрокоптер

Ссылка для цитирования: Перфильев П.Н., Григорьев И.В., Мурашова О.В., Задраускайте Н.О., Перфильева М.Г. Анализ методов учета круглых лесоматериалов для удаленных лесных терминалов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2026. Т. 30. № 2. С. 127–139. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-2-127-139

Российская Федерация обладает значительными лесными ресурсами. Общая площадь лесов составляет около 800 млн га с запасами древесины около 112 млрд м³. Средний годовой прирост оценивается примерно в 990 млн м³, а расчетная лесосека составляет 730 млн м³.

С каждым годом лесопромышленный комплекс РФ активно развивается путем внедрения современных технологий и инноваций в процесс заготовки и переработки древесины, использования современного многооперационного оборудования, проведения научных исследований, а также с помощью дополнительных инвестиций, поступающих в лесную отрасль [1, 2].

В течение многих десятилетий лесной комплекс играет важную роль в экономике Архангельской области. В регионе функционируют крупнейшие лесопромышленные холдинги — ООО ПКП «Титан», АО «Группа «Илим», ПАО «Сегежа Групп», ООО «ГК «УЛК», ООО «Регион-лес», АО «Архангельский фанерный завод». Данные предприятия обладают крупнейшими мощностями в сфере механической и химической переработки древесины и обеспечивают полный цикл по производству и получению различной продукции из древесного сырья [3]. Кроме того, они формируют свыше 70 % объема заготовки древесины, около 80 % производства пиломатериалов, 100 % целлюлозно-бумажной продукции. За ними закреплено более 60 % расчетной лесосеки арендованных участков лесного фонда.

Благодаря своему высокому качеству продукция экспортируется на постоянной основе в 80 стран мира.

Лесопромышленные предприятия Архангельской области обеспечивают 26 % производства российских объемов целлюлозы, 8 % пиломатериалов, 29 % топливных гранул [4], что свидетельствует о значительном потенциале Архангельской области в частности и страны в целом в сферах лесозаготовок и деревообработки.

По данным на 2023 г., объем заготовки круглых лесоматериалов составляет всего около 190 млн м³. Следовательно, расчетная лесосека в стране осваивается менее чем на 30 %. Это обусловлено некоторыми факторами, в том числе низкой плотностью дорожной сети в лесоресурсных субъектах РФ, что затрудняет заготовку и вывозку древесины, особенно в отдаленных и труднодоступных районах [5]. Поскольку во многих регионах заготовлена практически вся экономически доступная древесина (лесфонд расположен в пределах доступности дорожной сети), лесозаготовительные предприятия оказываются перед выбором: строить новые дороги или искать альтернативные пути решения проблемы доступности удаленных от транспортной сети участков леса.

Для повышения эффективности освоения расчетной лесосеки предлагается использовать современные технологии сезонной заготовки и переработки древесины на удаленных лесных терминалах. Доставку машин и оборудования, а также персонала и вывозку готовой продукции можно осуществлять с помощью водного транспорта (на баржах). В случае большой удаленности лесного терминала предлагается организовать переработку древесины на месте [6]. Использование современных технологий позволяет оптимизировать процесс заготовки и переработки древесины, снизить затраты на транспортировку и повысить эффективность использования лесных ресурсов. Кроме того, такой подход способствует развитию водного транспорта и смежных отраслей экономики.

В условиях рыночных отношений и при высокой ценности древесины, а также в связи с постоянным развитием лесопиления и повышением эффективности использования древесных ресурсов появляется необходимость организации правильного и точного учета древесины, особенно для технологий ее заготовки на удаленных лесных терминалах. Однако есть проблема объективной оценки объема и качества круглых лесоматериалов, в результате чего могут возникнуть разногласия между этапами заготовки и переработки на терминале. Слож-

ность учета круглых лесоматериалов состоит также в необходимости многократной регистрации объема перемещаемой древесины, в целях измерения объема выполненной работы на узловых операциях лесозаготовительного процесса [7].

Для учета круглых лесоматериалов известны различные методы измерения их объема, однако, по мнению экспертов в этой области, многие из них не отвечают современным требованиям и недостаточно эффективны. Вследствие этого в настоящее время проводится активный поиск экономически доступных способов учета круглых лесоматериалов, использование которых позволит достаточно быстро, объективно и максимально точно определить объем древесного сырья [8].

Цель работы

Цель работы — анализ методов учета круглых лесоматериалов для заготовки и переработки древесины на удаленных лесных терминалах.

Материалы и методы

Первоначально в ходе исследования было изучено состояние вопроса, проанализированы применяемые в России методы учета древесины [9, 10], а также основные зарубежные методы учета круглых лесоматериалов, разработанные в Японии, Китае, Канаде (метод концевых сечений), Скандинавских странах (секционный, вписанного цилиндра, верхнего диаметра и нормального сбегга, табличный, полного ящика, весовой) [11–14]. Кроме того, выполнен анализ методов учета древесины, базирующихся на технологиях компьютерного зрения и нейронных сетях. Развитие таких цифровых технологий, как съемка с дронов, лазерное сканирование, дистанционное зондирование лесов и их широкое применение в лесоустройстве, по мнению авторов, в самое ближайшее время сможет повысить точность и полноту информации о лесах, сделать ее более доступной, что является важным аспектом в технологиях заготовки и переработки древесины на удаленных лесных терминалах [15, 16]. В настоящее время в Финляндии создан специализированный сервис forestscanner (форестсканер) [17], который используется для определения объема круглых лесоматериалов в штабеле с помощью квадрокоптера. Такое цифровое решение позволяет автоматизировать процесс учета древесины, упростить планирование и контроль заготовки древесины на основе данных, полученных с



Рис. 1. Комплекс аэрофотосъемки: *а* — дрон; *б* — GPS-приемник
Fig. 1. Aerial photography system: *a* — drone; *b* — GPS receiver



Рис. 2. Расположение точек для записи координат
Fig. 2. Location of coordinate recording points

дронов. С помощью квадрокоптера проводится аэрофотосъемка, данные загружаются на сервер и обрабатываются. С помощью дронов осуществляются таксационные мероприятия, дается оценка объема рубок. Для работы используются алгоритмы искусственного интеллекта (ИИ). На квадрокоптер дополнительно устанавливаются ГНСС-модули и на месте производится монтаж высокоточного GPS-приемника (рис. 1), который предназначен для более точного считывания координат квадрокоптером и записи их на карте памяти для последующей постройки 3D-модели изучаемого объекта.

С помощью специализированного программного обеспечения программируется траектория полета дрона, выставляются границы измерений. Для примера представлено расположение точек для измерения штабеля круглых лесоматериалов (рис. 2).

Для постройки 3D-модели объекта используются специальные алгоритмы. 3D-модель позволяет определить геометрический объем

штабеля. Для перехода от складочного объема к плотному рассчитывают коэффициент полндревесности [18]. Для этого используют замкнутую в квадрат площадь 1 м² металлическую линейку (рис. 3). Представленный способ позволяет получать высокоточные трехмерные модели штабелей для анализа информации об их объемах, а также оценивать коэффициенты полндревесности для перехода от складочного объема к плотному.

Подобные системы для определения объема древесины в штабелях круглых лесоматериалов начали внедрять и в России. Примером могут служить технологии, разрабатываемые специалистами ООО «Пермская целлюлозно-бумажная компания». Компания осваивает методику учета и прогнозирования лесных ресурсов и внедряет технологии цифровых двойников в лесопромышленном комплексе.

Развитие цифровых технологий дает возможность обеспечить более точный внутренний контроль процессов лесопользования на



Рис. 3. Определение коэффициента полндревесности
Fig. 3. Determining the timber density coefficient

уровне региональных органов управления лесами и предприятий. Это касается автоматизированного контроля правильности внесения данных. Внедрение цифровых технологий сдерживает прежде всего малый срок планирования лесохозяйственной деятельности арендаторов и, как следствие, нежелание инвестировать в цифровую трансформацию производственной деятельности, а также частая смена законодательной базы в лесопромышленной сфере, большой объем необходимых экономических затрат на внедрение таких технологий, незрелый рынок консалтинговых услуг и другие проблемы.

Результаты и обсуждение

В ходе изучения состояния вопроса были проанализированы научные работы, направленные на совершенствование методов учета древесины и разработку технологий использования удаленных лесных терминалов. Среди рассмотренных научных трудов работ следует отметить диссертацию [19], в которой проанализированы факторы, влияющие на определение объема бревен с применением радиочастотного метода, и предлагается внедрение этого метода для измерения круглых лесоматериалов. Для этого в работе [19] выявлены факторы, влияющие на прохождение радиочастотного сигнала через древесину, в частности: порода, влажность и диаметр лесоматериалов. Кроме того, в этой работе приведена необходимая лабораторная установка для проведения исследований и разработана методика выполнения экспериментов. Анализ полученных данных выявил закономерности влияния перечисленных факторов на параметры радиочастотного

сигнала, используемого для определения объема древесины. В результате выполненных работ сделаны основные выводы о нерешенной проблеме использования радиочастотного и необходимости более детальной проработки данного вопроса.

Большой интерес представляет научная работа [20], в которой автор предлагает методику и научное обоснование параметров измерения объема лесоматериалов с использованием пневмометрического метода. Вместе с тем следует отметить работу [21], в которой рассматривается проблема эффективности приемки пиловочного сырья, поступающего железнодорожным транспортом на деревоперерабатывающее предприятие ЗАО «Лесозавод 25». Для совершенствования логистической системы на предприятии и сокращения издержек в работе предложена и экономически обоснована необходимость установки линии сортировки круглых лесоматериалов на пункте выгрузки пиловочного сырья из железнодорожных вагонов. Подобное решение позволит уменьшить общие трудозатраты при приемке лесоматериалов путем прекращения перевозок автотранспортом неликвидного пиловочного сырья на ЗАО «Лесозавод» 25.

Исследования в области разработки и внедрения технологий использования лесных терминалов в сезонных заготовках продолжают проводить многие ученые, в частности, проф. С.А. Угрюмов, проф. О.А. Куницкая, доц. Д.А. Ильющенко, доц. В.М. Меркелова, доц. А.Н. Заикин [22, 23]. Особого внимания заслуживает научная работа [24]. В ней описано повышение эффективности вывозки заготовленной древесины и древесной биомассы за счет внедрения на терминалах промежуточных складов, на которых можно проводить не только перегрузочные операции, но и частично технологические процессы переработки древесины, позволяющие значительно повысить производительность труда и переработать лесосечные отходы. Кроме того, в данной статье представлены типы терминалов по их функциональному назначению.

Важным для исследования является научный труд [25], в котором авторы представляют технологию полной переработки древесины непосредственно на лесосеке с применением мобильного оборудования. Предлагаемое оборудование отечественное и его использование позволит лесозаготовительным предприятиям уменьшить себестоимость готовой продукции за счет полного цикла деревопереработки на делянке или лесном терминале. В работе проведены соответствующие расчеты и сделаны выводы.



Рис. 4. Раскатка бревен
Fig. 4. Log rolling

Отдельно стоит отметить научную работу [26]. В ней авторы описывают различные методы получения электроэнергии на удаленных лесных терминалах. Наряду с этим внимание уделено комплексному использованию отходов лесозаготовки и деревопереработки и получению на их основе электроэнергии, рассмотрены отечественные и зарубежные производители оборудования для генерации электроэнергии, представлено сравнение технических характеристик их продуктов.

На базе крупного лесопромышленного предприятия ООО «Регион-лес» проведено экспериментальное исследование, в ходе которого проанализированы применяемые методы учета объема круглых лесоматериалов. Предприятие представляет собой групповое объединение, осуществляющее полный комплекс работ по заготовке, переработке и транспортировке круглых лесоматериалов на территории Архангельской области.

Для анализа измерений объема круглых лесоматериалов использованы следующие методы [27–32]:

- способ учета по ГОСТ 2708–75 и ГОСТ 2292–88;
- способ усеченного конуса;
- способ верхнего диаметра и среднего сбега;
- способ концевых сечений (метод Смалиана);
- способ верхнего диаметра и нормального сбега;
- способ срединного сечения (метод Губера);
- шведский метод вписанного цилиндра;
- норвежский метод верхнего диаметра и нормального сбега.

Для проведения предварительного исследования проведена раскатка 20 бревен (рис. 4).

Измерение длины бревна выполнено с помощью рулетки, диаметра — мерной вилки. Технические характеристики измерительных приборов и способы измерения соответствуют ГОСТ 32594–2013 [32].

На каждом бревне проведены необходимые замеры длины и диаметра для определения объема бревна описанными выше методами. Для определения длины круглых лесоматериалов измерено наименьшее расстояние между двумя параллельными плоскостями, пересекающими бревно у каждого торца перпендикулярно его продольной оси. Диаметр измерен в долях сантиметра по длине перпендикуляра между двумя параллельными прямыми, касающимися окружности поперечного сечения бревна с противоположных сторон. Измерение диаметра на торцах проводилось без учета коры [32].

В результате проведенных экспериментальных измерений определен объем круглых лесоматериалов (рис. 5).

Анализ полученных данных свидетельствует о росте расхождений в результатах измерений, полученных различными методами учета, с увеличением объема круглых лесоматериалов. В ходе анализа экспериментальных данных выявлено, что шведский метод вписанного цилиндра занижает объем круглых лесоматериалов. Из рис. 5 видно, что способы срединного сечения, верхнего диаметра и среднего сбега, концевых сечений завышают объем древесины относительно среднего значения, при этом объем, определенный по этим методам, приблизительно равен. Объем древесины, определенный по ГОСТ 2708–75 и по способу верхнего

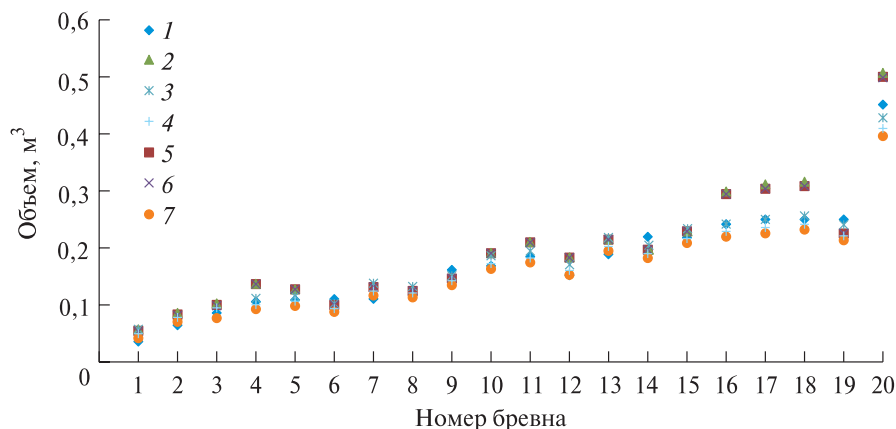


Рис. 5. Объем круглых лесоматериалов, определенных разными методами учета: 1 — способ поштучного учета лесоматериалов по ГОСТ 2708–75 и ГОСТ 2292–88; 2 — способ срединного сечения (метод Губера); 3 — способ концевых сечений (метод Смалиана); 4 — способ верхнего диаметра и среднего сбега; 5 — способ верхнего диаметра и нормального сбега; 6 — метод вписанного цилиндра (Швеция); 7 — метод верхнего диаметра и нормального сбега (Норвегия)

Fig. 5. Volume of round timber determined by different accounting methods: 1 — piece counting method according to GOST 2708–75 and GOST 2292–88; 2 — center section method (Huber method); 3 — end sections method (Smalian method); 4 — upper diameter and average taper method; 5 — upper diameter and normal taper method; 6 — inscribed cylinder method (Sweden); 7 — upper diameter and normal taper method (Norway)

диаметра и нормального сбега, имеет средние и приблизительно схожие значения по причине того, что в данных способах практически не учитывается индивидуальный сбеги лесоматериалов.

Для проверки адекватности результатов измеренного объема различными способами и методами [33, 34] проведен анализ с помощью критерия F -тест. Получены следующие расчетные значения критерия:

Способ срединного сечения (метод Губера)	0,78
Способ концевых сечений (метод Смалиана)	0,75
Способ верхнего диаметра и среднего сбега.....	0,78
Способ верхнего диаметра и нормального сбега.....	1,14
Метод вписанного цилиндра (Швеция).....	1,27

В качестве опорного принят способ учета лесоматериалов по ГОСТ 2708–75 [30].

Сравнение приведенных расчетных значений критерия с табличным ($F_{\text{табл}} = 6,39$) показывает, что, полученные результаты измерений объема лесоматериалов адекватны измерениям, проведенным с помощью опорного метода.

Для более глубокого анализа методики учета круглых лесоматериалов проведен основной цикл экспериментального исследования.

Для получения экспериментальных данных на предприятии ЗАО «Лесозавод 25» было отобрано 1000 круглых лесоматериалов различного диаметра (порода сосна) и проведены необходимые замеры диаметра и длины, а также проведен расчет объема круглых лесоматериалов с помощью приведенных выше методов.

Для наглядности рассчитанный объем круглых лесоматериалов в зависимости от диаметра сортимента представлен на рис. 6.

В качестве аппроксимирующей зависимости для описания связи между объемом бревна и его верхним диаметром было рассмотрено кубическое уравнение вида (1)

$$V = ad^3 + bd^2 + cd + k, \quad (1)$$

где V — объем бревна, м³;

d — верхний диаметр бревна, см;

a, b, c, k — эмпирические коэффициенты регрессионной модели.

Численные значения эмпирических коэффициентов определены с использованием программного комплекса Statistica. Статистическая обработка данных велась согласно методикам, изложенным в работах [33, 34] (рис. 7).

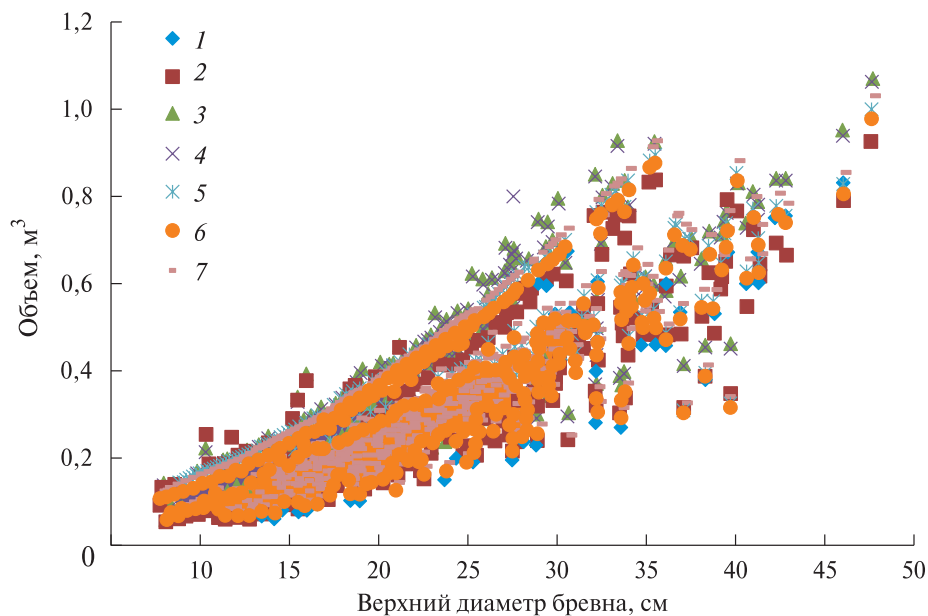


Рис. 6. Определения объема сортиментов: 1 — способ учета лесоматериалов по ГОСТ 2708–75 и ГОСТ 2292–88; 2 — способ срединного сечения (метод Губера); 3 — способ концевых сечений (метод Смалиана); 4 — способ усеченного конуса; 5 — способ верхнего диаметра и среднего сбега; 6 — способ верхнего диаметра и нормального сбега; 7 — метод верхнего диаметра и нормального сбега (Норвегия)

Fig. 6. Assortment volume counting: 1 — timber counting method according to GOST 2708–75 and GOST 2292–88; 2 — median section method (Huber method); 3 — end sections method (Smalian method); 4 — truncated cone method; 5 — upper diameter and average taper method; 6 — upper diameter and normal taper method; 7 — upper diameter and normal taper method (Norway)

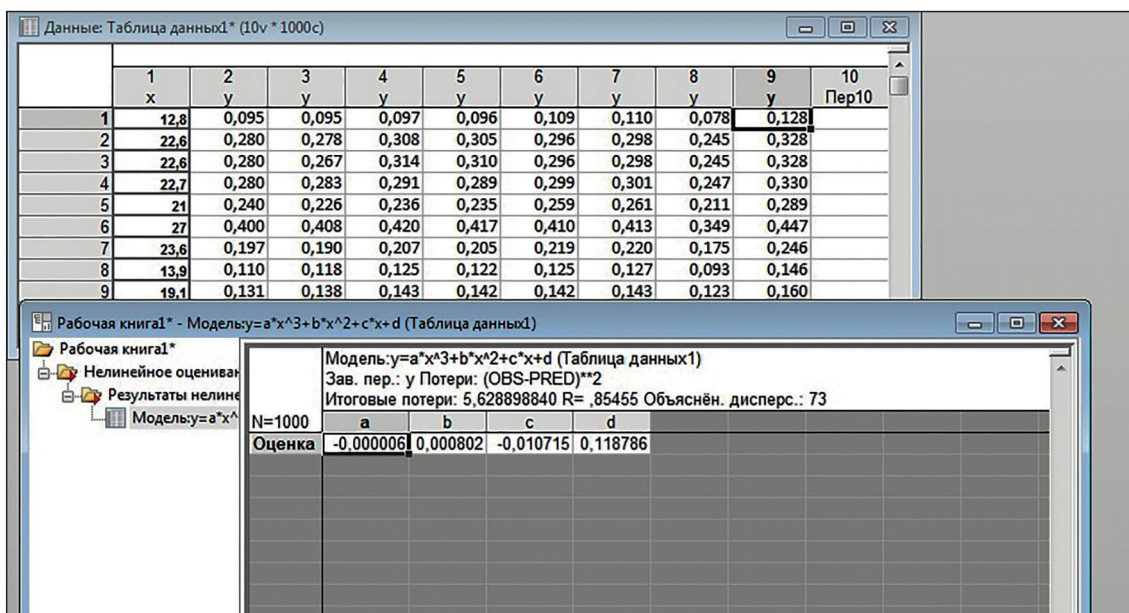


Рис. 7. Расчет эмпирических коэффициентов уравнения в программе Statistica
Fig. 7. Calculation of empirical coefficients of the equation by Statistica Program

Полученная математическая зависимость имеет вид

$$V = -0,000006d^3 + 0,000802d^2 - 0,0107d + 0,119. \quad (2)$$

По математической зависимости (2) для каждого бревна рассчитан его объем, сопоставленный с другими методами учета с помощью *F*-теста. Получены следующие расчетные значения критерия:

Способ учета лесоматериалов по ГОСТ 2708–75 и ГОСТ 2292–88....	0,73
Способ срединного сечения (метод Губера).....	0,77
Способ концевых сечений (метод Смалиана).....	0,6
Способ усеченного конуса.....	0,61
Способ верхнего диаметра и среднего сбega.....	0,73
Способ верхнего диаметра и нормального сбega.....	0,72
Шведский метод вписанного цилиндра.....	0,89
Норвежский метод верхнего диаметра и нормального сбega.....	0,66

Сравнение приведенных расчетных значений критерия с табличным ($F_{\text{табл}} = 0,9$) показывает, что математическая зависимость (2) адекватно описывает экспериментальные данные.

Выводы

Согласно проведенному *F*-тесту, полученное уравнение наиболее адекватно описывает способ концевых сечений (метод Смалиана) и способ усеченного конуса.

С увеличением верхнего диаметра лесоматериалов увеличивается различие в показателях их объема, определенных разными методами и способами.

При использовании метода вписанного цилиндра (Швеция) наблюдаются частые занижения объема круглых лесоматериалов по сравнению с другими методами и способами, в то время как метод верхнего диаметра и нормального сбega (Норвегия) завышает показатели объема.

Список литературы

- [1] Grigorev I., Zyryanov M., Medvedev S., Mokhiev A., Egipko S., Perfiliev P., Savvateeva I. The experimental study of logging residue stock on logging sites following clear-cutting using a sorting machine system // International J. of Simulation and Process Modelling, 2023, no. 20(4), pp. 267–275.
- [2] Perfiliev P., Zdrauskaite N., Rybak G. Study of hydrodynamic resistance of a raft composed of the flat rafting units of various draft // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18(1.5), Vienna, Austria, 3–6 December 2018. Vienna, 2018, pp. 765–772.
- [3] Zdrauskaite N., Perfiliev P., Glavatskih N. Wood quality potential as a criterion for forest management // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18(3.2), Albena, Bulgaria, 2–8 July 2018. Albena, 2018, pp. 1045–1052.
- [4] Лесопромышленный комплекс Архангельской области. URL: <https://dvinland.ru/economics/lesprom> (дата обращения 19.09.2024).
- [5] Перфильев П.Н., Задраускайте Н.О., Посредников П.А. Анализ транспортной обеспеченности лесных массивов Российской Федерации // Инженерные задачи: проблемы и пути решения: Материалы V Всерос. (национальной) науч.-практ. конф. Высшей инженерной школы САФУ, посвященной десятилетию науки и технологий, Архангельск, 15–17 ноября 2023 г. Архангельск: Изд-во САФУ, 2024. С. 97–100.
- [6] Перфильев П.Н., Задраускайте Н.О., Посредников П.А. Обоснование системы машин для мобильного производства компонентов деревянных домов на удаленных лесных терминалах // Инженерные задачи: проблемы и пути решения: Материалы IV Всерос. (национальной) науч.-практ. конф. Высшей инженерной школы САФУ, Архангельск, 16–18 ноября 2022 г. Архангельск: Изд-во САФУ, 2022. С. 153–155.
- [7] Куницкая О.А., Беляев Н.Л. Обоснование необходимости повышения эффективности учета круглых лесоматериалов // Вестник АГАТУ, 2021. № 4 (4). С. 73–79.
- [8] Perfiliev P., Zdrauskaite N., Rudnaya N., Benderuk T. Efficiency improvement of wood use // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 19(3.2), Albena, Bulgaria, 30 June–6 July 2019. Albena, 2019, pp. 697–705.
- [9] Стариков А.В., Батурин К.В. Исследование и анализ методов учета заготовленной древесины в России и зарубежных странах // Лесотехнический журнал, 2015. Т. 5. № 4 (20). С. 103–114.
- [10] Шашков Д.А. Особенности учета круглых лесоматериалов в зарубежных странах // World Science: Problems and Innovations: XLV Междунар. науч.-практ. конф., Пенза, 30 августа 2020 г. Пенза: Наука и Просвещение, 2020. С. 56–58.
- [11] Janák K. Differences in volume of round timber caused by different determination methods // Drvnaindustrija, 2006, v. 56, pp. 165–170.
- [12] Knyaz V.A., Maksimov A.A. Photogrammetric technique for timber stack volume control // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Zurich, Switzerland, 2014, v. 40, pp. 157–162.
- [13] Korsmo H. Weight equations for determining biomass fractions of young hardwoods from natural regenerated stands // Scandinavian J. of Forest Research Stonia, 2014, pp. 289–294.
- [14] Picchi G., Kühmaier M., Marques J. Survival test of RFID UHF tags in timber harvesting operations // Croatian J. of Forest Engineering, 2015, v. 36, pp. 165–174.

- [15] Беляев Н.Л., Куницкая О.А., Вернер Н.Н., Тихонов Е.А., Алексеенко В.Г. Направления совершенствования учета круглых лесоматериалов и его нормативной базы для эффективного использования мобильных цифровых технологий // Системы. Методы. Технологии, 2023. №2 (58). С. 129–138.
- [16] Беляев Н.Л., Куницкая О.А. Современные технологии оптического группового учета круглых лесоматериалов // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: Материалы 86-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, науч. сотр. и аспирантов, Минск, 31 января–12 февраля 2022 г. Минск: Изд-во Белорусского государственного технологического университета, 2022. С. 50–53.
- [17] Forestscanner. Измерение леса дронами. URL: <https://www.forestscanner.net/> (дата обращения 09.11.2024).
- [18] Истомина А.А. Совершенствование системы учета круглых лесоматериалов // Ломоносовские научные чтения студентов, аспирантов и молодых ученых 2021: сборник материалов конф.: в 2 т. Архангельск: Изд-во САФУ, 2021. С. 240–244.
- [19] Морозова Е.С. Обоснование параметров, влияющих на определение объема бревен при использовании радиочастотного способа: маг. дис. 35.04.02 Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств, Екатеринбург, 2018, 80 с.
- [20] Бутаков С.В. Обоснование пневмометрического метода определения объемов лесоматериалов: дис. ... канд. техн. наук 05.21.05 Древесиноведение, технология и оборудование деревопереработки. Архангельск, 2008, 195 с.
- [21] Таразевич А.А. Совершенствование логистики лесоснабжения предприятий группы «Титан»: маг. дис. 35.04.02 Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств, Архангельск, 2019, 99 с.
- [22] Куницкая О.А., Помигуев А.В. Переработка древесины на мобильных линиях лесных терминалов // Вестник АГАТУ, 2021. № 3 (3). С. 82–99.
- [23] Kunicckaya O., Zyryanov M., Medvedev S., Mokhiev A., Spiridonova A., Perfiliev P., Teppoev A. Efficient Technologies for Harvesting and Reutilizing Logging Residues in Russia: A Sustainable Forestry Approach // Mathematical modelling of engineering problems, 2024, no. 11(3), pp. 745–753.
- [24] Локштанов Б.М., Орлов В.В., Ильюшенко Д.А., Угрюмов С.А. Терминалы на лесосеке и их функции // Научные исследования и разработки в области дизайна и технологий: Материалы Всерос. науч.-практ. конф., Кострома, 18–19 марта 2021 г. Кострома: Изд-во Костромского государственного университета, 2021. Ч. 1. С. 123–127.
- [25] Маркелов В.М., Заикин А.Н. Повышение эффективности переработки древесины при применении мобильных установок // Экономика и эффективность организации производства, 2016. № 24. С. 126–127.
- [26] Куницкая О.А., Помигуев А.В. Перспективы развития систем генерирования и преобразования электрической энергии для лесных терминалов // Лесоэксплуатация и комплексное использование древесины: Материалы Всерос. науч.-практ. конф., Красноярск, 10 марта 2021 г. Красноярск: Изд-во Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, 2021. С. 124–128.
- [27] Шашков Д.А. Пути повышения точности учета круглых лесоматериалов // Наука и просвещение: актуальные вопросы, достижения и инновации: сб. статей Междунар. науч.-практ. конф., Пенза, 28 февраля 2020 г. Пенза: Наука и Просвещение, 2020. С. 47–49.
- [28] Швецова В.В. Автоматизация геометрического метода учета круглых лесоматериалов // Повышение эффективности лесного комплекса. Материалы VI Всерос. нац. науч.-практ. конф., Петрозаводск, 22 мая 2020 г. Петрозаводск: Изд-во Петрозаводского государственного университета, 2020. С. 149–150.
- [29] Носов А.С., Главатских Н.С., Козлов К.В. Проблемы учета круглых лесоматериалов // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: Материалы XVIII Междунар. науч.-техн. конф. Вологда, 01 декабря 2020 г. Вологда: Изд-во Вологодского государственного университета, 2020. С. 239–241.
- [30] ГОСТ 2708–75 Лесоматериалы круглые. Таблицы объемов. М.: ИПК Издательство стандартов, 1999. 37 с.
- [31] ГОСТ 2292–88 Лесоматериалы круглые. Маркировка, сортировка, транспортирование, методы измерения и приемка. М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. 10 с.
- [32] ГОСТ 32594–2013 Лесоматериалы круглые. Методы измерений. М.: Стандартинформ, 2015. 39 с.
- [33] Стоноженко Л.В., Югов А.Н., Карминов В.Н., Иванов Н.Г. Применение MS Excel и Statistica for Windows для лесотаксационных вычислений и обработки экспериментальных данных методами математической статистики. М.: МГУЛ, 2012, 88 с.
- [34] Мурашова О.В., Суров Г.Я., Перфильев П.Н. Организация и методы научных исследований. Архангельск: Изд-во САФУ, 2018. 123 с.
- [35] Smart-timber – программное обеспечение для определения объема круглого леса. URL: <https://smart-timber.com/#rec175127477> (дата обращения 09.11.2024).
- [36] Logsize – приложение для измерения бревен. URL: <http://www.logsize.com/en/> (дата обращения 09.11.2024).
- [37] Timbeter – приложение для измерения круглого леса и работы с электронными данными. URL: <https://timbeter.com/> (дата обращения 09.11.2024).
- [38] Беляев Н.Л., Куницкая О.А. Сравнительный анализ инновационных технологий в области учета круглых лесоматериалов // Инновации в химико-лесном комплексе: тенденции и перспективы развития: Материалы Всерос. науч.-практ. конф. Красноярск, 06–07 июня 2022 г. Красноярск: Изд-во Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, 2022. С. 74–77.
- [39] Беляев Н.Л., Куницкая О.А. Измерения и учет круглых лесоматериалов: история и перспективы развития // Вестник АГАТУ, 2023. № 1 (9). С. 58–86.

Сведения об авторах

Перфильев Павел Николаевич✉ — канд. техн. наук, доцент, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), p.perfilev@narfu.ru

Григорьев Игорь Владиславович — д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», silver73@inbox.ru

Мурашова Ольга Валерьевна — канд. техн. наук, доцент, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), o.murashova@narfu.ru

Задраускайте Наталья Олеговна — канд. техн. наук, доцент, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), n.zadrauskaite@narfu.ru

Перфильева Марина Геннадьевна — магистрант, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), m.perfileva@narfu.ru

Поступила в редакцию 24.02.2025.

Одобрено после рецензирования 27.10.2025.

Принята к публикации 18.02.2026.

ANALYSIS OF ROUND WOOD ACCOUNTING METHODS FOR REMOTE TIMBER TERMINALS

**P.N. Perfil'ev¹✉, I.V. Grigor'ev², O.V. Murashova¹,
N.O. Zadrauskayte¹, M.G. Perfil'eva¹**

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 163002, Arkhangelsk, Russia

²Arctic State Agrotechnological University, 3, Sergelyakhskoye highway, 3 km, 677007, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russia

p.perfilev@narfu.ru

The current state of the timber industry complex in Russia is examined, and the problems of developing the estimated cutting area under conditions of a low-density road network are identified. It is shown that one of the promising directions for increasing the efficiency of forest management is the introduction of technologies for seasonal timber harvesting and processing at remote forest terminals using water transport. The necessity for accurate and operational accounting of round timber is substantiated for the objective assessment of work volumes and raw materials at the key operations of the terminals. Existing methods for measuring wood volume are analyzed, including traditional geometric methods (piece-by-piece accounting according to GOST, Huber's method, Smalian's method, the frustum method, top diameter methods), as well as modern digital solutions based on computer vision, neural networks, and aerial photography (laser scanning, services based on quadcopter operation). The results of an experimental study conducted at the enterprises of the Arkhangelsk region: LLC «Region-les» and CJSC «Lesozavod 25» are presented. Discrepancies in the volume values obtained by different methods are established, and a trend of their increase with the growth of assortment diameter is revealed. Using the F-test, an assessment of the methods' adequacy relative to GOST 2708–75 was carried out. An empirical regression equation is proposed for determining the volume of a log based on its top diameter, which allows for increased accuracy of measurement. It is determined that the proposed model most adequately describes the results obtained by the method of end sections (Smalian's method) and the frustum method. It is recommended to take into account the identified features when choosing accounting methods for automating processes at remote forest terminals.

Keywords: accounting, remote forest terminal, round timber, stack, quadcopter

Suggested citation: Perfil'ev P.N., Grigor'ev I.V., Murashova O.V., Zadrauskayte N.O., Perfil'eva M.G. *Analiz metodov ucheta kruglykh lesomaterialov dlya udalennykh lesnykh terminalov* [Analysis of round wood accounting methods for remote timber terminals]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2026, vol. 30, no. 2, pp. 127–139. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-2-127-139

References

- [1] Grigorev I., Zyryanov M., Medvedev S., Mokhirev A., Egipko S., Perfiliev P., Savvateeva I. The experimental study of logging residue stock on logging sites following clear-cutting using a sorting machine system. *International J. of Simulation and Process Modelling*, 2023, no. 20(4), pp. 267–275.
- [2] Perfiliev P., Zadrauskaite N., Rybak G. Study of hydrodynamic resistance of a raft composed of the flat rafting units of various draft // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18(1.5)*, Vienna, Austria, 3–6 December 2018. Vienna, 2018, pp. 765–772.
- [3] Zadrauskaite N., Perfiliev P., Glavatskih N. Wood quality potential as a criterion for forest management // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18(3.2)*, Albena, Bulgaria, 2–8 July 2018. Albena, 2018, pp. 1045–1052.
- [4] *Lesopromyshlennyy kompleks Arkhangel'skoy oblasti* [Forestry complex of the Arkhangelsk region]. Available at: <https://dvinland.ru/economics/lesprom> (accessed 19.09.2024).
- [5] Perfil'ev P.N., Zadrauskayte N.O., Posrednikov P.A. *Analiz transportnoy obespechennosti lesnykh massivov Rossiyskoy Federatsii* [Analysis of transport provision of forest areas of the Russian Federation]. *Inzhenernye zadachi: problemy i puti resheniya: mater. V Vserossiyskoy (natsional'noy) nauchno-prakticheskoy konferentsii Vyshey inzhenernoy shkoly SAFU, posvyashchennoy desyatiletuyu nauki i tekhnologii* [Engineering tasks: problems and solutions: materials of the V All-Russian (national) scientific and practical conference of the Higher Engineering School of NArFU, dedicated to the decade of science and technology], Arkhangelsk, November 15–17, 2023. Arkhangelsk: NArFU, 2024, pp. 97–100.
- [6] Perfil'ev P.N., Zadrauskayte N.O., Posrednikov P.A. *Obosnovanie sistemy mashin dlya mobil'nogo proizvodstva komponentov derevyannykh domov na udalennykh lesnykh terminalakh* [Justification of a Machine System for Mobile Production of Wooden House Components at Remote Forest Terminals]. *Inzhenernye zadachi: problemy i puti resheniya: mater. IV Vserossiyskoy (natsional'noy) nauchno-prakticheskoy konferentsii Vyshey inzhenernoy shkoly SAFU* [Engineering Tasks: Problems and Solutions: Proc. of the IV All-Russian (National) Scientific and Practical Conference of the Higher Engineering School of NArFU], Arkhangelsk, November 16–18, 2022. Arkhangelsk: NArFU, 2022, pp. 153–155.
- [7] Kunitskaya O.A., Belyaev N.L. *Obosnovanie neobkhodimosti povysheniya effektivnosti ucheta kruglykh lesomaterialov* [Justification of the Need to Improve the Efficiency of Round Timber Accounting]. *AGATU Bulletin*, 2021, no. 4 (4), pp. 73–79.
- [8] Perfiliev P., Zadrauskaite N., Rudnaya N., Benderuk T. Efficiency improvement of wood use. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 19(3.2)*, Bulgaria, 2019, pp. 697–705.
- [9] Starikov A.V., Baturin K.V. *Issledovanie i analiz metodov ucheta zagotovlennoy drevesny v Rossii i zarubezhnykh stranakh* [Research and Analysis of Methods for Accounting of Harvested Timber in Russia and Foreign Countries]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering J.], 2015, v. 5, no. 4 (20), pp. 103–114.
- [10] Shashkov D.A. *Osobennosti ucheta kruglykh lesomaterialov v zarubezhnykh stranakh* [Features of accounting of round timber in foreign countries]. *World science: problems and innovations: XLV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya* [World science: problems and innovations: XLV International scientific and practical conference], Penza, August 30, 2020. Penza: Science and Education, 2020, pp. 56–58.
- [11] Janák K. Differences in volume of round timber caused by different determination methods. *Drvnaindustrija*, 2006, v. 56, pp. 165–170.
- [12] Knyaz V.A., Maksimov A.A. Photogrammetric technique for timber stack volume control. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Zurich, Switzerland, 2014, v. 40, pp. 157–162.
- [13] Korsmo H. Weight equations for determining biomass fractions of young hardwoods from natural regenerated stands. *Scandinavian J. of Forest Research* Stonia, 2014, pp. 289–294.
- [14] Picchi G., Kühmaier M., Marques J. Survival test of RFID UHF tags in timber harvesting operations. *Croatian J. of Forest Engineering*, 2015, v. 36, pp. 165–174.
- [15] Belyaev N.L., Kunitskaya O.A., Verner N.N., Tikhonov E.A., Alekseenko V.G. *Napravleniya sovershenstvovaniya ucheta kruglykh lesomaterialov i ego normativnoy bazy dlya effektivnogo ispol'zovaniya mobil'nykh tsifrovyykh tekhnologiy* [Directions for improving the accounting of round timber and its regulatory framework for the efficient use of mobile digital technologies]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2023, no. 2 (58), pp. 129–138.
- [16] Belyaev N.L., Kunitskaya O.A. *Sovremennye tekhnologii opticheskogo gruppovogo ucheta kruglykh lesomaterialov* [Modern technologies of optical group accounting of round timber]. *Lesnaya inzheneriya, materialovedenie i dizayn: mater. 86-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov* [Forest engineering, materials science and design: materials. 86th Scientific and Technical Conference of the Faculty, Researchers, and Postgraduate Students], Minsk, January 31–February 12, 2022. Minsk: Belarusian State Technological University, 2022, pp. 50–53.
- [17] Forestscanner *Izmerenie lesa dronami* [Forest Measurement with Drones]. Available at: <https://www.forestscanner.net/> (accessed 09.11.2024).
- [18] Istomina A.A. *Sovershenstvovanie sistemy ucheta kruglykh lesomaterialov* [Improving the Round Timber Accounting System]. *Lomonosovskie nauchnye chteniya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh 2021: sbornik mater. konferentsii* [Lomonosov Scientific Readings for Students, Postgraduates, and Young Scientists 2021: Conference Proceedings], in 2 v. Arkhangelsk: NArFU, 2021, pp. 240–244.
- [19] Morozova E.S. *Obosnovanie parametrov, vliyayushchikh na opredelenie ob'ema breven pri ispol'zovanii radiochastotnogo sposoba* [Justification of Parameters Affecting the Determination of Log Volume Using the Radio Frequency Method]. *Master's Dissertation*, 35.04.02 TLiDP, Yekaterinburg, 2018, 80 p.

- [20] Butakov S.V. *Obosnovanie pnevmometricheskogo metoda opredeleniya ob'emov lesomaterialov* [Justification of the pneumometric method for determining the volume of timber]. Dis. Cand. Sci. (Tech.), 05.21.05 DTiOD. Arkhangelsk, 2008, 195 p.
- [21] Tarazevich A.A. *Sovershenstvovanie logistiki lesosnabzheniya predpriyatiy gruppy «Titan»* [Improving the logistics of timber supply of Titan Group enterprises]. Master's Dissertation, 35.04.02 TLiDP, Arkhangelsk, 2019, 99 p.
- [22] Kunitskaya O.A., Pomiguyev A.V. *Pererabotka drevesiny na mobil'nykh liniyakh lesnykh terminalov* [Wood processing on mobile lines of timber terminals]. Vestnik AGATU [Bulletin of AGATU], 2021, no. 3 (3), pp. 82–99.
- [23] Kunickaya O., Zyryanov M., Medvedev S., Mokhirev A., Spiridonova A., Perfiliev P., Teppoev A. Efficient Technologies for Harvesting and Reutilizing Logging Residues in Russia: A Sustainable Forestry Approach. Mathematical modelling of engineering problems, 2024, no. 11(3), pp. 745–753.
- [24] Lokshtanov B.M., Orlov V.V., Il'yushenko D.A., Ugryumov S.A. *Terminaly na lesoseke i ikh funktsii* [Terminals in the logging area and their functions]. Nauchnye issledovaniya i razrabotki v oblasti dizayna i tekhnologii: mater. Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Scientific research and development in the field of design and technology: materials of the All-Russian scientific and practical conference], Kostroma, March 18–19, 2021. Kostroma: Kostroma State University, 2021, part 1, pp. 123–127.
- [25] Markelov V.M., Zaikin A.N. *Povyshenie effektivnosti pererabotki drevesiny pri primenenii mobil'nykh ustanovok* [Increasing the efficiency of wood processing when using mobile units]. Ekonomika i effektivnost' organizatsii proizvodstva [Economy and efficiency of production organization], 2016, no. 24, pp. 126–127.
- [26] Kunitskaya O.A., Pomiguyev A.V. *Perspektivy razvitiya sistem generirovaniya i preobrazovaniya elektricheskoy energii dlya lesnykh terminalov* [Prospects for the development of systems for generating and converting electrical energy for forest terminals]. Lesoekspluatatsiya i kompleksnoe ispol'zovanie drevesiny: Mater. Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Forest exploitation and integrated use of wood: materials of the All-Russian scientific and practical conference], Krasnoyarsk, March 10, 2021. Krasnoyarsk: Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev, 2021, pp. 124–128.
- [27] Shashkov D.A. *Puti povysheniya tochnosti ucheta kruglykh lesomaterialov* [Ways to improve the accuracy of round timber accounting]. Nauka i prosvetshchenie: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovatsii: sb. statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Science and education: current issues, achievements and innovations: collection of articles from the International Scientific and Practical Conference], Penza, February 28, 2020. Penza: Science and Education (IP Gulyaev G.Yu.), 2020, pp. 47–49.
- [28] Shvetsova V.V. *Avtomatizatsiya geometricheskogo metoda ucheta kruglykh lesomaterialov* [Automation of the geometric method for accounting for round timber]. Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa. materialy VI Vserossiyskoy natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Improving the efficiency of the forest complex. Proceedings of the VI All-Russian National Scientific and Practical Conference], Petrozavodsk, May 22, 2020. Petrozavodsk: Petrozavodsk State University, 2020, pp. 149–150.
- [29] Nosov A.S., Glavatskikh N.S., Kozlov K.V. *Problemy ucheta kruglykh lesomaterialov* [Problems of accounting for round timber]. Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa: Mater. XVIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Actual problems of development of the forest complex: Proc. of the XVIII International Scientific and Technical Conference], Vologda, December 1, 2020. Vologda: Vologda State University, 2020, pp. 239–241.
- [30] GOST 2708–75 *Lesomaterialy kruglye. Tablitsy ob'emov* [Round timber. Volume tables]. Moscow: IPK Publishing House of Standards, 1999, 37 p.
- [31] GOST 2292–88 *Lesomaterialy kruglye. Markirovka, sortirovka, transportirovanie, metody izmereniya i priemka* [Round timber. Marking, sorting, transportation, measurement methods, and acceptance]. Moscow: IPK Publishing House of Standards, 2003, 10 p.
- [32] GOST 32594–2013 *Lesomaterialy kruglye. Metody izmereniy* [Round timber. Measurement methods]. Moscow: Standartinform, 2015, 39 p.
- [33] Stonozhenko L.V., Yugov A.N., Karminov V.N., Ivanov N.G. *Primenenie MS Excel i Statistica for Windows dlya lesotaksatsionnykh vychisleniy i obrabotki eksperimental'nykh dannykh metodami matematicheskoy statistiki* [Application of MS Excel and Statistica for Windows for forest inventory calculations and processing of experimental data using mathematical statistics methods]. Moscow: MGUL, 2012, 88 p.
- [34] Murashova O.V., Surov G.Ya., Perfil'ev P.N. *Organizatsiya i metody nauchnykh issledovaniy* [Organization and methods of scientific research]. Arkhangelsk: Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 2018, 123 p.
- [35] *Smart-timber – programmnoe obespechenie dlya opredeleniya ob'ema kruglogo lesa* [Smart-timber – software for determining the volume of round timber]. Available at: <https://smart-timber.com/#rec175127477> (accessed 09.11.2024).
- [36] *Logsize – prilozhenie dlya izmereniya breven* [Logsize – an application for measuring logs]. Available at: <http://www.logsize.com/en/> (accessed 09.11.2024).
- [37] *Timbeter – prilozhenie dlya izmereniya kruglogo lesa i raboty s elektronnyimi dannymi* [Timbeter – an application for measuring round timber and working with electronic data]. Available at: <https://timbeter.com/> (accessed 09.11.2024).
- [38] Belyaev N.L., Kunitskaya O.A. *Sravnitel'nyy analiz innovatsionnykh tekhnologiy v oblasti ucheta kruglykh lesomaterialov* [Comparative Analysis of Innovative Technologies in Round Timber Accounting]. Innovatsii v khimiko-lesnom komplekse: tendentsii i perspektivy razvitiya: mater. Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Innovations in the Chemical-Forest Complex: Development Trends and Prospects: Proc. of the All-Russian Scientific and Practical Conference]. Krasnoyarsk, June 6–7, 2022. Krasnoyarsk: Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev, 2022, pp. 74–77.
- [39] Belyaev N.L., Kunitskaya O.A. *Izmereniya i uchety kruglykh lesomaterialov: istoriya i perspektivy razvitiya* [Measurements and Accounting of Round Timber: History and Development Prospects]. Vestnik AGATU [AGATU Bulletin], 2023, no. 1 (9), pp. 58–86.

Authors' information

Perfil'ev Pavel Nikolaevich ✉ — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, p.perfilev@narfu.ru

Grigor'ev Igor' Vladislavovich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Arctic State Agrotechnological University, silver73@inbox.ru

Murashova Ol'ga Valer'evna — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, o.murashova@narfu.ru

Zadrauskayte Natal'ya Olegovna — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, n.zadrauskaite@narfu.ru

Perfil'eva Marina Gennad'evna — Student of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, m.perfileva@narfu.ru

Received 24.02.2025.

Approved after review 27.10.2025.

Accepted for publication 18.02.2026.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОЕЗДОВ ТЕХНИКИ НА СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОПРОФИЛЯ ВОЛОКА В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ СВОЙСТВ ПОЧВОГРУНТОВ

М.А. Пискунов

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», Россия, 185910, Республика Карелия, г. Петрозаводск, пр. Ленина, д. 33

piskunov_mp@list.ru

Приведены результаты экспериментов по измерениям высоты микропрофиля волокна, проложенного на лесосеке через участки, отличающиеся между собой несущей способностью почвогрунтов. Представлены данные о том, как меняется микропрофиль волокна и как проявляется образование колеи на участках с разной несущей способностью в статистической обработке высотных координат профиля с увеличением общего количества проездов харвестера и форвардера. Проанализированы выборки, составленные из значений высот микропрофиля, измеренных вдоль волокна в точках, расположенных друг от друга на расстоянии один метр. Показано, что с увеличением количества проездов лесозаготовительных машин увеличивается дисперсия каждой последующей выборки, но с каждой новой серией проездов интенсивность увеличения дисперсии снижается, при этом выборки не подчиняются закону нормального распределения. Указано, что исключение значений высот микропрофиля, измеренных на участке волокна, проходящего через зону почвогрунтов, отличающихся низкой несущей способностью, изменяет статистические характеристики выборок. Установлено, что последовательность значений высот, полученная на участках с высокой несущей способностью почвогрунтов, подчиняется закону нормального распределения независимо от количества проездов и разброс данных в большей степени связан с неоднородностью покрытия из лесосечных отходов, а не с глубиной колеи. В статистическом моделировании процессов изменения поверхностей волокон, связанных с проездами лесозаготовительных машин, рекомендуется рассматривать трелёвочные волокна, проходящие через участки с разными свойствами грунтов, в отдельной классификационной группе транспортных путей. В моделях движения лесозаготовительных машин по таким путям, рекомендуется учитывать то, что статистические характеристики микропрофиля в разных частях волокна отличаются и изменяются после каждого проезда машины.

Ключевые слова: трелевочный волок, глубина колеи, продольный микропрофиль, лесная почва, форвардер

Ссылка для цитирования: Пискунов М.А. Исследование влияния проездов техники на статистические характеристики микропрофиля волокна в условиях изменяющихся свойств почвогрунтов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2026. Т. 30. № 2. С. 140–152. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-2-140-152

Научные работы, посвященные влиянию лесозаготовок на лесные почвы, продолжают занимать заметное место в общем массиве публикаций по лесотехнической тематике. Одним из критериев, с помощью которого, с одной стороны, анализируется деформация почв, вызванная лесозаготовительным процессом, а с другой — оцениваются условия движения техники по лесосеке, выступает глубина колеи, образующаяся в местах проезда тракторов. Например, продавливание почвы в местах многократных проездов лесозаготовительных машин вызывает изменение продольного микропрофиля

поверхности волокна и тем самым воздействует на скорость и плавность движения трактора [1, 2] или размер колеи оказывает влияние на рейсовую нагрузку трелевочного трактора [3] и силу сопротивления движению [4, 5].

В период с 2020 по 2025 годы разными исследователями были проведены эксперименты и получены сведения, которые дополняют ранее полученный объем информации, описывающий изменения в лесных почвах, вызванные проездами лесозаготовительных машин. Некоторые работы посвящены исследованиям образования колеи в местах движения форвардеров на лесосеках вследствие влияния различных факторов. В частности, в статье [6] определена средняя глубина колеи на опытных участках,

не покрытых лесосечными отходами, после четырех, восьми и 10 проездов по одному следу груженого форвардера модели Ponsse Buffalo King. Здесь наряду с определением средних значений, уделяется внимание существованию заметных различий в размерах колеи вдоль опытного участка.

Результаты измерений размера колеи при последовательных проездах по одному следу груженого форвардера модели Valmet 860.4 представлены в работе [7]. Измерения колеи проводились в отдельном сечении волока в течение 39 проходов машины. Как изменяется интенсивность колееобразования в процессе повторяющихся по одному следу движений восьмиколесного форвардера модели Ponsse Buffalo по сравнению с форвардером той же модели, но оборудованного дополнительной задней осью, представлено в работе [8], в которой показаны также изменения средних значений глубины колеи при 25 проездах машин.

В исследовании [9] для моделей форвардеров, оснащенных различными типами гусениц, определены размеры колеи при проходах машин по участкам, которые были расположены на торфяных почвах. Каждая модель машины совершала четыре проезда по одному следу. Размер колеи определялся для прямолинейных и криволинейных опытных участков. Среднее значение для прямолинейных участков определялось по трем сечениям, которые располагались через 1,25 м один от другого. На криволинейных участках фиксировались семь значений, расположенных через 2 м один от другого. Исследования показали заметный разброс в значениях глубины колеи, измеренных в разных сечениях. Так, при среднем значении колеи, подсчитанном на основании данных, полученных на всех участках, в 15,47 см, стандартное отклонение составило 7,59 см.

Средний размер колеи в процессе заготовки древесины с использованием форвардера модели Timberjack 1710B определен в работе [10]. Здесь авторы оперируют медианными значениями, которые определены по измерениям, выполненным по всей длине волока. Значения определялись после каждого проезда форвардера. Общее количество проездов составило 8. При этом также фиксировался размах выборки. Если после первого проезда медианное значение размера колеи лежало внутри диапазона 6...17 см, то после восьмого проезда — уже внутри диапазона 20...65 см.

В работе [11] измерялась глубина колеи при проездах колесных и гусеничных машин по 25-метровым опытным участкам волока, неукрепленным и укрепленным лесосечными

отходами. Авторы измеряли глубину колеи на каждом опытном участке в пяти сечениях, а затем определяли среднее, но после первых проездов машин было отмечено, что получаемые значения обладают широким разбросом.

В работе [12] показаны продольные микропрофили волоков длиной 50 м образовавшиеся после трех и 10 проездов форвардера модели Ponsse Elephant 8W. В среднем глубина колеи после трех проездов составила 11 ± 8 см, после 10 проездов — 27 ± 12 см. Отмечается, что в местах с более высокой влажностью почвы глубина колеи была заметно выше по сравнению с остальными участками. Максимальная глубина колеи после 10 проездов в отдельных местах достигала 66 см.

К текущему периоду накоплен большой объем теоретических и экспериментальных сведений о процессах образования колеи, позволяющий осуществлять моделирование последствий проездов лесозаготовительных машин по лесным почвам для участков с постоянными характеристиками почвогрунтов. Однако в работе [13] обращается внимание на то, что механические свойства почв и подстилающих грунтов меняются вдоль трелевочного волока. Дополнительное влияние на общую картину изменения размеров колеи вдоль волока и на продольный микропрофиль волока оказывают: пнево-корневая система, камни, неровности различного вида [14], локальные водотоки [15] и рельефные особенности [16]. Необходимо учитывать и неодинаковую плотность произрастания деревьев в границах лесосеки [17], которая также оказывает влияние на образование колеи посредством распределения проездов лесозаготовительных машин по схеме волоков и обуславливает присутствие на лесосеке незарабатываемых участков [18].

Средние или медианные показатели размера колеи, рассчитанные по нескольким значениям, взятым в разных местах волока, не в полной мере описывают характер ее изменения вдоль волока и не характеризуют изменение продольного микропрофиля всего волока вследствие интенсивного колееобразования. В работе [19] представлены карты лесосек со схемами волоков, которые подтверждают факт изменения глубины колеи по длине волоков, и это изменение связано не только с количеством проездов лесозаготовительных машин, но и с мозаичностью свойств почвогрунтов на лесосеке. В этой работе в качестве параметра изменения свойств рассматривается влажность почвогрунтов, связанная с глубиной залегания грунтовых вод.

В работе [20] рассматривают модели для оценки и прогнозирования глубины колеи на

лесных почвах в процессе многократных проездов лесозаготовительных машин. Показаны примеры схем волоков, полученных на лесосеках, где в разных сечениях одного и того же волока с одинаковым количеством проездов лесозаготовительных машин глубина колеи изменяется. В этой работе определяется статистическая связь между глубиной колеи и такими характеристиками почвы, как плотность, текстура, влажность и комплексные характеристики, оцениваемые через сопротивление почвы вдавливанию конусного штампа.

Сопоставление карт свойств почв с глубиной колеи, измеренной в различных местах схемы волоков, выполнено в работе [21]. Среди прочего в этих исследованиях авторы указывают на необходимость принятия во внимание фактора изменения свойств почв на лесосеке для прогнозирования проходимости лесозаготовительных машин, но требуются дополнительные исследования в отношении того, на основе каких характеристик и какого измерительного инструментария проводить картографирование свойств почв лесосек.

В статье [22] представлены результаты исследования систем волоков для 16 лесосек площадью от 1 до 40 га, для которых составлялись карты почв. Почвы на этих картах разделялись на следующие типы: почвы с низкой несущей способностью, почвы со средней и почвы с высокой несущей способностью. Представленный пример карты с обозначением различных участков показывает, что один и тот же волок на лесосеке может проходить по участкам с разной несущей способностью почвы. Доля площадей лесосек, приходящихся на участки с низкой несущей способностью почвы, в этих исследованиях изменялась от 0 до 19 %, а доля волоков с глубокими колеями (глубина колеи больше 10 см) — от 1 до 28 %.

Подтверждение того, что характеристики микропрофиля волока в отдельных условиях будут изменяться по его длине, находим в работе [23], где авторы моделируют микропрофиль поверхности лесосеки как нестационарный процесс. В работах [24, 25] указывается на то, что в общем случае микропрофиль волока является нестационарной случайной функцией, но нестационарность связывается с уклонами, подъемами и волнообразностью поверхности. В более ранней работе [26] приводятся данные о том, что полученные выборки значений микропрофиля вырубки не подчиняются закону нормального распределения случайной величины и авторы в конце этой статьи делают вывод о том, что статистические свойства микронеровностей вырубок изменяются от

участка к участку. Здесь в продолжение этих выводов представим следующую гипотезу: при некотором сочетании факторов статистические характеристики микропрофиля волока будут заметно изменяться с каждым новым проездом лесозаготовительной машины.

В связи с этим актуально проведение экспериментов, направленных на получение дополнительных сведений о том, как изменение размера колеи в условиях изменяющихся свойств почвогрунтов вдоль трелевочных волоков после серии проездов влияет на статистические характеристики микропрофиля поверхности. В качестве основной гипотезы исследования выступает положение о том, что если волок характеризуется неоднородностью свойств почвогрунтов, то в процессе увеличения проездов лесозаготовительных машин интенсивное колеобразование на участках с низкой несущей способностью статистически отразится на увеличении разброса значений высот микропрофиля относительно некоторого среднего значения колеи, образующейся на волоке.

Цель работы

Цель работы — на основе натуральных экспериментов выполнение анализа статистических характеристик выборок, составленных из высотных координат микропрофиля трелевочного волока, обладающего участками с разной несущей способностью почвогрунтов, по которому осуществляются многократные проезды лесозаготовительных машин.

Материалы и методы

Полевые эксперименты осуществлялись на лесосеке действующего лесозаготовительного предприятия в безморозный период (измерения проведены с 30 июня по 11 октября). Лесозаготовительные операции выполнены по сортиментной технологии с использованием харвестера модели John Deere 1270D и форвардера John Deere 1110D. Форвардер был оснащен гусеницами на задней тандемной тележке.

После визуального осмотра лесосеки и консультаций с операторами лесозаготовительных машин был подобран экспериментальный волок, который включал в себя продолжительный участок с отличающимися от основной части волока свойствами. Этот участок при визуальном осмотре был охарактеризован как участок с избыточным увлажнением. Волок подбирали таким образом, чтобы участок с низкой несущей способностью был непрерывным и занимал не менее 20 % общей длины волока.

Такая постановка исходных данных в дальнейшем облегчала статистическую обработку, особенно в тех случаях, когда была необходимость исключить из выборки значения высот микропрофиля участка с резко отличающимися свойствами. Перед основными лесозаготовительными операциями на пасеке, где проходил экспериментальный волок, определялся рельеф местности (рис. 1).

Общая длина экспериментального пасечного волока составила 80 м. Высота микропрофиля на пасечном волоке измерялась через каждый 1 м в следе лесозаготовительной машины. Рельеф местности и измерения глубины колеи осуществлялись с использованием лазерного нивелира модели Condrol Neo X200 и измерительной рейки. Измерялись высотные координаты микропрофиля в правой колее по ходу движения.

Всего было сделано четыре серии измерений. Измерения проводились по фактическому состоянию мест на момент измерений. Точки измерений не очищались от лесосечных отходов или от обрушившегося грунта с боковых сторон следа. Допускалось несовпадение мест измерений по сериям, поскольку проведение лесозаготовительных операций изменяет состояние среды и волока, а постоянное отслеживание расположения точек измерений представляется затруднительным вследствие необходимости соблюдения техники безопасности на лесосеке. Там, где продавливания почвы не было или оно было незначительным, измерения фиксировали локальное возвышение уровня волока над неповрежденной поверхностью пасеки по причине наличия в следе лесосечных отходов. В отдельных случаях повышение высоты микропрофиля было связано с попаданием пня в место измерения. Лесозаготовительные операции на волоке до проведения измерений не проводились.

Первую серию замеров выполнили после двух проездов харвестера, который разрабатывал пасечный волок, вторую — после двух проездов форвардера. В одну сторону форвардер собирал сортименты, в обратную сторону двигался в груженом состоянии. Во втором случае форвардер не проехал весь волок, а начал двигаться в обратную сторону после загрузки грузового отсека, поэтому вторая серия измерений завершилась по границе на волоке далее, по которой форвардер не ездил. Третья серия измерений осуществлялась еще после двух проездов харвестера и четырех проездов форвардера. Два проезда были связаны с тем, что форвардер укреплял сырые места лесосечными отходами. Завершающая четвертая серия измерений была выполнена еще после двух проездов харвестера и двух проездов форвардера.

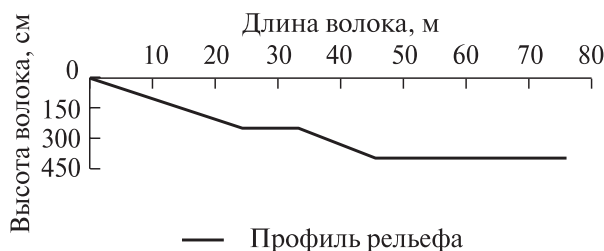


Рис. 1. Профиль рельефа волока

Fig. 1. The terrain characteristic of the skidding trail

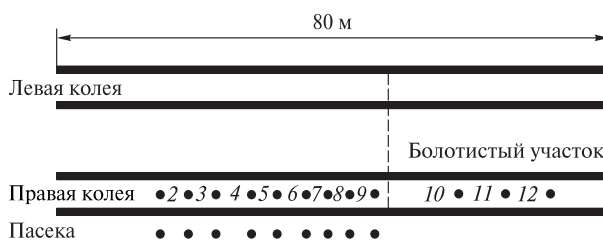


Рис. 2. Схема отбора проб

Fig. 2. Scheme of sample collection

Все проезды осуществлялись до конца волока и обратно. После этого движение по пасечному волоку больше не производилось.

После третьей и четвертой серий измерений, когда уже окончательно оформился след лесозаготовительных машин на волоке, был выполнен отбор проб грунта (рис. 2). Для части волока, приходящегося на сырой участок, количество проб было сокращено вследствие того, что визуальный осмотр состояния этого участка после первых проездов показал, что весь участок находится в условиях заболоченной местности и без дополнительного укрепления выдерживает один — два проезда лесозаготовительной техники. Пробы отобраны из мест, расположенных в следе колес трактора и из неповрежденного проездами трактора массива грунта рядом с волоком. Для каждой пробы определена плотность грунта и после сушки проб — массовая влажность грунта. Пробы грунта отобраны на глубине между 10 и 20 см от поверхности (табл. 1). Пробы 10–12, располагавшиеся на болотистом участке, отобраны только в колее после всех проездов лесозаготовительных машин.

Полученные массивы значений колеи были обработаны методами математической статистики, выборки проверены на соответствие нормальному закону распределения случайной величины. Для каждой выборки были определены средние значения и дисперсии. Далее из выборки исключались значения высоты микро-

Т а б л и ц а 1

Плотность и массовая влажность проб грунта
Density and moisture content of soil samples

Номер пробы	Расстояние от начала волока до места отбора пробы, м	Третья серия измерений		Четвертая серия измерений		Пасека	
		Плотность в колее, г/см ³	Массовая влажность, %	Плотность в колее, г/см ³	Массовая влажность, %	Плотность, г/см ³	Массовая влажность, %
1	15	1,41	20,8	1,59	19,5	1,87	18,4
2	19	–	–	1,79	18,1	1,49	19,8
3	23	1,68	22,2	1,61	22,1	1,23	15,9
4	28	1,75	19,8	1,71	13,3	1,32	7,4
5	32	1,49	19,5	1,56	17,3	1,34	20,6
6	37	1,87	17,1	1,38	20	1,57	17,9
7	40	–	–	1,66	19,8	–	–
8	42	–	–	1,39	22,8	0,86	34,4
9	46	–	–	1,53	35,1	1,15	31,8
10	62	–	–	0,79	900	–	–
11	65	–	–	0,82	925	–	–
12	69	–	–	0,89	1025	–	–

профиля с участка, приходящегося на почвогрунты с более низкой несущей способностью, и для этих выборок были определены средние значения и дисперсии. Для статистической обработки данных использовались средства пакетов Stadia 8.0 и Microsoft Excel 2010.

Результаты и обсуждение

Измерена высота микропрофиля волока в правой колее для каждой серии измерений (рис. 3). Данные о свойствах почвогрунта и высоты микропрофиля поверхности после проездов машин позволили определить на волоке три характерных участка. Первый участок располагается в первой половине волока и характеризуется почвогрунтами с высокой несущей способностью, выдерживает многократные повторяющиеся проезды лесозаготовительной техники. Второй участок — переходный, находящийся в конце рельефного спуска и начинающийся с отметки 32 м. Этот участок характеризуется тем, что по мере приближения к третьему участку начинает возрастать влажность грунта. Образование колеи на этом участке связано с рельефными особенностями, т. е. микропрофиль волока изменяется в большей степени не вследствие продавливания, а по причине сдвига грунта. Третий участок характеризуется переувлажненными почвогрунтами с

низкой несущей способностью и располагается в заболоченном месте. Этот участок начинается с отметки 46 м от начала волока.

Первые два участка волока в данном эксперименте рассматриваются как участки с характеристиками микропрофиля, мало изменяющимися при проездах машин. Высота микропрофиля поверхности волока на этих участках изменяется главным образом в связи с неоднородностью покрытия из сучьев. Интенсивность образования колеи в ходе проездов техники по этим участкам рассматривается как незначительная по сравнению с третьим участком, на котором даже при целенаправленном формировании покрытия из лесосечных отходов наблюдается глубокая колея.

По результатам каждой серии измерений высоты микропрофиля составлялись выборки. Было получено четыре выборки, которые показывали изменение микропрофиля по длине волока после проездов техники. Для каждой полной выборки определялись среднее значение и дисперсия. Также осуществлялась проверка гипотезы о принадлежности выборки нормальному закону распределения случайной величины по критерию согласия Пирсона при уровне значимости 0,05. Аналогичные расчеты выполнялись для неполных выборок, из которых были исключены значения высоты микропрофиля, полученные на третьем участке

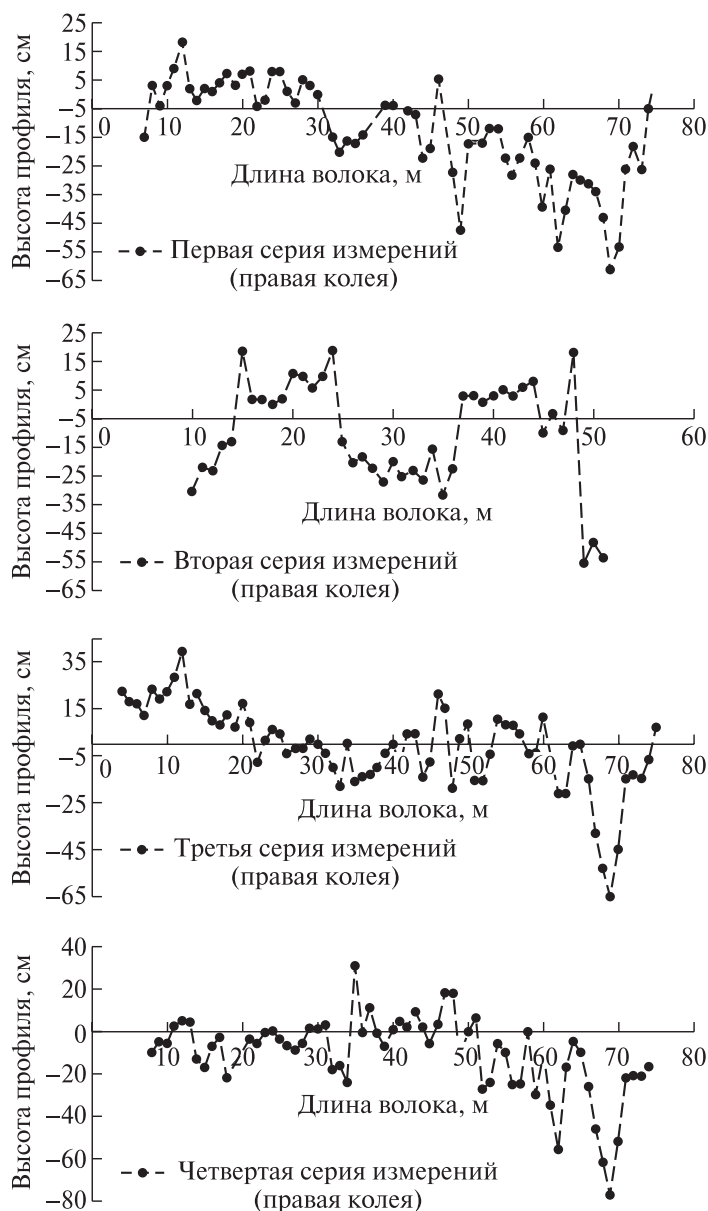


Рис. 3. Продольный микропрофиль волока после проездов лесозаготовительных машин

Fig. 3. Longitudinal microprofile of the skidding trail after logging machines transit

волока, характеризующимся переувлажненным почвогрунтом (табл. 2).

В табл. 2 не представлены результаты по выборке, составленной на основании второй серии измерений, вследствие того, что эти измерения проводились после проездов форвардера только по самому прочному участку, когда форвардер не заезжал на остальную часть волока с более низкой несущей способностью почвогрунта. Для второй серии измерений микропрофиль волока на слабом почвогрунте это, по сути, микропрофиль, полученный в первой серии измерений. Расчет по критерию Пирсона

показал, что полные выборки не подчиняются нормальному закону распределения, в то время как неполные выборки, из которых исключены значения высоты микропрофиля, измеренные на участках со слабонесущим почвогрунтом, подчиняются закону нормального распределения.

Анализ статистических характеристик, полученных для полных и неполных выборок значений высот микропрофиля волока, обнаруживает следующие закономерности. После каждой новой серии проездов дисперсия выборочных данных увеличивается, поскольку про-

Статистические характеристики микропрофиля волока
Statistical characteristics of the skidding trail microprofile

Статистическая характеристика	Полная выборка			Неполная выборка		
	Первая серия	Третья серия	Четвертая серия	Первая серия	Третья серия	Четвертая серия
Среднее значение, см	-13	-1	-11	-3	5	-4
Дисперсия, см ²	288	321	340	92	181	100
Эмпирическое значение критерия Пирсона	20,08	83,89	222,66	2,55	2,45	1,59
Критическое значение критерия Пирсона (0,05)	Число степеней свободы 5			Число степеней свободы 3		
	11,07			7,81		

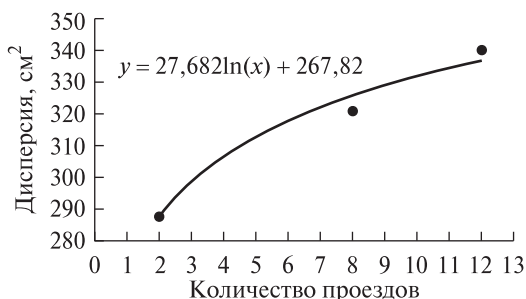


Рис. 4. Изменение дисперсии высот микропрофиля волока в зависимости от числа проездов техники
Fig. 4. Varying in the height dispersion of the skidding trail microprofile depending on the number of logging machines passes

исходит увеличение глубины колеи с каждым новым проходом трактора на слабом участке, в то время как участки с грунтами, обладающими большей несущей способностью, которые и формируют в условиях данного эксперимента в большей степени в выборочных данных, средние значения, не подвержены сильному колееобразованию. По мере увеличения проездов интенсивность образования колеи становится меньше. В статистических данных это обнаруживается в изменении интенсивности увеличения дисперсии. По мере увеличения проездов тенденция увеличения дисперсии сохраняется, но интенсивность ее роста снижается, так как по мере увеличения проездов общая деформация поверхности волока, если на ней преобладают деформации уплотнения, стремится к некоторому пределу [27, 28]. В данном эксперименте изменение дисперсии по всей выборке с каждой новой серией проездов описывает логарифмический закон (рис. 4).

Однако следует признать, что для того чтобы делать окончательные выводы, требуется про-

ведение дополнительных экспериментов в других разнообразных условиях. Тем не менее, результаты эксперимента указывают на некоторую общую тенденцию.

Если рассматривать неполные выборки, когда из выборок исключены данные, полученные на слабом участке, то можно отметить, что дисперсия не получает заметного роста. Существует увеличение разброса данных для третьей серии измерений, однако это рассеяние связано с лесосечными отходами. Покрытие из лесосечных отходов на этом участке было уложено не равномерно, с наличием крупных скоплений отходов и свободных от отходов мест волока. Также отходы были еще не уплотнены проездами машин, поэтому наблюдались чередующиеся возвышения отходов над поверхностью. К четвертой серии измерений, когда проезды машин заметно уплотнили покрытие, рассеяние значений высот микропрофиля снизилось.

Подчинение неполных выборок нормальному закону распределения подтверждает то, что на слабodeформируемых участках с однородными свойствами, различные факторы в равной степени влияют на характеристики микропрофиля волока. Это согласуется с данными, принятыми при рассмотрении движения транспортных систем общего назначения по различным дорогам и путям [29]. Включение в общую выборку значений высоты микропрофиля, полученных на сильно деформируемом его участке, обнаруживает несоответствие полной выборки нормальному закону, что свидетельствует о более сильном влиянии на характеристики микропрофиля всего волока отдельного фактора или группы факторов, связанных со свойствами почвогрунта слабых участков.

В работе [30] представлены гистограммы распределения высоты неровностей микропрофиля пасечного и магистрального волоков.

Т а б л и ц а 3

Статистические характеристики отдельных участков волока
Statistical characteristics of skidding trail parts

Участок волока	Первая серия измерений		Третья серия измерений		Четвертая серия измерений	
	Среднее значение высоты, см	Дисперсия, см ²	Среднее значение высоты, см	Дисперсия, см ²	Среднее значение высоты, см	Дисперсия, см ²
Первый	2,8	17	11,6	120	-5,4	48
Второй	-12,3	35	-7,9	50	-0,9	187
Третий	-25,7	257	-9,5	403	-20,4	505

Авторы показывают, что значения высоты распределены по логарифмически нормальному закону распределения, а это является признаком существования неоднородности в данных, т. е. встречаются заметно отличающиеся значения, что соответствует условиям лесосек.

Эксперимент показал, что при прокладывании волоков через участки, которые характеризуются разными сильно отличающимися свойствами почвогрунтов, микропрофиль волока следует представлять как нестационарный процесс.

В работе [31] нестационарный микропрофиль предлагается рассматривать как процесс, собранный из некоторого числа стационарных процессов. В данном эксперименте отдельно определим средние значения и дисперсии для трех участков, которые были выделены на волоке. Введем положение, что имеет место нестационарность процесса по дисперсии и построим сглаживающие кривые, показывающие, как изменяется дисперсия по длине волока с увеличением количества проездов лесозаготовительных машин.

Выполнены расчеты статистических характеристик выборок для отдельных участков (табл. 3) и построены сглаживающие кривые (рис. 5). Эти кривые имеют экспоненциальный вид, но не универсальный, так как продолжительный участок со слабыми почвогрунтами располагался в данном эксперименте в конце волока и свойства слабого участка очень сильно отличались от доминирующих свойств почвогрунтов по длине всего волока. Наличие таких участков в середине волока или периодическая их встречаемость в разных частях волока изменяет вид кривых. Почвогрунты со слабой несущей способностью оказывают существенно большее влияние в рассеяние значений высоты микропрофиля. Экспонента в данном эксперименте показывает разницу в увеличении разброса значений высоты ми-

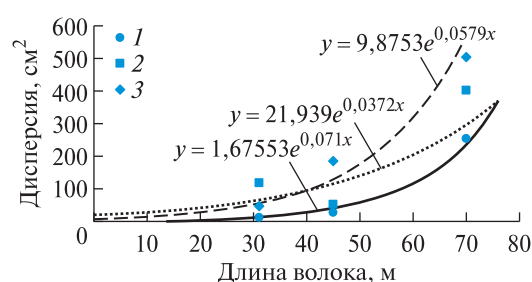


Рис. 5. Изменение дисперсии по длине волока: 1 — первая серия измерений; 2 — третья серия измерений; 3 — четвертая серия измерений

Fig. 5. Modifying of the dispersion along the length of the skidding trail: 1 — the first series of measurements; 2 — the third series of measurements; 3 — the fourth series of measurements

кропрофиля относительно некоторого среднего значения для участков с разными свойствами почвогрунта в процессе повторяющихся проездов.

Участки, отличающиеся по своим свойствам, обнаруживаются в статистической обработке по изменению дисперсии выборок, составленных из значений высоты микропрофиля. Наличие участков с низкой несущей способностью показывает увеличение дисперсии с увеличением глубины колеи на этих участках для всего массива данных. Рост дисперсии замедляется с увеличением количества проходов, что объясняется снижением интенсивности деформации поверхности, вследствие стабилизации микропрофиля поверхности волока, поскольку на слабых грунтах основные деформационные процессы происходят на первых проездах тракторов [32]. Изменение дисперсии рассматривается как критерий, с помощью которого осуществляется анализ состояния волоков, проложенных по участкам, на которых свойства почвогрунтов не однородны, а изменяются в широких пределах.

При рассмотрении микронеровностей волока значимым фактором выступает присутствие покрытия из лесосечных отходов. Прежде чем покрытие деформируется от многократных проездов лесозаготовительных машин, наблюдаются выбросы значений микропрофиля вследствие локальных больших скоплений отходов и не однородностью их распределения вдоль волока. По мере деформации отходов разброс значений высоты микропрофиля снижается. Покрытие из отходов не влияет на общую тенденцию изменения высотных координат микропрофиля на слабых грунтах. В этом случае интенсивность разброса значений снижается, однако общая тенденция на увеличение разброса сохраняется.

Накопление статистических данных об изменении глубины колеи вдоль волоков при проездах машин представляется актуальным для моделирования и прогнозирования процессов на волоках, проходящих через участки с разными свойствами грунта. В качестве дополнительного фактора, подкрепляющего актуальность данных исследований, выступает получающая в последние годы тенденция на разработку технологических машин, способных работать в автономном режиме, для которых алгоритмы распознавания процессов являются основой для алгоритмов управления движением. В связи с этим, рассмотрение волоков, проходящих в местах с изменяющимися свойствами почвогрунтов, в отдельной классификационной группе транспортных путей в процессе решения отраслевых задач, представляется целесообразным.

Выводы

Представлены результаты эксперимента по измерениям микропрофиля волока, проходящего через участки лесосеки с разной несущей способностью почвогрунтов. Экспериментальный волок был проложен таким образом, чтобы часть волока попадала на заболоченный участок с низкой несущей способностью грунта.

Измерения высотных координат микропрофиля проводились на одном и том же волоке в точках, расположенных на расстоянии один метр друг от друга. Было сделано четыре серии измерений. Каждая последующая серия измерений осуществлялась после того, как харвестер и форвардер осуществляли очередные проезды по волоку. Таким образом, были получены выборки, составленные из значений высот микропрофиля одного и того же волока, но после разного количества проездов техники.

Статистическая обработка полных выборок показала, что с увеличением количества проездов лесозаготовительных машин увеличивается дисперсия выборки, полученная после очередной серии проездов. При этом полные выборки не подчиняются закону нормального распределения. Наличие на волоке участков с низкой несущей способностью почвогрунтов, на которых после каждого проезда харвестера или форвардера значительно увеличивается глубина колеи, и показывает увеличение дисперсии в каждой выборке. По мере увеличения проездов интенсивность образования колеи на слабых участках снижается. Это проявляется и в изменениях значений дисперсии, её значение также увеличивается, но менее интенсивно.

Анализ неполных выборок, из которых были исключены значения высот микропрофиля, относящиеся к участкам со слабой несущей способностью почвогрунта, показал, что такие выборки подчиняются закону нормального распределения независимо от количества проездов. Разброс данных здесь в большей степени связан с неоднородностью покрытия из лесосечных отходов, а не с глубиной колеи, так как на таких участках образование колеи менее интенсивное. При моделировании движения лесозаготовительных машин по волокам, проходящим через участки с разной несущей способностью, рекомендуется рассматривать каждый следующий проезд лесозаготовительной машины, как движение по транспортному пути с изменившимися статистическими характеристиками поверхности по сравнению с предыдущим проездом и, одновременно, с изменяющимися характеристиками поверхности по длине пути.

Список литературы

- [1] Григорьев И.В., Цыгарова М.В., Жукова А.И., Лепилин Д.В., Есин Г.Ю. Планирование эксперимента при исследовании взаимодействия трелевочной системы с волоком // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование 2011. Вып. 2(12). С. 47–54.
- [2] Жуков А.В. Теоретические основы выбора технических параметров и улучшения эксплуатационных свойств специальных лесных машин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.06.02. Ленинград, 1978. 36 с.
- [3] Бурмистрова О.Н., Просужих А.А., Хитров Е.Г., Куницкая О.А., Лунова Е.Н. Теоретические исследования производительности форвардеров при ограничениях воздействия на почвогрунты // ИзВУЗ Лесной журнал, 2021. № 3. С. 101–116. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-101-116
- [4] Жуков А.В., Лой В.Н. Оценка влияния глубины колеи на силу сопротивления качению колесной тре-

- левочной машины // Леса Европейского региона — устойчивое управление и развитие: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. Минск, 4–6 декабря 2002 г. Минск: Изд-во БГТУ, 2002. Ч. 2. С. 198–201.
- [5] Лой В.Н. Оценка силы сопротивления качению колесной трелевочной машины с учетом деформации лесных почвогрунтов // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность, 2002. № 2. С. 44–47.
- [6] Ильинцев А.С., Наквасина Е.Н. Образование колеиности при проходе лесозаготовительной техники в ельниках на двучленных породах // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2021. № 237. С. 168–182.
<https://doi.org/10.21266/2079-4304.2021.237.168-182>
- [7] Pandur Z., Kopssek H., Šušnjarić M., Landekić M., Šporčić M., Bačić M. Effect of forwarder multipassing on forest soil parameters changes // iForest, 2022, no. 15, pp. 476–483. DOI: 10.3832/ifor4138-015
- [8] Fjeld D., Østby-Berntsen Ø. The effects of an auxiliary axle on forwarder rut development — a Norwegian field study // International J. of Forest Engineering, 2020, no. 31(3), pp. 192–196.
<https://doi.org/10.1080/14942119.2020.1765645>
- [9] Ala-Ilomäki J., Lindeman H., Mola-Yudego B., Prinz R., Väättäinen K., Talbot B., Routa J. The effect of bogie track and forwarder design on rut formation in a peatland // International J. of Forest Engineering, 2021, no. 32(sup1), pp. 12–19.
<https://doi.org/10.1080/14942119.2021.1935167>
- [10] Bumber Z., Đuka A., Popović M., Poršinsky T. Soil characteristics in oak lowland stand — a case study of a 6-wheeled forwarder's impact on forest soil // Croatian J. of Forest Engineering, 2024, no. 45(1), pp. 85–95. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2024.2362>
- [11] Никитин В.В., Скрышников А.В., Бавыкина Е.Г., Викулин И.А., Брюховецкий А.Н., Бойков П.А. Оптимальное размещение лесотранспортной сети на модели местности // Теория и практика инновационных технологий в АПК: Материалы нац. науч.-практ. конф. Воронеж, 19–21 апреля 2022 г. Воронеж: Изд-во Воронежского ГАУ, 2022. Ч. I. С. 99–120.
- [12] Dymov A.A., Startsev V.V., Gorbach N.M., Severgina D.A., Kutyavin I.N., Osipov A.F., Dubrovsky Yu.A. Changes in soil and vegetation with different number of passes of wheeled forestry equipment (Middle Taiga, Komi Republic) // Eurasian Soil Science, 2022, v. 55, no. 11, pp. 1633–1646.
<https://doi.org/10.1134/S1064229322110023>
- [13] Большаков Б.М. Снижение отрицательных последствий от воздействия трелевочных систем на лесную почву: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. Санкт-Петербург, 1998. 61 с.
- [14] Боровлев Ю.А., Козлов Д.Г., Скрышников 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
- [15] Ильинцев А.С., Черкасов Н.С. Анализ почвенного покрова сплошных вырубок с помощью беспилотного летательного аппарата // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2024. Т. 21. № 4. С. 223–234. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-223-234
- [16] Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Моделирование взаимодействия лесных машин с почвогрунтом при работе на склонах // ИзВУЗ Лесной журнал, 2021. № 6. С. 121–134. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-121-134
- [17] Макаренко А.В., Быковский М.А., Лаптев А.В. Эффективность выполнения технологических операций при проведении выборочных рубок леса // Актуальные проблемы развития лесного комплекса, Вологда, 01–02 декабря 2015 г. Вологда: Изд-во Вологодского государственного университета, 2016. С. 32–37.
- [18] Макаренко А.В. Проектирование схем трелевочных волоков на лесосеке с неразрабатываемым участком // Лесной вестник / Forestry Bulletin. 2022. Т. 26. № 1. С. 126–134. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-1-126-134
- [19] Heppelmann J.B., Talbot B., Antón Fernández C., Astrup R. Depth-to-water maps as predictors of rut severity in fully mechanized harvesting operations // International J. of Forest Engineering, 2022, no. 33(2), pp. 108–118. DOI: 10.1080/14942119.2022.204472
- [20] Jones M.-F., Arp P. Soil trafficability forecasting // Open J. of Forestry, 2019, no. 9, pp. 296–322.
<https://doi.org/10.4236/ojf.2019.94017>
- [21] Schönauer M., Hoffmann S., Maack J., Jansen M., Jaeger D. Comparison of selected terramechanical test procedures and cartographic indices to predict rutting caused by machine traffic during a cut-to-length thinning operation // Forests, 2021, no. 12 (2), p. 113. <https://doi.org/10.3390/f12020113>
- [22] Mohtashami S., Eliasson L., Jansson G., Sonesson J. Influence of soil type, cartographic depth-to-water, road reinforcement and traffic intensity on rut formation in logging operations: a survey study in Sweden // Silva Fennica, 2017, v. 51, no. 5, article id. 2018, 14 p. <https://doi.org/10.14214/sf.2018>
- [23] Ласточкин Д.М., Москалева С.А., Ларина А.В., Мучкаева Г.М. Моделирование опорной поверхности лесосечных машин // Научный журнал Кубанского государственного аграрного университета, 2013. № 85(01). С. 1–13.
- [24] Добрынин Ю.А., Поликарпов А.О. К вопросу оценки возмущений на ходовую систему транспортных машин в процессе их движения в лесных условиях // Сборник статей по материалам науч.-техн. конф. Института технологических машин и транспорта леса по итогам науч.-исслед. работ 2022 года. СПб.: Изд-во СПбГЛТУ, 2023. С. 28–32.
- [25] Симанович В.А., Пищов М.Н., Смяян А.И. Эксплуатационная оценка работы колесных лесных агрегатных машин // Труды БГТУ. Серия 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность, 2008. № 2. С. 92–95.
- [26] Гойденко А.А., Алябьев А.Ф. Об определении статистических характеристик микропрофилей вырубков // ИзВУЗ Лесной журнал, 1989. № 2. С. 119–120.
- [27] Хахина А.М. Методы прогнозирования и повышения проходимости колесных лесных машин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. Архангельск, 2018. 40 с.
- [28] Протас П.А., Завойских Г.И. Работоспособность трелевочных волоков на грунтах повышенного увлажнения // Труды БГТУ. Серия 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность, 2005. № 13. С. 28–30.
- [29] Силаев А.А. Спектральная теория подрессоривания транспортных машин. М.: Машиностроение, 1972. 192 с.

- [30] Добрынин Ю.А., Кривоногова А.С., Пушков Ю.Л., Спиридонов С.В., Кузин И.С. Преобразование законов распределения исследуемых параметров вертикальной динамики лесохозяйственного трактора колесной формулой 4x4 // Сб. статей по материалам науч.-техн. конф. Института технологических машин и транспорта леса по итогам науч.-исслед. работ 2021 года. СПб.: СПбГЛТУ, 2022. С. 408–415.
- [31] Борисевич В.Б. Научные основы моделирования и управления технологическими машинами на грунтах со слабой несущей способностью: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.03. Москва, 2006. 42 с.
- [32] Цыгарова М. В. Повышение эффективности освоения лесосек с переувлажненными грунтами путем обоснования рациональной технологии: в условиях Республики Коми: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. СПб., 1998. 21 с.

Сведения об авторе

Пискунов Максим Анатольевич — канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», piskunov_mp@list.ru

Поступила в редакцию 16.02.2025.

Одобрено после рецензирования 30.10.2025.

Принята к публикации 18.02.2026.

EFFECT OF VEHICLE TRAFFIC ON STATISTICAL CHARACTERISTICS OF SKIDDING TRAIL MICROPROFILE IN CONDITIONS OF ALTERING SOIL PROPERTIES

M.A. Piskunov

Petrozavodsk State University, 33, Lenin av., 185910, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia

piskunov_mp@list.ru

The results of experiments on measuring the height of a micro-profile of a skidding trail laid through areas differing in the bearing capacity of soils are presented. Data is presented on how the micro-profile of the skidding trail changes and how the formation of a rutting is manifested in areas with different bearing capacities in the statistical processing of the profile height coordinates as the number of harvester and forwarder passes increases. The statistical samples made up of the micro-profile heights measured along the skidding trail at points within one meter of each other are analyzed. It is shown that as the number of logging passes increases, the variance of each subsequent sample increases. But with each new series of passes, the intensity of the increase of the variance decreases, while the samples do not follow a normal distribution. It is indicated that the exclusion of the height values of the micro-profile measured at the section passing through the zone of soils with low bearing capacity changes the statistical characteristics of the samples. It was found that the sequence of heights values of the micro-profile obtained only in areas with high load-bearing capacity of soil follows a normal distribution, regardless of the number of logging machines passes, and the variance of data is more related to the heterogeneity of the logging residues covering on the trail rather than the rutting. It is recommended that skidding trails passing through areas with different soil properties should be considered in a separate classification category of transport trails when statistical modeling of the micro-profile of the skidding trail is carried out. In models of movement of logging machines along such trails, it is recommended to take into account that the statistical characteristics of the micro-profile in different parts of the trail differ and change after each transit of a machine.

Keywords: skidding trail, rut depth, longitudinal microprofile, forest soil, forwarder

Suggested citation: Piskunov M.A. *Issledovanie vliyaniya proezdov tekhniki na statisticheskie kharakteristiki mikroprofilya voloka v usloviyakh izmenyayushchikhsya svoystv pochvogruntov* [Effect of vehicle traffic on statistical characteristics of skidding trail microprofile in conditions of altering soil properties]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2026, vol. 30, no. 2, pp. 140–152. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-2-140-152

References

- [1] Grigorev I.V., Tsygarova M.V., Zhukova A.I., Lepilin D.V., Esin G.Yu. *Planirovanie eksperimenta pri issledovanii vzaimodeystviya trelevochnoy sistemy s volokom* [Design of experiment in the research of interaction of logging system with logway]. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie [Vestnik of Volga State University of Technology Series «Forest. Ecology. Nature Management»], 2011, no. 2(12), pp. 47–54.
- [2] Zhukov A.V. *Teoreticheskie osnovy vybora tekhnicheskikh parametrov i uluchsheniya ekspluatatsionnykh svoystv spetsial'nykh lesnykh mashin* [Theoretical foundations of choosing technical parameters and improving the operational properties of special logging machines]. Abstract Dis. Dr. Sci. (Tech.) 05.06.02. Leningrad, 1978, 36 p.
- [3] Burmistrova O.N., Prosuzhikh A.A., Khitrov E.G., Kunitskaya O.A., Luneva E.N. *Teoreticheskie issledovaniya proizvoditel'nosti forvarderov pri ogranicheniyakh vozdeystviya na pochvogrunty* [Theoretical studies of forwarder productivity with limited impact on soils]. Russian Forestry J., 2021, no. 3, pp. 101–116 DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-101-116
- [4] Zhukov A.V., Loy V.N. *Otsenka vliyaniya glubiny kolei na silu soprotivleniya kacheniyu kolesnoy trelevochnoy mashiny* [Assessment of the effect of rut depth on the rolling resistance of a wheeled skidding machine]. Lesa Evropeyskogo regiona — ustoychivoe upravlenie i razvitiye: mater. mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Forests of the European region — sustainable management and development: materials of the international scientific and practical conference]. Part 2, Minsk, December 4–6, 2002, Minsk: BSTU, 2002, pp. 198–201.
- [5] Loy V.N. *Otsenka sily soprotivleniya kacheniyu kolesnoy trelevochnoy mashiny s uchetom deformatsii lesnykh pochvogrunтов* [Evaluation of the rolling resistance force of a wheeled skidding machine, taking into account the deformation of forest soils]. Trudy BGU. Lesnaya i derevoobrabatvyayushchaya promyshlennost' [Proceedings of BSTU. Forestry and Woodworking Industry], 2002, no. 2, pp. 44–47.
- [6] Ilintsev A.S., Nakvasina E.N. *Obrazovanie koleynosti pri prokhode lesozagotovitel'noy tekhniki v el'nikakh na dvuchlennykh porodakh* [Rut formation after the passage of logging machinery in spruce forests on binomial soils]. Izvestia Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii [Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy], 2021, no. 237, pp. 168–182. <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2021.237.168-182>
- [7] Pandur Z., Kopseak H., Šušnjar M., Landekić M., Šporčić M., Bačić M. Effect of forwarder multipassing on forest soil parameters changes. iForest, 2022, no. 15, pp 476–483. DOI: 10.3832/ifer4138-015
- [8] Fjeld D., Østby-Berntsen Ø. The effects of an auxiliary axle on forwarder rut development — a Norwegian field study. Int. J. For. Eng., 2020, no. 31(3), pp. 192–196. <https://doi.org/10.1080/14942119.2020.1765645>
- [9] Ala-Ilomäki J., Lindeman H., Mola-Yudego B., Prinz R., Väättäinen K., Talbot B., Routa J. The effect of bogie track and forwarder design on rut formation in a peatland. Int. J. For. Eng., 2021, no. 32(sup1), pp. 12–19. <https://doi.org/10.1080/14942119.2021.1935167>
- [10] Bumber Z., Đuka A., Popović M., Poršinsky T. Soil characteristics in oak lowland stand — a case study of a 6-wheeled forwarder's impact on forest soil. Croat. J. For. Eng., 2024, no. 45(1), pp. 85–95. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2024.2362>
- [11] Nikitin V.V., Skrypnikov A.V., Bavykina E.G., Vikulin I.A., Bryukhovetskiy A.N., Boykov P.A. *Optimal'noe razmeshchenie lesotransportnoy seti na modeli mestnosti* [Optimal placement of the forest transportation network on the terrain model]. Teoriya i praktika innovatsionnykh tekhnologiy v APK: mater. nats. nauch.-prakt. konf. [Theory and practice of innovative technologies in agriculture: mater. national scientific and practical conference]. Part 1, Voronezh, April 19–21, 2022. Voronezh: Voronezh State Agrarian University, 2022, pp. 99–120.
- [12] Dymov A.A., Startsev V.V., Gorbach N.M., Severgina D.A., Kutuyavin I.N., Osipov A.F., Dubrovsky Yu.A. Changes in soil and vegetation with different number of passes of wheeled forestry equipment (Middle Taiga, Komi Republic). Eurasian Soil Sci., 2022, v. 55, no. 11, pp. 1633–1646. <https://doi.org/10.1134/S1064229322110023>
- [13] Bolshakov B.M. *Snizhenie otritsatel'nykh posledstviy ot vozdeystviya trelevochnykh sistem na lesnyyu pochvu* [Reducing the negative effects of skidding systems on forest soil]. Abstract Dis. Dr. Sci. (Tech.) 05.21.01. St. Petersburg, 1998. 61 p.
- [14] Borovlev Yu.A., Kozlov D.G., Skrypnikov A.V., Sergeev A.S., Yarovenko A.A. *Kontrol' parametrov protsessa uplotneniya grunтов zemlyanogo polotna lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Parameters control of roadbed soil compaction process on truck haul roads]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2025, vol. 29, no. 4, pp. 139–155. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-139-155
- [15] Ilintsev A.S., Cherkasov N.S. *Analiz pochvennogo pokrova sploshnykh vyrubok s pomoshch'yu bespilotnogo letatel'nogo apparata* [Analysis of soil cover of clearcuts using unmanned aerial vehicle]. Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Current problems in remote sensing of the Earth from space], 2024, v. 21, no. 4, pp. 223–234. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-223-234
- [16] Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. *Modelirovanie vzaimodeystviya lesnykh mashin s pochvogruntom pri rabote na sklonakh* [Modeling the interaction of forest machines with soil when working on slopes]. Russian Forestry J., 2021, no. 6, pp. 121–134. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-121-134
- [17] Makarenko A.V., Bykovskiy M.A., Laptev A.V. *Effektivnost' vypolneniya tekhnologicheskikh operatsiy pri provedenii vyborochnykh rubok lesa* [Efficiency of technological operations during selective logging]. Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa [Actual problems of forest complex development], Vologda, December 1–2, 2015. Vologda: Vologda State University, 2016, pp. 32–37.
- [18] Makarenko A.V. *Proektirovanie skhem trelevochnykh volokov na lesoseke s nerazrabatyvaemym uchastkom* [Design of skidding trails at untapped cutting area]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2022, vol. 26, no. 1, pp. 126–134. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-1-126-134

- [19] Heppelmann J.B., Talbot B., Antón Fernández C., Astrup R. Depth-to-water maps as predictors of rut severity in fully mechanized harvesting operations. *Int. J. For. Eng.*, 2022, no. 33(2), pp. 108–118. DOI: 10.1080/14942119.2022.204472
- [20] Jones M.-F., Arp P. Soil trafficability forecasting. *OJF*, 2019, no. 9, pp. 296–322. <https://doi.org/10.4236/ojf.2019.94017>
- [21] Schönauer M., Hoffmann S., Maack J., Jansen M., Jaeger D. Comparison of selected terramechanical test procedures and cartographic indices to predict rutting caused by machine traffic during a cut-to-length thinning operation. *Forests*, 2021, no. 12 (2), p. 113. <https://doi.org/10.3390/f12020113>
- [22] Mohtashami S., Eliasson L., Jansson G., Sonesson J. Influence of soil type, cartographic depth-to-water, road reinforcement and traffic intensity on rut formation in logging operations: a survey study in Sweden // *Silva Fenn.*, 2017, v. 51, no. 5, article id 2018, 14 p. <https://doi.org/10.14214/sf.2018>
- [23] Lastochkin D.M., Moskaleva S.A., Larina A.V., Muchkaeva G.M. *Modelirovanie opornoy poverkhnosti lesosechnykh mashin* [Modeling of the support surface of logging machines]. *Nauchnyy zhurnal KUBGAU* [Scientific Journal of KubSAU], 2013, no. 85(01), pp. 1–13.
- [24] Dobrynin Yu.A., Polikarpov A.O. *K voprosu otsenki vozmushcheniy na khodovuyu sistemu transportnykh mashin v protsesse ikh dvizheniya v lesnykh usloviyakh* [On the issue of assessing disturbances on the chassis of transport vehicles during their movement in forest conditions]. *Sbornik statey po materialam nauch.-tekhn. konferentsii instituta tekhnologicheskikh mashin i transporta lesa po itogam nauch.-issled. rabot 2022 goda* [Collection of articles based on scientific and technical materials. conferences of the Institute of Technological Machines and Forest Transport based on the results of scientific research works of 2022]. St. Petersburg: SPbGLTU, 2023, pp. 28–32.
- [25] Simanovich V.A., Pishchov M.N., Smeyan A.I. *Ekspluatatsionnaya otsenka raboty kolesnykh lesnykh agregatnykh mashin* [Operational assessment of the operation of wheeled forest aggregate machines]. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU]. Series 2. Forestry and woodworking industry, 2008, no. 2, pp. 92–95.
- [26] Goydenko A.A., Alyabev A.F. *Ob opredelenii statisticheskikh kharakteristik mikroprofiley vyrubok* [The determination of statistical characteristics of microprofiles of cutting areas]. *Russian Forestry J.*, 1989, no. 2, pp. 119–120.
- [27] Khakhina A.M. *Metody prognozirovaniya i povysheniya prokhodimosti kolesnykh lesnykh mashin* [Methods of forecasting and increasing the cross-country ability of wheeled forest vehicles]. *Abstract Dis. Dr. Sci. (Tech.) 05.21.01. Arkhangelsk*, 2018. 40 p.
- [28] Protas P.A., Zavoytskikh G.I. *Rabotosposobnost' trelevochnykh volokov na gruntakh povyshennogo uvlazhneniya* [The operability of skidding trails on soils with increased moisture]. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU]. Series 2. Forestry and woodworking industry, 2005, no. 13, pp. 28–30.
- [29] Silaev A. *Spektralnaya teoriya podressorivaniya transportnykh mashin* [Spectral theory of springing of transport vehicles]. Moscow: Mashinostroenie, 1972, 192 p.
- [30] Dobrynin Yu.A., Krivonogova A.S., Pushkov Yu.L., Spiridonov S.V., Kuzin I.S. *Preobrazovanie zakonov raspredeleniya issleduemykh parametrov vertikal'noy dinamiki lesokhozyaystvennogo traktora kolesnoy formuloy 4x4* [Transformation of the distribution laws of the studied parameters of the vertical dynamics of a 4x4 forestry tractor]. *Sbornik statey po materialam nauch.-tekhn. konferentsii instituta tekhnologicheskikh mashin i transporta lesa po itogam nauch.-issled. rabot 2021 goda* [Collection of articles based on scientific and technical materials. conferences of the Institute of Technological Machines and Forest Transport based on the results of scientific research works of 2021]. St. Petersburg: SPbGLTU, 2022, pp. 408–415.
- [31] Borisevich V.B. *Nauchnye osnovy modelirovaniya i upravleniya tekhnologicheskimi mashinami na gruntakh so slaboy nesushchey sposobnost'yu* [Scientific foundations of modeling and control of technological machines on soils with weak bearing capacity]. *Abstract Dis. Dr. Sci. (Tech.) 05.05.03. Moscow*, 2006. 42 p.
- [32] Tsygarova M.V. *Povyshenie effektivnosti osvoeniya lesosek s pereuvlazhennymi gruntami putem obosnovaniya ratsional'noy tekhnologii: v usloviyakh Respubliki Komi* [Improving the efficiency of the development of logging areas with waterlogged soils by substantiating rational technology: in the conditions of the Komi Republic]. *Abstract Dis. Cand. Sci. (Tech.) 05.21.01. St. Petersburg*, 1998. 21 p.

Author's information

Piskunov Maksim Anatol'evich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Petrozavodsk State University, piskunov_mp@list.ru

Received 16.02.2025.

Approved after review 30.10.2025.

Accepted for publication 18.02.2026.